

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

La ciudad de Tarija, al igual que muchas otras ciudades en rápido crecimiento, enfrenta problemas de congestión vehicular en sus vías urbanas. La Avenida Víctor Paz Estensoro, una de las principales arterias de la ciudad, es un ejemplo claro de esta problemática. El aumento de la población, la expansión urbana y la falta de planificación y gestión del tráfico han llevado a una situación crítica en términos de congestión vehicular, afectando negativamente la calidad de vida de los ciudadanos y la eficiencia del transporte.

En este contexto, la implementación de sistemas de semaforización inteligente se presenta como una posible solución para mitigar el congestionamiento vehicular en la Avenida Víctor Paz Estensoro. La semaforización inteligente utiliza tecnologías avanzadas, como sensores y algoritmos de inteligencia artificial, para optimizar el flujo de tráfico y reducir los tiempos de espera en los cruces.

El objetivo principal de este proyecto es analizar el impacto de la implementación de semaforización inteligente en la Avenida Víctor Paz Estensoro de la ciudad de Tarija, con el fin de reducir el congestionamiento vehicular y mejorar la eficiencia del transporte. Para lograr este objetivo, se realiza un análisis detallado de la situación actual del tráfico en la Avenida Víctor Paz Estensoro, se diseñará y simularemos un sistema de semaforización inteligente y se evaluarán los resultados obtenidos.

Este proyecto contribuye a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos de Tarija, al reducir los tiempos de viaje y mejorar la seguridad vial. Además, sienta las bases para futuras investigaciones y proyectos que busquen mejorar la eficiencia del transporte y reducir el congestionamiento vehicular en la ciudad de Tarija.

1.2. Justificación

El presente proyecto se justifica por la urgencia de abordar el congestionamiento vehicular en la Avenida Víctor Paz Estensoro mediante la implementación de un

sistema de semaforización inteligente, una herramienta tecnológica que se adapta en tiempo real a las condiciones del tráfico, mejorando la fluidez vehicular y reduciendo los tiempos de espera. A diferencia de los sistemas de semaforización tradicionales, que operan con tiempos fijos y no consideran las variaciones en el flujo vehicular, la semaforización inteligente utiliza sensores, algoritmos y datos en tiempo real para ajustar los ciclos de los semáforos según la demanda, priorizando la eficiencia y la seguridad vial. Este enfoque responde a las necesidades actuales de la ciudad de Tarija, donde la planificación urbana y la infraestructura vial requieren actualización para adaptarse al crecimiento poblacional y vehicular.

Desde el punto de vista técnico, este proyecto es pertinente porque permite aplicar conocimientos de ingeniería civil, como el diseño de accesos, el análisis de flujos de tráfico y la integración de tecnologías emergentes, en un caso práctico con impacto directo en la comunidad. Además, la investigación contribuirá a generar información valiosa sobre el comportamiento del tráfico en la Avenida Víctor Paz Estenssoro, identificando puntos críticos de congestión y proponiendo soluciones específicas que puedan servir como base para futuras intervenciones en otras zonas de la ciudad. Este análisis no solo tiene un enfoque local, sino que también se alinea con tendencias globales de desarrollo de ciudades inteligentes, donde la tecnología juega un rol clave en la mejora de la infraestructura urbana.

Socialmente, la implementación de este proyecto busca beneficiar a los habitantes de Tarija al reducir los tiempos de viaje, disminuir el estrés asociado a los embotellamientos y mejorar la seguridad en los accesos, lo que podría traducirse en una menor tasa de accidentes de tránsito. Económicamente, la optimización del tráfico tiene el potencial de reducir los costos asociados al consumo excesivo de combustible y al desgaste de los vehículos, además de favorecer las actividades comerciales que dependen de esta avenida como corredor logístico. Ambientalmente, al minimizar los tiempos de espera y las emisiones de gases de efecto invernadero, se contribuye a la sostenibilidad y a la lucha contra el cambio climático, un aspecto cada vez más relevante en la gestión urbana moderna.

En conclusión, este proyecto se justifica por su relevancia técnica, social, económica y ambiental. Representa una oportunidad para aplicar conocimientos de ingeniería civil en la resolución de un problema real, aportando una solución innovadora que no solo responde a las necesidades inmediatas de la ciudad, sino que también establece un precedente para la modernización de la infraestructura vial en Bolivia. Este trabajo no solo tiene un valor académico, sino que aspira a ser un aporte concreto al desarrollo urbano sostenible de Tarija.

1.2.1. Aporte académico

El presente proyecto representa un aporte significativo al campo de la ingeniería civil y la gestión del transporte urbano en el contexto boliviano, al generar conocimiento empírico y metodológico aplicado a la movilidad inteligente en ciudades medianas como Tarija, donde la literatura existente como el Manual de diseño de calles para las ciudades bolivianas (Villanueva et al., 2016), ofrece recomendaciones generales para semáforos en accesos densos, pero carece de evaluaciones específicas adaptadas a avenidas lineales con topografía irregular y patrones de flujo influenciados por factores locales como el comportamiento vial de los habitantes y fluctuaciones eléctricas.

Mediante la integración de aforos vehiculares reales en accesos críticos de la Avenida Víctor Paz Estenssoro y simulaciones computacionales con el software VISSIM, este estudio produce datos cuantitativos sobre variables clave como el tiempo de ciclo semafórico, la fluidez del tráfico y la reducción potencial de congestión, los cuales pueden replicarse en investigaciones futuras en repositorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS) o publicaciones en revistas regionales de ingeniería vial. Además, propone un marco metodológico híbrido que combina observación directa con modelado dinámico replicable para otras vías urbanas en Bolivia, fomentando la actualización de currículos en la Carrera de Ingeniería Civil al incorporar herramientas de simulación y análisis, y contribuyendo a cerrar la brecha entre teoría y práctica en la optimización de sistemas semafóricos obsoletos, posicionando a Tarija como un caso de estudio pionero en semaforización inteligente adaptada a contextos de desarrollo intermedio.

1.3. Situación problémica

1.3.1. Planteamiento del problema

La ciudad de Tarija ha experimentado en la última década un crecimiento sostenido del parque automotor, estimado en más de 72.000 vehículos registrados, lo que representa una carga considerable para una infraestructura vial que no ha evolucionado a la misma velocidad. Este aumento desmedido, sumado a la carencia de planificación urbana y vial efectiva, ha provocado que arterias principales como la Avenida Víctor Paz Estenssoro se vean diariamente colapsadas por el tránsito motorizado.

Originalmente diseñada para funcionar como una vía rápida de descongestión hacia el centro urbano, la avenida ha devenido en uno de los puntos neurálgicos de mayor conflicto vial. Durante las horas pico (07:00–08:30 y 12:00–14:00), se observan largas filas de vehículos, tiempos de espera excesivos y frecuentes bloqueos en accesos como la de la calle Ballivián, la calle La Madrid y la Av. Integración, generando serios problemas de fluidez. Esto repercute directamente en la calidad de vida de los ciudadanos, incrementa los niveles de contaminación ambiental y acústica y eleva los riesgos de accidentes tanto vehiculares como peatonales.

Uno de los factores más determinantes en esta problemática es la deficiente gestión semafórica. En Tarija, la mayoría de los semáforos opera bajo sistemas preprogramados con ciclos fijos, sin capacidad de adaptarse dinámicamente al volumen de tránsito. Además, muchos de estos dispositivos presentan fallas técnicas recurrentes, especialmente por fluctuaciones en la tensión eléctrica, lo cual deriva en desprogramaciones frecuentes, como han denunciado autoridades de movilidad y medios locales.

Asimismo, no existe un sistema integral de control y monitoreo del tráfico en tiempo real que permita optimizar los tiempos de cruce según demanda. Esto genera que, aun en horas de bajo flujo, los semáforos mantengan ciclos innecesariamente largos, provocando congestión artificial y consumo innecesario de combustible. La falta de pasarelas peatonales y de señalización horizontal y vertical adecuada en esta vía intensifica el riesgo para los transeúntes, en especial en zonas escolares y comerciales.

En este contexto, la incorporación de un sistema de semaforización inteligente se plantea como una solución tecnológica viable. Estos sistemas permiten ajustar los ciclos semafóricos en función de la densidad del tránsito detectada mediante sensores o cámaras, priorizando la fluidez del tráfico en tiempo real. Si bien ya se han implementado con éxito en otras ciudades bolivianas como La Paz y Santa Cruz, aún no existe una evaluación técnica de su efectividad en el contexto específico de Tarija, donde la configuración vial, el comportamiento del conductor y la falta de cultura vial representan desafíos particulares.

Por ello, es fundamental realizar una evaluación rigurosa de la semaforización inteligente en la avenida Víctor Paz Estenssoro, identificando su impacto potencial sobre la reducción del congestionamiento vehicular, los tiempos de recorrido, la seguridad vial y el uso eficiente del espacio urbano. Esta evaluación no solo aportará criterios técnicos a las autoridades municipales, sino que contribuirá a sentar las bases para una Tarija más ordenada, moderna y sostenible.

1.3.2. Delimitación temporal

La delimitación temporal de este proyecto se centra en un período de recolección de datos y análisis representativo de las condiciones de tráfico en la Avenida Víctor Paz Estenssoro, abarcando los meses de julio a octubre de 2025, coincidiendo con el Semestre II de la Carrera de Ingeniería Civil en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

1.3.3. Delimitación espacial

La delimitación espacial restringe el estudio a la Avenida Víctor Paz Estenssoro en su tramo urbano principal dentro de la ciudad de Tarija, Bolivia, desde su acceso con la Avenida de la Integración de la rotonda los Ceibos, hasta el acceso con la rotonda Moto Méndez de la UAJMS, abarcando aproximadamente 2,38 km de longitud y enfocándose en todas las rotondas de esta avenida, las cuales tienen semáforos. No se incluyen ramales secundarios ni avenidas adyacentes como la Panamericana o el centro histórico, para concentrar el análisis en el corredor lineal de la avenida, donde se concentra el 70% del flujo congestionado según datos preliminares. Esta focalización

espacial permite una evaluación detallada y factible, excluyendo expansiones periféricas o rurales que excedan el ámbito urbano de Tarija.

1.3.4. Formulación del problema

¿Cómo puede la implementación de un sistema de semaforización inteligente en la Avenida Víctor Paz Estenssoro de la ciudad de Tarija contribuir a reducir el congestionamiento vehicular, mejorar la fluidez del tráfico y minimizar los impactos asociados a los tiempos de espera?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de la implementación de un sistema de semaforización inteligente en la Avenida Víctor Paz Estenssoro de la ciudad de Tarija, mediante el aforo vehicular actual y simulaciones computacionales, con el propósito de reducir el congestionamiento vehicular.

1.4.2. Objetivos específicos

- Observar el tipo de tráfico vehicular que transita en la Av. Víctor Paz Estenssoro.
- Identificar los accesos presentes en las rotondas, a lo largo de la Av. Víctor Paz Estenssoro
- Realizar aforos de tráfico en todos los accesos de las rotondas, mediante conteo vehicular y análisis de tiempos de circulación.
- Evaluar el desempeño del sistema de semaforización actual en los accesos seleccionados.
- Simular escenarios de tránsito con y sin la incorporación de semaforización inteligente, utilizando herramientas de modelación especializados como el software VISSIM.
- Analizar el impacto potencial de la semaforización inteligente en la disminución del congestionamiento vehicular.

- Formular recomendaciones técnicas para la implementación de un sistema de semaforización inteligente en la avenida.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Identificación de variables

La semaforización inteligente en la Avenida Víctor Paz Estenssoro reduce el congestionamiento en los accesos, optimizando el flujo vehicular.

1.5.2. Variables independientes

- **Nivel de congestionamiento vehicular:** Aforo de volumen vehicular en la Avenida Víctor Paz Estenssoro.
- **Fluidez del tráfico:** La velocidad promedio de circulación de los vehículos.

1.5.3. Variable dependiente

- **Tiempo de ciclo:** conjunto de intervalos de verde, amarillo y rojo para todos los movimientos o fases que controla el semáforo.

1.6. Criterios de diseño metodológico

1.6.1. Unidad de muestra

Elementos que son medidos para evaluar la eficacia de la semaforización inteligente.

- Aforo vehicular.
- Velocidad vehicular (vehículos/hora) en horas pico.
- Duración de los ciclos semafóricos.

1.6.2. Población

Todos los vehículos que circulan por la Avenida Víctor Paz Estenssoro de la ciudad de Tarija, especialmente en los accesos donde se implementara la semaforización inteligente, durante un periodo representativo.

1.6.3. Muestra

La muestra consiste en los vehículos que transitan por los accesos de la Avenida Víctor Paz Estenssoro durante un periodo representativo de al menos 3 días hábiles, con inclusión de 1 día de fin de semana si el tráfico muestra patrones significativos en esos periodos, esto conforme a las recomendaciones del HCM de AASHTO para estimar volúmenes representativos y variabilidad en vías urbanas.

Primeramente, los conteos se realizarán durante 12 horas continuas por día para identificar las horas pico, definidas como la hora con el volumen más alto, enfocándose en periodos clave como la hora pico matutina, mediodía, y hora pico vespertina.

Esto se alinea con el HCM para análisis de capacidad en calles urbanas, asegurando datos para el Tránsito Promedio Diario (TPD) y mensuales (TPM). Los conteos utilizarán métodos manuales, clasificando vehículos por tipo, y aplicando ajustes por vehículos pesados, giros y ancho de carril.

1.7. Alcance

El presente proyecto de investigación tiene como alcance la evaluación de la eficacia de la semaforización inteligente en la reducción del congestionamiento vehicular en la Avenida Víctor Paz Estenssoro de la ciudad de Tarija, enfocándose específicamente en los accesos críticos que presentan altos niveles de saturación durante las horas pico.

El estudio abarcará la recolección de datos reales de tráfico mediante observaciones directas y herramientas tecnológicas, así como la simulación computacional con el software VISSIM, lo que permitirá modelar el comportamiento del flujo vehicular en escenarios con y sin semaforización inteligente.

Los resultados estarán delimitados al contexto urbano de la ciudad de Tarija, específicamente en la Avenida Víctor Paz Estenssoro, y serán válidos para las condiciones actuales del tráfico urbano en dicha vía. No se abordarán aspectos económicos ni de diseño técnico de los semáforos inteligentes, ya que el objetivo se centra en evaluar su impacto funcional en la mejora del tránsito.

Asimismo, el estudio tiene un enfoque propositivo, por lo que se plantearán recomendaciones técnicas en base a los resultados obtenidos, que puedan servir como insumo para futuras decisiones de planificación vial por parte de las autoridades municipales.

CAPÍTULO II

INGENIERÍA DE TRÁFICO Y

LA SEMAFORIZACIÓN

INTELIGENTE

CAPÍTULO II

INGENIERÍA DE TRÁFICO Y LA SEMAFORIZACIÓN INTELIGENTE

2.1. Ingeniería de tráfico

La Ingeniería de tráfico, es una ciencia que se ocupa de estudiar, analizar y encontrar soluciones a la problemática del transporte en general y al tránsito o tráfico en particular, tanto de pasajeros como de carga.

2.1.1. Características de tránsito

Se analizan los diversos factores, las limitaciones de los vehículos y los usuarios como elementos de la corriente de tránsito. Se investigan: la velocidad, el volumen y la densidad; el origen, destino del movimiento, la capacidad de las calles y carreteras; el funcionamiento de pasos a desnivel, terminales, accesos canalizados y se analizan los accidentes, etc. Así se pone en evidencia la influencia de la capacidad y limitaciones del usuario en el tránsito; se estudia al usuario particularmente desde el punto de vista psíquico-físico, indicándose la rapidez de las reacciones para frenar, para acelerar, para maniobrar, su resistencia al cansancio, etc., empleando en todo esto, métodos modernos e instrumentos psicotécnicos, así como la metodología estadística.

2.1. Alcances de la ingeniería de tránsito

2.1.1. Funcionalidad de una vía

Determinada según la necesidad operacional de la carretera o de los intereses de la nación en sus diferentes niveles:

- **Primarias:** son troncales, transversales y accesos a capitales de Departamento que cumplen la función básica de integración de las principales zonas de producción y consumo del país. Las carreteras consideradas como Primarias deben funcionar pavimentadas. Este tipo de carreteras pueden ser de calzadas divididas según las exigencias particulares del proyecto.
- **Secundarias:** son vías que unen las cabeceras municipales entre sí y/o que provienen de una cabecera municipal y conectan con una carretera Primaria.

Las carreteras consideradas como Secundarias pueden funcionar pavimentadas.

- **Terciarias:** son vías de acceso que unen las cabeceras municipales con sus veredas o unen veredas entre sí. Las carreteras consideradas como Terciarias deben funcionar en afirmado. En caso de pavimentarse deberán cumplir con las condiciones geométricas estipuladas para las vías Secundarias.

2.1.2. Clasificación de vehículos según norma de diseño ABC

Si bien es importante conocer el número de vehículos que circula por una sección de carretera o, calle en periodos de tiempo definidos resulta también importante tener una relación del tipo de vehículo que circulen en ese periodo de tiempo entendiéndose como la composición del tráfico.

Una composición casi del tipo universal es la que se subdivide en vehículos livianos, medianos y de alto tonelaje o pesados, entendiéndose en livianos por automóviles, camionetas jeeps y otros que generalmente están compuestos de 2 ejes y 4 ruedas.

Generalmente los medianos representados buses de mediano tonelaje como ser micros y camiones pequeños diferenciándose por la capacidad de pasajeros o carga que puedan transportar este tipo de vehículos.

En el tipo Pesados, se tendrá vehículos de alto tonelaje diferenciándose de acuerdo al número de ejes o ruedas y al tipo y cantidad de carga que puedan soportar

Es necesario conocer los porcentajes de cada tipo de vehículos que circulan para analizar los efectos que éstos producen como ser: el porcentaje de vehículos pesados que ejercerán una disminución de la capacidad de una ruta reducirán las velocidades de circulación requerirán mayor espacio para las maniobras.

Tabla N° 1. Clasificación de tipos de vehículos.

Clasificación vehicular	Tipos de vehículos	Clases de vehículos	Esquema vehicular	Definición
Vehículos de pasajeros	Livianos	Toritos		Ciclomotores de 2,3 o 4 ruedas
		Motocicletas		
	Medianos	Automóviles		Automóviles de uso particular, destinados al transporte de personas.
		Vagoneta, jeep		
		Camioneta		Vehículos destinados al transporte de mercancía, dotados solo de cuatro ruedas, es decir, furgonetas y camionetas (Camiones ligeros).
Vehículos de carga		Camión liviano de carga		
	Pesados de carga	Camión de carga mediano		Camiones rígidos dedicados al transporte de mercancía, de más de 4 ruedas, (Eje doble de 5 a 10 toneladas).
		Camión de carga grande		Camiones rígidos dedicados al transporte de mercancía camiones cisterna dedicados al transporte de combustible de más de 4 ruedas, (Eje

		Camión semirremolque		triple de 26toneladas). Camiones rígidos dedicados al transporte de mercancía, de más de 4 ruedas, (tiene 5 ejes de 40toneladas).
		Camiones Remolque		Camiones rígidos dedicados al transporte de mercancía, de más de 4 ruedas, (Eje triple entre extremos de ejes 45toneladas).
Vehículos de pasajeros	Pesados de pasajeros	Minibús		Son los vehículos destinados al transporte público, que incluyen los minibuses pequeños (Hasta 15 pasajeros) y microbús mediano (Hasta 25 pasajeros), flotas (Hasta de 56 pasajeros)
		Microbús		
		Flotas		

Fuente: Elaboración propia

2.1.3. Características de los vehículos

Los vehículos que circulan por las carreteras influyen el diseño fundamentalmente desde dos puntos de vista: velocidad que son capaces de desarrollar y dimensiones que le son propias.

- **Los vehículos livianos:** Automóviles y similares, determinan las velocidades máximas a considerar en el diseño, así como las dimensiones mínimas, ellas participan en la determinación de las distancias de visibilidad de frenado y adelantamiento.
- **Los vehículos pesados:** Camiones de diversos tipos, y en menor medida los buses, experimentan reducciones importantes en su Velocidad de Operación cuando existen tramos en pendiente. La necesidad de limitar estas reducciones de velocidad determina la longitud y magnitud aceptable de las pendientes.
- **Las dimensiones:** De los vehículos y su movilidad son factores de incidencia relevante en el diseño, largo, ancho y alto, condicionan en gran medida diversos elementos de la sección transversal, los radios de giro, los ensanches de calzada en curvas y los gálibos verticales bajo estructura. Su peso es uno de los factores determinantes del cálculo estructural de pavimentos y estructuras.

2.1.4. Capacidad vial

Se define como capacidad de una infraestructura de transporte al “flujo máximo horario al que se puede razonablemente esperar que las personas o vehículos atraviesen un punto o sección uniforme de un carril o calzada durante un periodo de tiempo dado, bajo condiciones prevalecientes de la vía, del control y del tránsito”.

De la definición anterior se infieren las siguientes consideraciones:

- La capacidad puede expresarse en términos de vehículos o en términos de personas.
- La capacidad se refiere a un punto o sección uniforme de la infraestructura; por tanto, segmentos o puntos con diferentes características tendrán diferentes capacidades.
- La capacidad se define sobre la base de una “esperanza razonable”. No es la máxima tasa de flujo absoluta jamás observada en el tipo de infraestructura analizada. Debe tenerse en cuenta que se consideran condiciones promedio, y que las características de los conductores, los vehículos y ambientales, puede diferir de una región a otra.

- La capacidad está dada bajo condiciones prevalecientes de la vía (características geométricas, tipo de sección, pendientes, dimensiones de carriles, bermas, etc.), del control (dispositivos de control de tránsito como semáforos, señales, movimientos permitidos), y del tránsito (composición vehicular, velocidad, características del flujo vehicular).
- La capacidad se refiere a una tasa de flujo vehicular o personas durante un período de tiempo que muy a menudo es el periodo de 15 minutos pico. La capacidad no se refiere al máximo volumen al que puede darse servicio durante una hora. Esta definición contempla la posibilidad de variaciones significativas del flujo dentro de una hora.

2.1.4.1. Volumen e intensidad de tráfico

El volumen de tráfico vehicular se expresa generalmente en la cantidad de vehículos que pasan por la sección de una vía en un determinado periodo de tiempo, ese volumen de tráfico tiene características espaciales por ocupar un lugar y características temporales porque se observan en un tiempo establecido. El volumen que se determina se considera los que circulan en un solo sentido o en ambos sentidos.

- **Volumen de tráfico promedio diario (TPD)**

El volumen de tráfico promedio diario es el número total de vehículos que pasan durante 24 horas o días completos igual o menor a un año y mayor que un día, dividido entre el número de días del periodo.

De acuerdo al número de días del periodo se presentan los siguientes volúmenes de tráfico promedio diarios:

- **Volumen de tráfico promedio horario (tph)**

El volumen de tráfico promedio horario es el número total de vehículos que pasan por un punto en un periodo de tiempo, dividido entre el valor de ese periodo de tiempo en horas.

Se ha establecido de acuerdo a investigaciones que la relación entre el T.P.D. y el T.P.H. es más o menos la siguiente:

$$\text{T.P.H.} = 12 - 15 \% \text{ T.P.D.}$$

Cabe recalcar que la anterior relación sólo es para valores máximos.

2.1.5. Medición de volúmenes de tráfico

Determinar la cantidad de vehículos ya sean horarios o diarios, es una necesidad dentro de la ingeniería de tráfico por lo tanto desde el inicio de esta ciencia se han buscado métodos que se adecúen a la realidad de cada estudio y a las posibilidades que se tengan de realizar los mismos. Existen dos tipos marcados de aforamiento que son los métodos manuales y los métodos automáticos.

2.1.5.1. Métodos manuales

Son aquéllos en los cuales se considera que el conteo de vehículos va a ser realizado en forma manual por uno o varios observadores quienes en base a una planilla preestablecida realicen el conteo de vehículos en un punto de aforo definido y en tiempos determinados.

La desventaja de este método es que es muy lento, trabajoso y con posibilidades de tener errores personales, además de tener un costo elevado por la cantidad de personal necesario.

La ventaja de este método está en que el aforamiento puede ser más completo y tomando en cuenta varias variables como ser tipo de vehículos, número de ejes, tipo de vehículos por servicio (Comerciales, de servicio público, particulares, de carga, etc.)

2.1.6. Periodo de recuento

De acuerdo a las necesidades de cada proyecto o estudio se pueden tener tres tipos de recuento de acuerdo a la periodicidad.

- Permanente
- Periódicos
- De tiempo específico

2.1.6.1. Recuentos permanentes

Son aquellos que se realizan generalmente con contadores automáticos que han sido instalados en una sección de la carretera que se van registrando diariamente los volúmenes para luego procesarlos, tener las variaciones semanales, mensuales y

anuales. Este tipo de recuento solo es factible en aquellas carreteras de mucha importancia por ejemplo en la actualidad debido a la tendencia de tener carreteras en concesión se hace necesario el registro permanente de los volúmenes de tráfico. Esto obviamente obliga a tener un presupuesto destinado al registro de valores de tráfico.

2.1.6.2. Recuentos periódicos

Cuando no se puede disponer de equipo permanente para toda la red vial que realice el trabajo del recuento de volúmenes se establece que es muy útil realizar recuentos periódicos en ciertas épocas del año que nos den valores contables y significativos cuya correlación nos permita adoptar como valores promedio del año. Estos recuentos periódicos a lo sumo tienen un tiempo de un mes y por un máximo de tres veces al año.

2.1.6.3. De tiempos específicos

Un período de recuento de tiempo específico es un intervalo determinado y delimitado durante el cual se realiza una medición, evaluación o registro de actividades, eventos o datos con el fin de analizarlos posteriormente.

En otras palabras, es un lapso concreto (por ejemplo, un día, una semana, un mes, un trimestre, un año, etc.) que se establece previamente para contabilizar o registrar información de manera organizada y comparable.

2.1.7. Velocidad

La velocidad es el espacio que recorre un vehículo y el tiempo que tarda en recorrerlo también es variable que depende de las características mismas del vehículo, del conductor, de la vía, del volumen vehicular que se encuentra circulando y las condiciones atmosféricas. Se puede decir que un vehículo que circula a grandes velocidades ahorra un tiempo es decir que la distancia recorrida es la misma, pero sufre variaciones en el tiempo. La unidad de la velocidad es expresada en (km/hr).

La velocidad de los vehículos está afectada por las características y estado de la vía, volumen y composición del tráfico, condiciones climatológicas y otros factores diversos que varían con el tiempo y el lugar.

2.1.7.1. Velocidad de punto

Llamada también velocidad instantánea es la velocidad con la que un vehículo pasa por un determinado punto de la vía.

Estos estudios tienen como propósito calcular el valor y la distribución de la velocidad de todos (conjunto) los vehículos que circulan por un lugar determinado bajo las condiciones imperantes en el momento de hacer el estudio.

Las características de la velocidad de punto tienen muchas aplicaciones en la ingeniería de tráfico en las cuales pueden ser:

- En la determinación de tendencias de la velocidad que pueden ser específicas por tipo de vehículo.
- Establecer límites de velocidad tanto máxima como mínima.
- Indicar la velocidad segura en curvas como en accesos
- Establecer longitudes de zonas de rebase prohibido.
- Analizar zonas de protección para peatones en escuelas y universidades.

2.1.7.2. Velocidad media temporal

Es la media aritmética de las velocidades de punto de todos los vehículos o un cierto grupo de vehículos, que pasan por una sección específica (punto) de una vía urbana o rural durante un intervalo de tiempo seleccionado. Por lo tanto, se tiene una distribución temporal de velocidades de punto.

2.1.8. Métodos de medición de velocidades

Los métodos de medición de velocidades de punto son las siguientes:

- Métodos manuales (cronómetro)
- Métodos automáticos (radar)

También para medir la velocidad de recorrido total como la velocidad de cruce se utilizan métodos manuales, el instrumento para estas mediciones es el cronómetro que en todo caso se necesitarían dos cronómetros uno para medir el tiempo de recorrido y

el otro para medir la duración de las demoras. Es importante tener un cronómetro que mida el tiempo en segundos y décimas de segundos.

2.1.9. Capacidad vehicular

La capacidad vehicular se define en el HCM como "el número máximo de vehículos que pueden pasar por un punto o sección uniforme de una carretera o carril durante un período de tiempo dado, bajo condiciones ideales prevalecientes de carretera, tráfico y control" (HCM 2010, Capítulo 5). Es una medida teórica que representa el flujo máximo sostenible sin congestión, expresado en vehículos por hora (veh/h) o vehículos por hora por carril (veh/h/carril).

El HCM distingue entre diferentes tipos de instalaciones viales, como vías interrumpidas (con semáforos o stops) y vías ininterrumpidas (flujo libre, como autopistas o carreteras urbanas sin interrupciones frecuentes). En los cálculos realizados, se utilizó el enfoque para vías ininterrumpidas, asumiendo un flujo continuo con ajustes por condiciones reales (ancho, giros, vehículos pesados, estacionamiento y paradas de ómnibus), ya que los datos indicaban características de carreteras urbanas con estacionamiento a la derecha.

La capacidad base para un carril en vías ininterrumpidas es típicamente de 1.900 a 2.400 veh/h/carril bajo condiciones ideales.

2.1.9.1. Método de cálculo de capacidad

El HCM (Capítulo 11 para vías interrumpidas en ediciones anteriores, o Capítulo 12 en HCM 2016) utiliza un método determinístico para estimar la capacidad ajustada. La capacidad real (C) se calcula multiplicando la capacidad base por factores de ajuste:

$$C = C_{base} * f_w * f_{hv} * f_p * f_g * f_{otros}$$

Donde:

C_{base} = Capacidad ideal, basada en el tipo de vía. Para carreteras urbanas el HCM sugiere 1.900-2.200 veh/h/carril, dependiendo de la velocidad libre (por ejemplo, 2.000 veh/h para 80 km/h).

F_w= Factor por ancho de carril y hombro. Si el ancho de carril es ≥ 12 pies (3,6 m) y el hombro ≥ 6 pies, $f_w = 1,0$. Para anchos menores, se reduce (por ejemplo, para 11 pies, $f_w = 0,97$). En los cálculos, se asumió $f_w = 1,0$ para anchos $\geq 3,6$ m, y se mantuvo para anchos cercanos como 3,35 m o 3,54 m, ya que el HCM permite flexibilidad en condiciones urbanas.

F_{hv}= Factor por vehículos pesados. Se calcula como:

$$f_{hv} = \frac{1}{1 + P_T * (E_T - 1)}$$

Donde PT es la proporción de vehículos pesados (ómnibus y camiones), y ET es el equivalente en vehículos de pasajeros (típicamente 2,0 para camiones en vías urbanas). En los cálculos, se usó una reducción directa de 1% por cada 1% que exceda el 10%, como ajuste simplificado del HCM para condiciones mixtas.

F_p= Factor por estacionamiento y paradas de ómnibus. El HCM indica que el estacionamiento a un lado reduce la capacidad en un 10-50%, dependiendo de la actividad (maniobras de entrada/salida). Se usó $f_p = 0,85$ para estacionamiento a la derecha en zonas urbanas. Para paradas de ómnibus, se aplica una reducción del 10% por parada antes de la Acceso en zonas intermedias, como en los cálculos ($f_{bus} = 0,90$).

F_g= Factor por giros. El HCM ajusta por giros a la izquierda y derecha, ya que generan conflictos. Para giros a la izquierda, reducción de 1% por cada 1% que exceda el 10%; para giros a la derecha, 0,5% por cada 1% que exceda el 10%, como se aplicó en los cálculos para vías con giros permitidos.

Otros factores: Incluyen pendiente, peatones, etc., pero en los cálculos se enfocaron en los principales, asumiendo condiciones planas y sin peatones significativos.

La capacidad práctica se obtiene multiplicando la teórica por 0,9, como ajuste conservador para condiciones reales (HCM recomienda factores de 0,8-0,95 para capacidad práctica o "capacidad sostenible").

2.1.10. Niveles de servicio

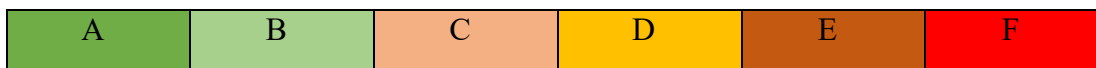
El concepto de nivel de servicio se utiliza para evaluar la calidad del flujo. Es “una medida cualitativa que descubre las condiciones de operación de un flujo de vehículos y/o personas, y de su percepción por los conductores o pasajeros”. Estas condiciones se describen en términos de factores como la velocidad y el tiempo de recorrido, la libertad de maniobra, las interrupciones a la circulación, la comodidad, las conveniencias y la seguridad vial.

En el Nivel de Servicio de los factores que afectan el Nivel de Servicio, se distinguen los internos y los externos. Los internos son aquellos que corresponden a variaciones en la velocidad, en el volumen, en la composición del tránsito, en el porcentaje de movimientos de entrecruzamientos o direccionales, etc.

Entre los externos están las características físicas, tales como la anchura de los carriles, la distancia libre lateral, la anchura de acotamientos, las pendientes, etc.

Para cada tipo de infraestructura se definen 6 niveles de servicio, para los cuales se disponen de procedimientos de análisis, se les otorga una letra desde la A hasta la F siendo el nivel de servicio (NS) A el que representa las mejores condiciones operativas, y el NS F, las peores.

Gráfico N° 1. Niveles de servicio.



Fuente: HCM

Tabla N° 2. Nivel de servicio.

Nivel de Servicio	Demora por Control (Segundos/Vehículos)
A	≤ 10
B	> 10 - 20
C	> 20 - 35
D	> 35 - 55
E	> 55 - 80
F	> 80

Fuente: HCM**2.1.10.1. Nivel de servicio A**

Representa una circulación a flujo libre. Los usuarios, considerados en forma individual, están virtualmente exentos de los efectos de la presencia de otros en la circulación. Poseen una altísima libertad para seleccionar sus velocidades deseadas y maniobrar dentro del tránsito.

Figura N° 1. Nivel de servicio A.**Fuente:** Google**2.1.10.2. Nivel de servicio B**

Está dentro del rango del flujo estable, aunque se empiezan a observar otros vehículos integrantes de la circulación. La libertad de selección de las velocidades deseadas, sigue relativamente inafectada, aunque disminuye un poco la libertad de maniobra en relación con la del nivel de servicio A. El nivel de comodidad y conveniencia es algo inferior a los del nivel de servicio A, porque la presencia de otros comienza a influir en el comportamiento individual de cada uno.

Figura N° 2. Nivel de servicio B.



Fuente: Google

2.1.10.3. Nivel de servicio C

Pertenece al rango del flujo estable, pero marca el comienzo del dominio en el que la operación de los usuarios individuales se ve afectada de forma significativa por las interacciones con los otros usuarios. La selección de velocidad se ve afectada por la presencia de otros, y la libertad de maniobra comienza a ser restringida. El nivel de comodidad y conveniencia desciende notablemente.

Figura N° 3. Nivel de servicio C.



Fuente: Google

2.1.10.4. Nivel de servicio D

Representa una circulación de densidad elevada, aunque estable. La velocidad y libertad de maniobra quedan seriamente restringidas, y el conductor o peatón experimenta un nivel general de comodidad y conveniencia bajo. Los pequeños incrementos del flujo generalmente ocasionan problemas de funcionamiento.

Figura N° 4. Nivel de servicio D.



Fuente: Google

2.1.10.5. Nivel de servicio E

El funcionamiento está en él, o cerca del, límite de su capacidad. La velocidad de todos se ve reducida a un valor bajo, bastante uniforme. La libertad de maniobra para circular es extremadamente difícil, y se consigue forzando a un vehículo o peatón a “ceder el paso”. Los niveles de comodidad y conveniencia son enormemente bajos, siendo muy elevada la frustración de los conductores o peatones. La circulación es normalmente inestable, debido a que los pequeños aumentos del flujo o ligeras perturbaciones del tránsito producen colapsos.

Figura N° 5. Nivel de servicio E.



Fuente: Google

2.1.10.6. Nivel de servicio F

Representa condiciones de flujo forzado. Esta situación se produce cuando la cantidad de tránsito que se acerca a un punto o calzada, excede la cantidad que puede pasar por él. En estos lugares se forman colas, donde la operación se caracteriza por la existencia de ondas de parada y arranque, extremadamente inestable.

Define una operación forzada del flujo a baja velocidad donde los volúmenes están por debajo de la capacidad estas condiciones son las resultantes de colas de vehículos detrás de una restricción de maniobras. En el límite tanto la velocidad como el volumen pueden bajar a 0 creándose el congestionamiento.

Figura N° 6. Nivel de servicio F.



Fuente: Google

Este análisis de calidad de circulación tanto en carreteras como en calles ha sido clasificado por El Manual de Capacidad a través de los niveles de servicio.

2.1.11. Relación entre el nivel de servicio y congestionamiento

Es difícil predecir en qué condiciones un "atasco" sucede, pues puede ocurrir de repente. Se ha constatado que los incidentes (tales como accidentes o incluso un solo coche frenado en gran medida en un buen flujo anteriormente) pueden causar repercusiones (un fallo en cascada), que luego se difunde y crear un atasco de tráfico sostenido, cuando, de otro modo, el flujo normal puede o ha continuado durante algún tiempo más.

El congestionamiento vehicular está ligado a muchos factores como ser:

- El aumento de la población.
- El crecimiento demográfico de la ciudad.
- La poca planificación en el trazado de rutas y el dimensionamiento de las mismas en las ciudades.
- El incremento del parque automotor en las ciudades.

2.1.12. Semaforización

Un semáforo es un dispositivo de control del tráfico que regula el flujo de vehículos y peatones en accesos o puntos críticos de una vía. Consiste en una estructura vertical equipada con luces de diferentes colores (rojo, amarillo y verde), cada una con un significado específico.

El semáforo es la tercera señal con mayor prioridad, únicamente por detrás de los agentes, las señales de balizamiento y señales circunstanciales.

Los semáforos son señales luminosas que indican quién debe pasar o detenerse, en el caso de un peatón cuándo debe cruzar una calle o en el caso de un conductor cuándo debe esperar porque es el turno de los peatones o cuándo circular.

Los semáforos son fundamentales para mantener la seguridad vial y prevenir accidentes, ya que ayudan a organizar el tráfico de manera ordenada y eficiente.

Además, son una parte esencial de la infraestructura urbana en las ciudades de todo el mundo.

¿Y cómo podemos hacer entender a nuestros hijos esta importancia del semáforo? En primer lugar, con nuestro ejemplo diario, respetando siempre las luces y explicándoles cuándo se puede cruzar.

Pero también podemos recurrir a juegos divertidos para fijar estos aprendizajes, como los que podrás encontrar en el material educativo de prevención y seguridad vial que hemos preparado para pequeños y grandes.

Existen diferentes tipos de semáforo según a quién estén indicando el paso, si es a los peatones, de los coches o de los ciclistas.

2.1.12.1. Tipos de semáforos

Semáforo para peatones: tiene dibujado en su interior la silueta de un peatón y tiene 2 colores: verde y rojo; y dos tipos de posiciones: fija e intermitente:

Luz verde fija: en forma de peatón en marcha. Indica a los peatones que pueden comenzar a atravesar la calzada.

Luz roja fija: en forma de peatón inmóvil. Indica a los peatones que no deben cruzar la calzada.

Luz verde intermitente: Significa que el tiempo para que los peatones terminen de atravesar la calzada está a punto de finalizar y que se va a encender la luz roja.

Si la silueta del peatón se enciende de forma intermitente y ya se ha comenzado a cruzar, es necesario darse prisa para llegar a la otra acera lo antes posible. Si todavía no se ha comenzado a cruzar, se debe esperar subidos en la acera hasta que nuevamente la silueta del peatón esté verde de forma fija.

En cruces con semáforo sólo para vehículos, se puede cruzar cuando los vehículos se encuentran detenidos con su semáforo en rojo.

Semáforo para viajeros: regulan el paso de los vehículos a motor como los coches, motocicletas, camiones.

Este tipo de semáforos tienen 3 luces diferentes: verde, amarilla y roja.

Como en el caso de los semáforos de peatones la luz verde indica vía libre para el viajero, la luz roja indica que deben detenerse, y la luz amarilla significa precaución, ya que próximamente se cambiará a rojo.

2.2. Software VISSIM

2.2.1. Definición y características generales

PTV Vissim es un software de micro simulación de tráfico desarrollado por PTV Group, ampliamente utilizado a nivel internacional en proyectos de planificación y gestión del transporte. Su fortaleza radica en la capacidad de modelar comportamientos individuales y altamente realistas de usuarios de la vía, incluyendo:

- Vehículos ligeros y pesados
- Transporte público (autobuses, tranvías, metro)
- Bicicletas
- Peatones

2.3.1.1. Características principales

1. Micro simulación basada en agentes: Cada vehículo/peatón se comporta como un agente independiente siguiendo reglas de interacción.
2. Modelo de seguimiento de vehículos (Car-Following Model): Basado en el modelo psicofísico de Wiedemann (para tráfico urbano y autopistas), que define aceleraciones, desaceleraciones y distancias de seguridad.
3. Modelo de cambio de carril (Lane-Changing Model): Considera urgencia, ventaja, necesidades de giro, tiempo de anticipación, entre otros factores.
4. Integración con controladores de tráfico: Compatible con controladores fijos, actuados Adaptativos (incluido SCOOT, SCATS) y lógica programada en su lenguaje interno (VAP) o Python.

5. Modelado de transporte público: Incluye horarios, paraderos, capacidad, modelos de abordaje y descenso.

6. Entorno 3D: Permite visualizaciones realistas para presentaciones y análisis.

2.2.2. Aplicaciones del software VISSIM en investigación y proyectos

El software se utiliza en una amplia gama de estudios:

1. Análisis de accesos

- Con semáforos pretemporizados
- Semáforos adaptativos
- Accesos giratorios

2. Evaluación de infraestructura

- Diseño de nuevos carriles
- Rampas de acceso
- Zonas escolares y urbanas
- Redes completas de transporte

3. Estudios de movilidad sostenible

- Introducción de ciclovías
- Prioridad para transporte público
- Gestión de peatones

4. Simulación de ITS (Intelligent Transportation Systems)

- Sistemas de transporte autónomo
- Vehículos conectados
- Control adaptativo de tráfico

5. Evaluaciones económicas

- Análisis costo–beneficio de proyectos viales

2.2.3. Pasos a seguir para la simulación en VISSIM

2.2.3.1. Preparación inicial del proyecto

- Abrir PTV VISSIM y crea un nuevo archivo de proyecto: Ve a File > New.
- Configura parámetros globales: En Simulation > Parameters, establece la resolución de simulación (por defecto 10 pasos por segundo), duración total (3600-7200 segundos para cubrir horas pico), y periodo de calentamiento (600 segundos para estabilizar el flujo basado en aforos).
- Importa un fondo de mapa: Ve a Base Data > Background Images > Add Background Image. Usa Google Earth o un mapa CAD de la avenida (basado en coordenadas de las Tablas N°4-9) para escalar la red a 2.38 km. Bloquea el fondo para evitar movimientos accidentales.
- Define composiciones de vehículos: En Base Data > Vehicle Types/Compositions, crea tipos basados en el documento (livianos: automóviles/camionetas; medianos: buses/micros; pesados: camiones). Usa porcentajes de aforos (Tabla N°3 del documento) y velocidades deseadas (basadas en velocidades de punto de Tabla N°25, 20-30 km/h en picos).
- Documenta suposiciones: Incluye límites espaciales (desde rotonda Los Ceibos a Moto Méndez), periodos de estudio (horas pico: 7:00-9:00, 12:00-13:00, 18:00-19:00 de los Gráficos N°1-6), y datos de entrada (aforos depurados de Tabla N°23).

2.2.3.2. Modelado de la red vial

- Dibuja los enlaces principales: Selecciona Network Objects > Links. Mantén presionado Ctrl + clic derecho para dibujar segmentos rectos de la avenida (tramos de 2-3 carriles por dirección, ancho ~3.5-4.2 m por carril basado en cálculos de capacidad). Comienza desde coordenadas de Hotel Los Ceibos (Tabla N°4) y extiende hasta Moto Méndez (Tabla N°8), dividiendo en segmentos lógicos (entre rotondas).
- Agrega carriles y restricciones: En la ventana de propiedades del enlace, establece número de carriles (3-4 por dirección), ancho ajustado por estacionamiento (resta 1.8 m como en cálculos de capacidad del

documento), y prohíbe cambios de carril en secciones sólidas seleccionando No Lane Change.

- Crea conectores para curvas y giros: Para transiciones suaves en la vía urbana, usa Ctrl + clic derecho para conectar enlaces adyacentes. Define puntos intermedios (2-3 por conector) para curvas suaves; elimina marcas de carril si no aplican.
- Modela rotondas como accesos señalizados: Para cada rotonda (Puente San Martín - Tabla N°5; Fuente de los Deseos - Tabla N°6; etc.), dibuja enlaces circulares o usa conectores en forma de anillo. Dado que tienen semáforos, trata como accesos con giros (izquierda/derecha/recto). Agrega áreas de conflicto: Selecciona Network Objects > Conflict Areas y define zonas de prioridad en los puntos de cruce.
- Duplica y rota elementos: Selecciona enlaces/conectores (arrastrando un cuadro rojo), presiona Ctrl + arrastrar izquierdo para duplicar, y Alt + arrastrar izquierdo para rotar (90° o 180° para simetría en accesos). Repite para las 30 accesos agrupadas (Grupos 1-6 del documento).
- Verifica geometría: Usa View > 2D/3D para inspeccionar; ajusta distancias de parada de emergencia en conectores (aumenta para evitar vehículos desaparecidos, basado en longitudes de líneas sólidas).

2.2.3.3. Aplicación de semáforos fijos en rotondas y accesos

- Agrega controladores de señales: Ve a Signal Control > Signal Controllers > Add. Crea un controlador por grupo (Grupo 1 para Accesos 1-3; Grupo 2 para 4-6, etc.). Usa Ring Barrier Controller (RBC) para control fijo.
- Define grupos de señales: En el editor del controlador (Edit Controller Data > Signal Groups > +), agrega grupos por movimiento (NS through, EW through, lefts, rights). Asigna secuencias fijas basadas en mediciones del documento (tiempos fijos, ciclos de 35-60 seg).
- Configura matrices intergreen y programas: En Intergreen Matrices > +, define tiempos intergreen (3-5 seg para evitar conflictos). En Signal

Programs > +, edita timings fijos (verdes, amarillos, rojos) de los semáforos existentes (ciclos medidos en Grupos 1-6).

- Coloca cabezales de señales: Selecciona Signal Heads. Mantén Ctrl + clic derecho en posiciones de línea de parada (en conectores de espera). Asigna al grupo de señales correspondiente (para rotonda Puente San Martín, coloca en entradas/salidas). Repite para todos los accesos/rotondas (30 en total, enfocadas en las críticas como Puente Bicentenario y Bolívar).
- Valida control: Ejecuta una simulación corta para verificar que los semáforos fijos operen sin conflictos (vehículos se detienen en rojo, avanzan en verde). Ajusta detectores si es necesario (aunque para fijos, usa timings preprogramados).

2.2.3.4. Entrada de volúmenes de tráfico y rutas

- Agrega entradas de vehículos: Selecciona Network Objects > Vehicle Inputs > Ctrl + clic derecho en enlaces de entrada (e.g., en extremos de la avenida). Establece volúmenes en veh/h basados en aforos depurados (Tabla N°23, e.g., 900-3000 veh/h en picos; usa distribución Poisson).
- Define rutas: Ve a Vehicle Routes > Ctrl + clic derecho después de una entrada para crear un punto de decisión de ruta. Extiende al destino (e.g., salidas en rotondas), definiendo rutas estáticas para giros (izquierda/derecha/recto) con flujos relativos de aforos (e.g., Tablas N°16-19 para Acceso 1).
- Incorpora velocidades y comportamientos: En Base Data > Driving Behaviors > Urban (motorized), ajusta parámetros (e.g., Wiedemann 74 para arterials; velocidades de punto de Tabla N°25 como base). Agrega distribuciones de velocidad para horas pico.
- Repite para todas direcciones: Cubre flujos en los 30 accesos, priorizando picos vespertinos (Gráficos N°1-6).

2.2.3.5. Corrección de errores y calibración inicial

- Verifica el modelo: Ejecuta simulación (Simulation > Run) y revisa animación (2D/3D) para errores (e.g., superposiciones, colas irreales). Consulta el archivo .err para problemas.
- Calibra con datos del documento: Compara outputs con aforos reales (e.g., GEH <5 para volúmenes; velocidades dentro $\pm 10\%$ de Tabla N°25). Ajusta parámetros de comportamiento (e.g., gaps de car-following) si no coinciden con niveles de servicio (Tablas N°27-28, e.g., C-D en centrales).
- Ejecuta múltiples corridas: Usa semillas aleatorias (mínimo 10-11 corridas) para promedios estocásticos; documenta confianza al 95%.

2.2.3.6. Ejecución de la simulación y evaluación

- Configura evaluaciones: En Evaluation > Configuration, activa Node Results para accesos/rotondas (e.g., demoras, colas), Queue Counters, y Travel Time Segments a lo largo de la avenida.
- Ejecuta la simulación completa: Ve a Simulation > Start; monitorea en 3D para realismo. Simula periodos pico con semáforos fijos para baseline.
- Analiza resultados: Usa Evaluation > Result Lists para comparar con datos del documento (e.g., capacidad y niveles de servicio de Tablas N°26-28). Genera reportes de congestión, emisiones, y tiempos de viaje.
- Guarda y documenta: Exporta videos/animaciones (Presentation > Storyboard > Record Video); crea un informe con hallazgos para comparación futura con semaforización inteligente.
- Impacto de obras temporales

2.3. Semaforización inteligente

La semaforización inteligente se define como un sistema de control de señales de tráfico que reacciona de manera dinámica a las condiciones del entorno en tiempo real, en lugar de operar con ciclos fijos pre programados. Este enfoque innovador combina la investigación en inteligencia artificial con la teoría del tráfico, permitiendo ajustes automáticos basados en datos como el volumen vehicular, la densidad de peatones o

eventos imprevistos, como accidentes o congestiones. A diferencia de los semáforos tradicionales, que siguen patrones estáticos, los inteligentes actúan como "dispositivos que toman decisiones sobre los tiempos de las luces dependiendo de parámetros de entrada como el tráfico", lo que los convierte en herramientas proactivas para la movilidad urbana.

Su evolución se remonta a los años 70 con sistemas adaptativos iniciales, pero ha ganado impulso en la era digital gracias a la IA y el Internet de las Cosas (IoT). Hoy, se integran en los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS), transformando ciudades al mejorar el flujo vehicular y la accesibilidad.

2.3.1. Evolución histórica y tendencias actuales

La semaforización inteligente ha evolucionado desde sistemas adaptativos básicos en los años 70 (como el primer SCOOT en el Reino Unido) hacia ecosistemas integrados con inteligencia artificial (IA) y big data en la década de 2020. Para 2025, las tendencias globales enfatizan la integración con el Internet de las Cosas (IoT) y la conectividad 5G/6G, permitiendo no solo ajustes en tiempo real, sino predicciones preventivas de congestión mediante machine learning (ML). Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2024), en Latinoamérica, esta evolución responde a desafíos como el crecimiento urbano descontrolado, similar a casos en Ecuador y Perú.

Una tendencia clave es el uso de semáforos inductivos con sensores geomagnéticos, que detectan vehículos sin contacto físico, reduciendo costos de mantenimiento en un 25% comparado con bucles tradicionales (BSW Light, 2024). Otro avance es la incorporación de edge computing, donde el procesamiento de datos ocurre localmente en el semáforo, minimizando latencias a menos de 0.5 segundos y habilitando respuestas autónomas a eventos imprevistos, como lluvias intensas o accidentes. En el futuro próximo (2025-2030), se prevé la adopción de quantum computing para optimizar redes complejas de accesos, procesando escenarios multimodales (vehículos, peatones, ciclistas) en tiempo real, según proyecciones de ITS Canadá (2025).

2.3.2. Estudios de casos y evidencias de implementación

Diversos casos ilustran estos beneficios:

- Maringá, Brasil (2024): Implementación de semaforización inteligente integrada con ITS, reduciendo congestión en un 20% en corredores urbanos. Usó sensores IoT y algoritmos SCATS, financiado por GAD local (similar a Tarija), alineado con AASHTO para ondas verdes en redes viales estrechas (BID, 2024).
- Paján, Ecuador (2022-2025): Sistema con cámaras IP y software AxxonSoft optimizó ciclos en accesos críticas (3.388 veh/h pico), bajando accidentes en 93% y congestión en 30%. Presupuesto accesible (16.490 USD), adaptable a Bolivia por similitudes en topografía y normativas viales (Andrade Baque, 2022).
- Lima, Perú (2025): Proyecto con IA para ajustar tiempos basados en flujo real, reduciendo demoras en un 15-25% en avenidas lineales. Integra ML para predicciones, ofreciendo un modelo replicable para Tarija, donde se priorizan buses y peatones (Studocu, 2025).
- Traverse City, Michigan (EE.UU.): Implementación de semaforización inteligente redujo congestión y mejoró la confiabilidad en corredores turísticos, integrando cámaras y lectores Bluetooth.
- Hefei, China: Simulaciones con controles de semaforización inteligente mostraron reducciones notables en demoras comparadas con controles fijos.

Estos casos confirman que los beneficios superan costos, con retornos sociales de hasta US\$31.82 mil millones anuales en ahorros de tiempo y emisiones.

2.3.3. Sistemas utilizados en semaforización inteligente

Varios sistemas propietarios y de código abierto facilitan la semaforización inteligente, cada uno con fortalezas en escalabilidad y adaptabilidad:

- SCOOT (Split Cycle Offset Optimization Technique): Desarrollado en el Reino Unido en 1973 y actualizado en 2025 con IA híbrida, optimiza splits (tiempos

de fase), ciclos y offsets (desfases entre accesos) en tiempo real. Utiliza detectores de volumen para crear ondas verdes, reduciendo congestión en un 12-15% en redes urbanas. Ideal para avenidas lineales como Víctor Paz Estenssoro.

- SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System): australiano, ampliamente usado en Latinoamérica, emplea planes históricos y ajustes en línea para escalar tiempos verdes basados en ocupación de detectores. En São Paulo, su implementación redujo demoras en 20% en corredores de 2024-2025. Soporta hasta 1.000 accesos con bajo ancho de banda.
- InSync: estadounidense, usa cámaras y algoritmos predictivos para ajustes autónomos por Acceso, sin necesidad de control central. En 2025, integra ML para predecir picos basados en eventos (e.g., conciertos), logrando reducciones de delay del 30% en ciudades medianas.
- Surtrac (Surrogate Low-Cost Traffic Signal): De Carnegie Mellon, enfocado en accesos aisladas, usa sensores láser y optimización estocástica para minimizar colas. En pruebas de 2025 en Europa, redujo emisiones en 18%.
- Sistemas de Código Abierto como SUMO (Simulation of Urban MObility): Para prototipado, integra con ROS (Robot Operating System) para simular IA. En Ecuador, prototipos IoT de 2024 usaron ESP32 con SUMO para detección vehicular.

Estos sistemas se seleccionan según el contexto: SCOOT para redes densas, SCATS para presupuestos medios.

2.3.4. Tecnologías avanzadas y algoritmos

Complementando los componentes básicos (sensores, IA y conectividad), las tecnologías avanzadas incluyen:

- Sensores Multimodales y Visión Computacional: Cámaras equipadas con redes neuronales convolucionales (CNN) para reconocimiento de objetos, detectando

no solo vehículos, sino tipos específicos (e.g., buses prioritarios o motocicletas sin casco). En 2025, sensores LiDAR y radares Doppler integrados permiten mediciones 3D de flujo, con precisión superior al 98% en entornos urbanos densos (ILUNION, 2025). Esto supera a los detectores inductivos tradicionales al manejar variables como peatones con discapacidades, activando alertas acústicas o visuales para inclusión.

- **Algoritmos de Optimización Basados en IA:** Modelos de deep learning, como redes LSTM (Long Short-Term Memory), predicen flujos futuros basados en datos históricos y en tiempo real, ajustando ciclos semafóricos para minimizar la relación volumen-capacidad ($V/C > 0.85$ indica saturación, según HCM 2016/2023). Por ejemplo, algoritmos estocásticos en sistemas como Surtrac optimizan fases verdes para reducir colas en un 20-30%, integrando datos de apps de movilidad (e.g., Waze) para crowdsourcing.
- **Integración con Sistemas de Transporte Inteligente (ITS):** En Latinoamérica, se vincula con V2I (Vehicle-to-Infrastructure) para comunicación bidireccional, permitiendo que vehículos conectados reciban alertas de semáforos. El BID (2024) destaca implementaciones en Brasil y Ecuador, donde ITS reduce emisiones al sincronizar "ondas verdes" en corredores como avenidas urbanas, alineado con AASHTO's Transportation Operations Manual (2023), que recomienda estos sistemas para gestión de congestión en vías con pendientes irregulares, comunes en Tarija.

Estos avances requieren datos robustos: volúmenes de 1-10 GB/día por Acceso, procesados con filtros Kalman para eliminar ruido, asegurando privacidad mediante anonimización (GDPR-inspirado en regulaciones globales).

2.3.5. Funcionamiento

El funcionamiento se basa en un ciclo de detección, análisis y ajuste:

1. **Detección:** Sensores capturan datos en tiempo real, como el número de vehículos por carril o la presencia de peatones.

2. **Análisis:** Algoritmos de IA evalúan la demanda (e.g., ratio volumen-capacidad >0.85 indica congestión) y predicen impactos, utilizando teoría del tráfico para modelar flujos.
3. **Ajuste Dinámico:** El sistema modifica la duración de fases: extiende el verde en carriles saturados o prioriza peatones. Por instancia, en accesos viales, se ajusta el semáforo para equilibrar el flujo, reduciendo tiempos de espera innecesarios.

En sistemas avanzados, como los adaptativos, se sincronizan múltiples accesos para crear progresión continua, minimizando paradas. La respuesta es casi instantánea, con latencias inferiores a 1 segundo gracias al edge computing.

2.3.6. Datos necesarios para su funcionamiento

La semaforización inteligente depende de un flujo continuo de datos multifuente para su toma de decisiones, procesados en big data analytics:

- **Datos de tráfico en tiempo real:** Volumen vehicular (veh/h), velocidad promedio (km/h), densidad (veh/km) y ocupación de carriles, capturados por loops inductivos o cámaras (precisión $>95\%$). En Cartagena, sensores analizan carros, motos y peatones en tiempo real.
- **Datos históricos y predictivos:** Patrones pasados (e.g., picos matutinos) de bases de datos GIS, combinados con pronósticos de ML (LSTM networks) para anticipar congestiones basadas en clima o eventos. Requiere al menos 6 meses de datos para entrenamiento.
- **Datos multimodales:** Flujos peatonales/ciclistas (vía contadores infrarrojos), posición de buses/emergencias (GPS) y variables ambientales (temperatura, lluvia) para priorizaciones. Incluye datos de infracciones para multas automáticas.

- Datos de conectividad: Ubicación vehicular vía V2I (5G o DSRC), con privacidad asegurada por anonimización. Volumen típico: 1-10 GB/día por acceso.

El procesamiento usa cloud computing (e.g., AWS IoT) para edge-to-cloud, con algoritmos como Kalman filters para filtrar ruido. En 2025, la integración de datos satelitales mejora la precisión en un 15%.

2.3.7. Componentes principales

Los sistemas de semaforización inteligente se componen de elementos hardware y software interconectados:

- Sensores y detectores: Incluyen bucles inductivos en el pavimento, cámaras de visión computacional y radares para medir el flujo vehicular en tiempo real. Por ejemplo, sensores de frecuencia de radio (RFID) o cámaras equipadas con reconocimiento facial detectan infracciones específicas, como motoristas sin casco.
- Inteligencia artificial y algoritmos: La IA procesa datos para predecir y ajustar ciclos. Modelos de machine learning, como redes neuronales, analizan variaciones del tránsito y optimizan fases (verde, amarillo, rojo).
- Conectividad y control central: Plataformas IoT permiten la comunicación entre semáforos (V2I: vehicle-to-infrastructure), sincronizando "ondas verdes" para un flujo continuo. Incluye software de gestión en tiempo real que integra datos de GPS vehicular o apps de movilidad.
- Interfaces usuarios: Pantallas LED para peatones o ciclistas, y alertas acústicas para accesibilidad inclusiva.

Estos componentes forman un ecosistema que mide con precisión parámetros como la ocupación de carriles o la velocidad promedio.

2.3.8. Aplicación de tecnología para el funcionamiento

La semaforización inteligente, también conocida como Sistemas de Control de Tráfico Adaptativo (ATCS por sus siglas en inglés), va más allá de los semáforos fijos pre programados. Utiliza tecnologías en tiempo real para ajustar dinámicamente los ciclos semafóricos (verde, amarillo, rojo) según la demanda vehicular, priorizando flujos altos y minimizando demoras.

En este caso para la ciudad de Tarija se tuvo en cuenta la implementación que está al alcance nuestro como lo es:

- Sensores y detectores: Cámaras CCTV, bucles inductivos en pavimento (detectan vehículos a 50-100 m), radares Doppler o sensores infrarrojos para conteo en tiempo real. Como se mencionó anteriormente en Tarija, se podría recomendar sensores inalámbricos (IoT) resistentes a polvo y fluctuaciones eléctricas.

2.3.8.1. ¿Qué son los radares Doppler?

Los radares Doppler en tráfico son sistemas que utilizan el efecto Doppler para medir la velocidad de los vehículos en una carretera. Emiten una señal de microondas, y al reflejarse en un vehículo en movimiento, la frecuencia de la señal de retorno cambia. Comparando la frecuencia original con la recibida, el radar puede calcular con precisión la velocidad del vehículo, tanto si se acerca como si se aleja.

2.3.8.2. ¿Cómo funcionan?

- Emisión de señal: El radar emite pulsos de energía de microondas.
- Reflexión en el vehículo: Estas ondas rebotan en el vehículo que se mueve.
- Cambio de frecuencia: La frecuencia de la señal reflejada cambia dependiendo de si el vehículo se acerca o se aleja del radar.
 - Se acerca: La frecuencia de la señal de retorno aumenta (desplazamiento hacia el azul en el espectro).

- Se aleja: La frecuencia de la señal de retorno disminuye (desplazamiento hacia el rojo en el espectro).
- Cálculo de velocidad: El dispositivo calcula la velocidad del vehículo analizando este cambio en la frecuencia de la señal reflejada.

2.3.8.3. Aplicaciones en tráfico

- Control de velocidad: Son la base de los radares de velocidad para hacer cumplir los límites de velocidad y mejorar la seguridad vial.
- Detección de movimiento: Permiten detectar el movimiento y la velocidad de los objetos en la carretera.
- Funcionamiento 24/7: A pesar de que algunos radares más antiguos usaban flash, los más modernos utilizan tecnología infrarroja para operar de noche sin flash.

Figura N° 7. Radar Doppler.



Fuente: Google

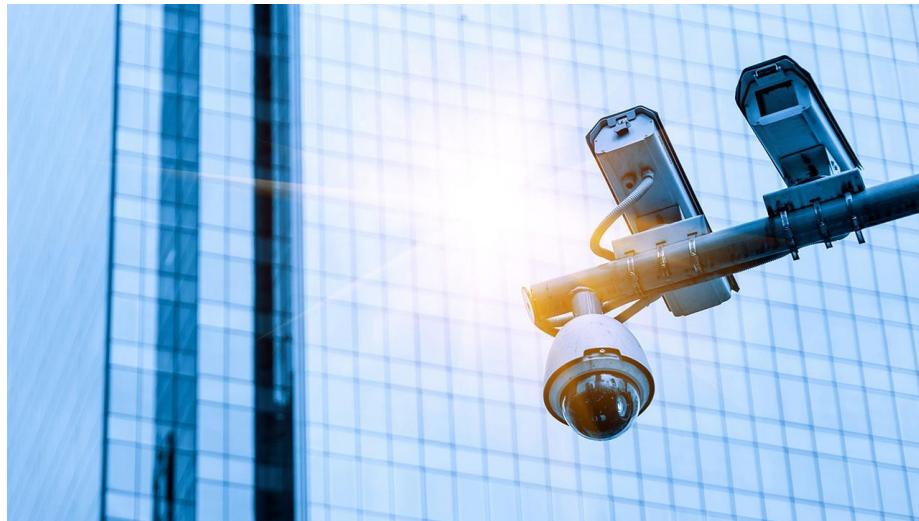
2.3.9. ¿Qué son los sensores inalámbricos IoT?

Los sensores inalámbricos (IoT) en tráfico son dispositivos electrónicos que se instalan en carreteras y vehículos para recopilar datos en tiempo real sobre el flujo de tráfico, la velocidad y la congestión. Estos sensores envían la información de forma inalámbrica a un sistema central para su análisis, lo que permite mejorar la gestión del tráfico, la seguridad vial y la planificación de rutas eficientes.

2.3.9.1. Características y funcionalidades

- **Recopilación de datos:** Miden y recogen información como el recuento de vehículos, la velocidad, el flujo y los niveles de congestión.
- **Transmisión inalámbrica:** Envían los datos a una plataforma central a través de redes inalámbricas, a menudo utilizando poca energía y con una vida útil de la batería prolongada.
- **Análisis en tiempo real:** La información recopilada se analiza para tomar decisiones informadas de forma inmediata.
- **Aplicaciones:** Se utilizan para optimizar los semáforos, guiar a los vehículos de emergencia por rutas despejadas y gestionar flotas de manera más segura y eficiente.
- **Mejora de la seguridad:** Permiten un acceso prioritario a vehículos de emergencia y proporcionan datos para el mantenimiento predictivo en flotas.
- **Beneficios ambientales:** Reducir la congestión del tráfico puede llevar a menores emisiones de carbono.

Figura N° 8. Sensor inalámbrico IoT.



Fuente: Google

2.3.10. Funcionamiento de la semaforización inteligente vs. tradicionales

Los semáforos tradicionales operan con ciclos fijos o actuados (que responden a presencia vehicular pero no a patrones globales), lo que resulta ineficiente en escenarios variables. En contraste, la semaforización inteligente sigue un ciclo iterativo: recolección de datos cada poco minuto, evaluación mediante algoritmos y ajuste de tiempos. Por ejemplo, en un acceso congestionado, el sistema extiende el verde en la dirección principal mientras acorta en las secundarias.

Esta adaptabilidad se basa en métricas como el nivel de servicio, que clasifica el tráfico de A (fluido) a F (congestión extrema), mejorando el nivel de servicio al redistribuir equitativamente el tiempo verde. Estudios muestran que estos sistemas pueden reducir el tiempo de viaje en un 10% o más, comparado con controles fijos.

2.3.11. Contribución a la reducción del congestionamiento y otros problemas

La semaforización inteligente aborda múltiples problemas del tráfico:

- Reducción de congestión: Al optimizar el flujo, disminuye las colas y los retrasos. En estudios, se observa una reducción del 11% en tiempos de viaje

durante horas pico y 8% en horas valle, lo que en ciudades chinas equivale a una disminución anual de 31.73 millones de toneladas de CO₂.

- Mejora en la eficiencia y tiempos de viaje: Aumenta el rendimiento vehicular en un 6.9% y reduce demoras en 2.4 segundos por vehículo en implementaciones.
- Reducción de emisiones y consumo de combustible: Menos paradas y arranques equivalen a menores emisiones; evaluaciones en EE.UU. indican reducciones significativas en consumo de combustible y contaminantes.
- Mejora en la seguridad: Disminuye conflictos vehiculares en un 43% a altos niveles de penetración, reduciendo accidentes fatales en un 5-13% proyectado para 2025-2035.
- Otros beneficios: Mayor confiabilidad en viajes, menor estrés y soporte a eventos imprevistos, contribuyendo a la sostenibilidad urbana.

2.3.12. Beneficios e impactos

Ampliando los beneficios mencionados, evidencias cuantitativas de 2024-2025 confirman impactos significativos:

- Reducción de Congestión y Tiempos de Viaje: En Hefei (China), simulaciones con IA mostraron una disminución del 11% en demoras pico y 8% en valle, equivalente a ahorros anuales de 31.73 millones de toneladas de CO₂ (Pasajero7, 2025). En contextos latinoamericanos, como Paján (Ecuador), se reporta una reducción del 93% en congestión post-implementación, con ciclos ajustados de 2.8-3 seg/fase (Andrade Baque, 2022, actualizado 2025).
- Mejora en Seguridad y Sostenibilidad: AASHTO (2023) indica que sistemas adaptativos reducen accidentes en un 25-43% al priorizar vulnerables, mientras que el BID (2024) estima una baja del 10-20% en emisiones en ciudades como Maringá (Brasil), promoviendo movilidad sostenible. En Tarija, esto alinearía con el Manual de Diseño de Calles Bolivianas, minimizando fases conflictivas en accesos densas.
- Eficiencia Económica y Social: Costos iniciales (16.490 USD por acceso, según Ecuador) se recuperan en 2-3 años vía ahorros en combustible (10-15%) y

productividad (menos estrés vial). Inclusividad: Semáforos con reconocimiento facial mejoran accesibilidad para discapacitados, reduciendo inequidades urbanas en un 15% (ILUNION, 2025).

- Eficiencia en Transporte Público: Prioriza buses o emergencias, mejorando la regularidad y accesibilidad.
- Accesibilidad Inclusiva: Innovaciones como semáforos con reconocimiento facial o alertas para discapacitados fomentan la equidad urbana.

Estos beneficios se miden mediante métricas HCM, como Nivel de Servicio (LOS), elevando de D/E (congestionado) a B/C (estable) en avenidas como Víctor Paz Estenssoro

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE LA

INFORMACIÓN

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. Ubicación del proyecto

El proyecto se localiza en el departamento de Tarija, provincia Cercado, dentro del área urbana de la ciudad de Tarija, el tramo de estudio corresponde a la Avenida Víctor Paz Estenssoro, comprendido entre la rotonda Los Ceibos y la rotonda Moto Méndez, con una longitud aproximada de 2,38 km, constituyendo un eje vial de importancia urbana que articula flujos vehiculares locales y de conexión interurbana.

3.1.1. Ubicación de los accesos

De acuerdo con los lineamientos de la norma AASHTO, el punto de aforo vehicular en accesos semaforizados debe ubicarse en la línea de detención o inmediatamente antes de esta, con el fin de reflejar de manera precisa la demanda real de tránsito. Esta ubicación permite registrar el flujo vehicular bajo condiciones controladas por el sistema semafórico, considerando todos los movimientos vehiculares giro a la izquierda, movimiento directo y giro a la derecha.

En concordancia con lo anterior, se presenta la ubicación de cada acceso por rotonda, detallando sus coordenadas UTM y coordenadas geográficas, lo que permite una correcta identificación espacial del área de estudio

Tabla N° 3. Coordenadas inmediaciones hotel Los Ceibos.

	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
Acceso N° 1	Este	319744,11 m E	Latitud	21°31'53,04"S
	Norte	7618034,09 m S	Longitud	64°44'25,64"O
Acceso N° 2	Este	319726,64 m E	Latitud	21°31'52,82"S
	Norte	7618040,73 m S	Longitud	64°44'26,24"O
Acceso N° 3	Este	319722,24 m E	Latitud	21°31'53,73"S
	Norte	7618012,64 m S	Longitud	64°44'26,41"O

Fuente: Google Earth

Figura N° 9. Accesos hotel los Ceibos.

Fuente: Google Earth

A partir de ello se continuo a lo largo de la avenida Víctor Paz Estenssoro donde se tiene las siguientes rotondas y accesos:

Tabla N° 4. Coordenadas acceso rotonda puente San Martin.

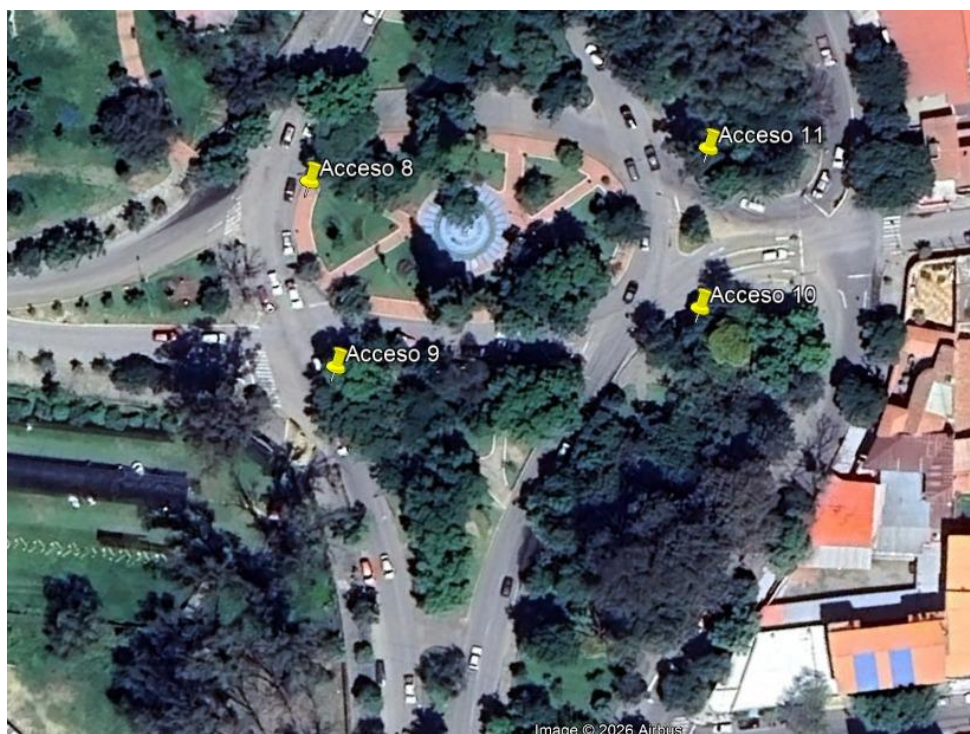
	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
Acceso N° 4	Este	319710,99 m E	Latitud	21°31'55,97"S
	Norte	7617943,52 m S	Longitud	64°44'26,83"O
Acceso N° 5	Este	319784,33 m E	Latitud	21°31'57,39"S
	Norte	7617900,78 m S	Longitud	64°44'24,29"O
Acceso N° 6	Este	319781,80 m E	Latitud	21°31'58,46"S
	Norte	7617867,86 m S	Longitud	64°44'24,39"O
Acceso N° 7	Este	319736,02 m E	Latitud	21°31'58,35"S
	Norte	7617870,56 m S	Longitud	64°44'25,98"O

Fuente: Google Earth

Figura N° 10. Accesos rotonda Puente San Martin.**Fuente:** Google Earth**Tabla N° 5.** Accesos rotonda Fuente de los Deseos.

	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
Acceso N° 8	Este	320262,23 m E	Latitud	21°32'16,08"S
	Norte	7617331,00 m S	Longitud	64°44'7,91"O
Acceso N° 9	Este	320295,80 m E	Latitud	21°32'16,42"S
	Norte	7617320,91 m S	Longitud	64°44'6,75"O
Acceso N° 10	Este	320319,14 m E	Latitud	21°32'14,87"S
	Norte	7617368,96 m S	Longitud	64°44'5,92"O
Acceso N° 11	Este	320284,54 m E	Latitud	21°32'14,03"S
	Norte	7617394,45 m S	Longitud	64°44'7,11"O

Fuente: Google Earth

Figura N° 11. Accesos rotonda Fuentes de los Deseos.

Fuente: Google Earth

Tabla N° 6. Accesos de la rotonda Puente Bolívar.

	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
Acceso N° 12	Este	321133.98 m E	Latitud	21°32'28,40"S
	Norte	7616961.88 m S	Longitud	64°43'37,76"O
Acceso N° 13	Este	321146.97 m E	Latitud	21°32'25,62"S
	Norte	7617047.33 m S	Longitud	64°43'37,27"O
Acceso N° 14	Este	321151.85 m E	Latitud	21°32'26,59"S
	Norte	7617017.78 m S	Longitud	64°43'37,11"O
Acceso N° 15	Este	321126.87 m E	Latitud	21°32'26,46"S
	Norte	7617021.42 m S	Longitud	64°43'37,98"O
Acceso N° 16	Este	321102.86 m E	Latitud	21°32'27,96"S
	Norte	7616974.89 m S	Longitud	64°43'38,83"O
Acceso N° 17	Este	321113.17 m E	Latitud	21°32'25,74"S
	Norte	7617043.27 m S	Longitud	64°43'38,45"O
Acceso N° 18	Este	321164.30 m E	Latitud	21°32'27,59"S
	Norte	7616987.01 m S	Longitud	64°43'36,69"O
Acceso N° 19	Este	321167.56 m E	Latitud	21°32'25,79"S
	Norte	7617042.54 m S	Longitud	64°43'36,56"O

Fuente: Google Earth

Figura N° 12. Accesos rotonda Puente Bolívar.

Fuente: Google Earth

Tabla N° 7. Accesos rotonda Moto Méndez UAJMS.

	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
Acceso N° 20	Este	321646,85 m E	Latitud	21°32'31,44"S
	Norte	7616873,98 m S	Longitud	64°43'19,97"O
Acceso N° 21	Este	321677,98 m E	Latitud	21°32'29,82"S
	Norte	7616924,16 m S	Longitud	64°43'18,87"O
Acceso N° 22	Este	321692,08 m E	Latitud	21°32'30,72"S
	Norte	7616896,68 m S	Longitud	64°43'18,39"O
Acceso N° 23	Este	321699,97 m E	Latitud	21°32'30,01"S
	Norte	7616918,59 m S	Longitud	64°43'18,11"O
Acceso N° 24	Este	321654,31 m E	Latitud	21°32'30,93"S
	Norte	7616889,89 m S	Longitud	64°43'19,70"O
Acceso N° 25	Este	321671,83 m E	Latitud	21°32'31,66"S
	Norte	7616867,43 m S	Longitud	64°43'19,10"O
Acceso N° 26	Este	321647,99 m E	Latitud	21°32'29,97"S
	Norte	7616919,10 m S	Longitud	64°43'19,91"O

Fuente: Google Earth

Figura N° 13. Accesos rotonda Moto Méndez UAJMS.



Fuente: Google Earth

Tabla N° 8. Accesos salida puente 4 de Julio.

	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
Acceso N° 27	Este:	319821.09 m E	Latitud:	21°32'2.19"S
	Norte:	7617753.48 m S	Longitud:	64°44'23.07"O
Acceso N° 28	Este:	319850.47 m E	Latitud:	21°32'3.17"S
	Norte:	7617723.52 m S	Longitud:	64°44'22.06"O
Acceso N° 29	Este:	319859.61 m E	Latitud:	21°32'2.44"S
	Norte:	7617746.14 m S	Longitud:	64°44'21.74"O
Acceso N° 30	Este:	319875.50 m E	Latitud:	21°32'2.17"S
	Norte:	7617754.77 m S	Longitud:	64°44'21.18"O

Fuente: Google Earth

Figura N° 14. Accesos salida puente 4 de Julio.



Fuente: Google Earth

3.1. Planificación y ejecución del relevamiento de campo

El trabajo se realizó en equipo dada la complejidad de los accesos o rotondas, y la gran envergadura de la misma. Por lo que se requirió de organización previa y establecer códigos de trabajo y realizar la recolección de datos de manera prolija y ordenada.

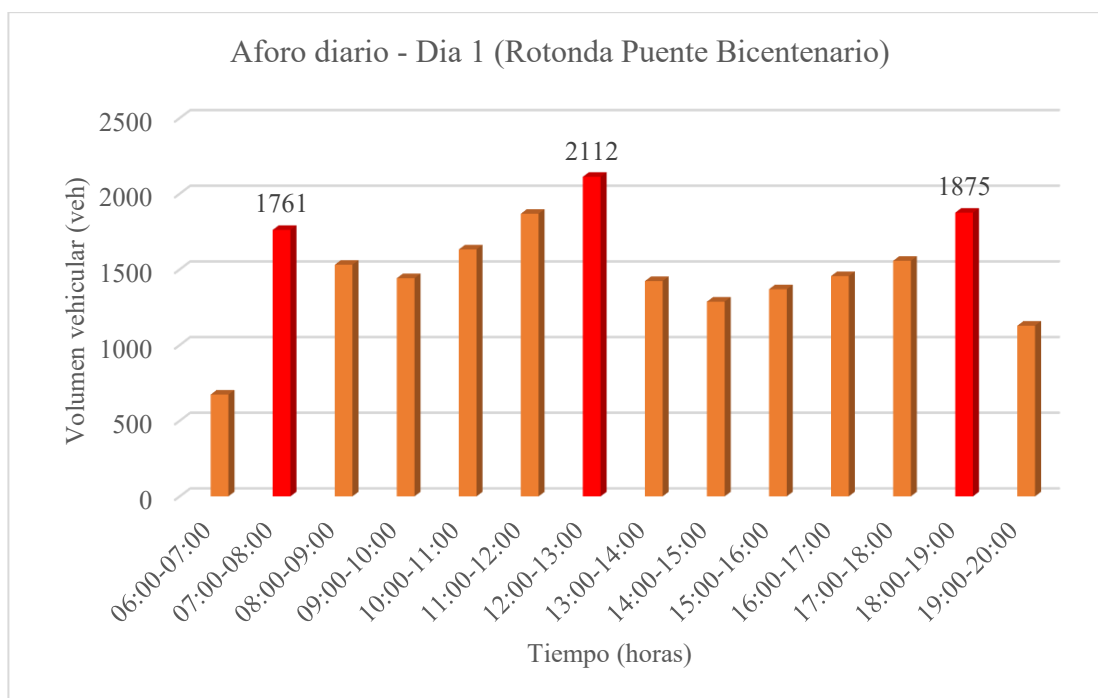
3.1.2. Aforo vehicular para la determinación de la hora pico

Según la norma AASTHO, el mínimo de aforo vehicular para horas pico es de 24 horas y recomendable si son 48 horas o 2 días que tengan gran afluencia vehicular en la acceso o rotonda, para capturar patrones diarios básicos, donde lo mejor es evitar días atípicos como festivos, eventos o clima extremo para obtener datos representativos, de tal manera que se tomó en cuenta la rotonda Puente Bicentenario de la Av. Víctor Paz Estenssoro, en 2 días consecutivos donde se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla N° 9. Aforo vehicular hora pico rotonda puente Bicentenario (Dia 1).

Rotonda Puente Bicentenario – Dia 1	
Hora	Aforo vehicular
06:00-07:00	673
07:00-08:00	1761
08:00-09:00	1531
09:00-10:00	1442
10:00-11:00	1632
11:00-12:00	1868
12:00-13:00	2112
13:00-14:00	1423
14:00-15:00	1287
15:00-16:00	1369
16:00-17:00	1456
17:00-18:00	1557
18:00-19:00	1875
19:00-20:00	1128

Fuente: Elaboración propia

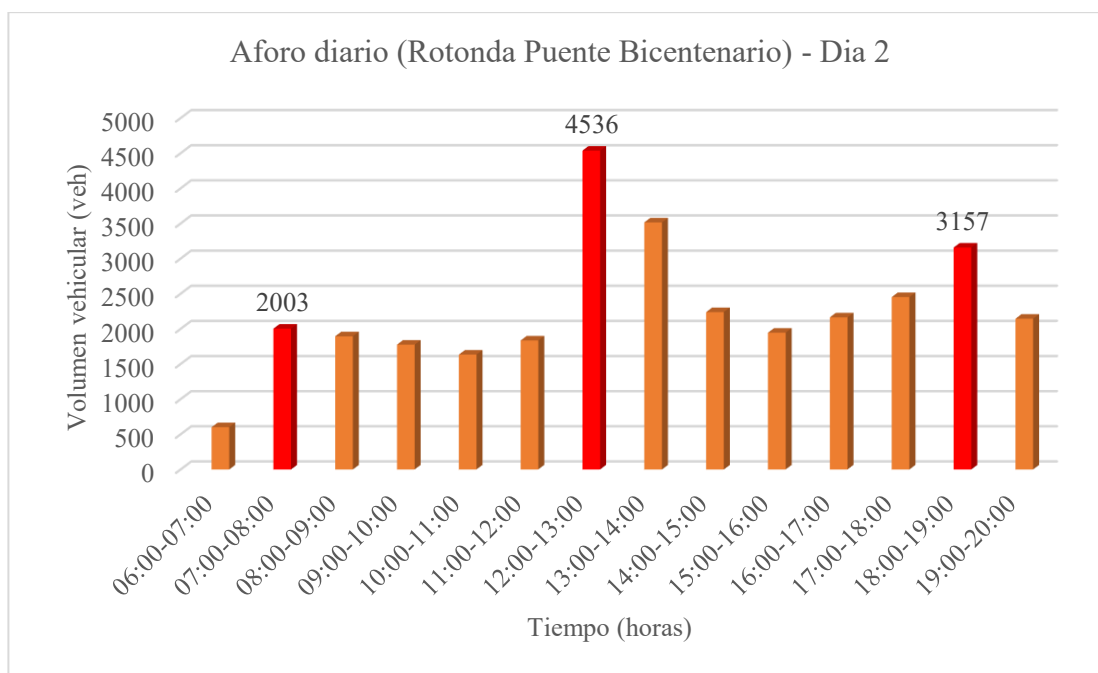
Gráfico N° 2. Horas pico rotonda puente Bicentenario (Dia 1).

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 10. Aforo vehicular hora pico rotonda puente Bicentenario (Dia 2).

Rotonda Puente Bicentenario – Dia 2	
Hora	Aforo vehicular
06:00-07:00	601
07:00-08:00	2003
08:00-09:00	1894
09:00-10:00	1775
10:00-11:00	1634
11:00-12:00	1835
12:00-13:00	4536
13:00-14:00	3515
14:00-15:00	2239
15:00-16:00	1946
16:00-17:00	2164
17:00-18:00	2453
18:00-19:00	3157
19:00-20:00	2145

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3. Horas pico rotonda puente Bicentenario (Dia 2).

Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Aforo vehicular

El aforo de volúmenes de tráfico se realizó a través de la metodología AASHTO, con el objetivo de conocer las horas de máxima demanda es decir las horas pico, el aforo de volumen de tráfico vehicular se realiza en estas horas pico donde se espera que los datos sean los más críticos del día.

Para el aforo de volumen se utilizó el recuento manual, estos datos obtenidos que se refieren a la cantidad de vehículos que circulan en la hora pico, actualmente se realiza para proyectos específicos de corta duración.

Los aforos de volúmenes se realizaron en las 3 horas pico del día durante 4 semanas, 4 veces a la semana, 3 días hábiles y 1 no hábil, se clasifico los vehículos en livianos, medianos y pesado estos a su vez se subdividieron en público y privado tomando en cuenta las maniobras que realiza si su recorrido era de frente o procedía a realizar un giro derecho o izquierdo.

El procedimiento se realizó en los meses de Julio, Agosto Septiembre y Octubre, y la cantidad de accesos en estudio son en un total de 30.

Los instrumentos que se usaron para obtener estos datos fueron:

- Planilla de aforo para registrar todos los datos de campo
- Cámara fotográfica para plasmar en el proyecto las características del área en estudio
- Computadora para procesar todos los datos recopilados en campo.

De tal manera se muestra los aforos mensuales del acceso 1 en la siguiente tabla:

Tabla N° 11. Volúmenes medios mensuales Acceso 1 - lunes.

Volúmenes de tráfico medios mensuales lunes - Semana 1						
	Servicio	Tipo	Circulación	7:00 - 8:00	12:00 - 13:00	18:00 - 19:00
Acceso 1 (Bajada del campesino frente al edificio)	Publico	Liviano	Frente	443	196	422
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Mediano	Frente	60	49	53
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Pesado	Frente	0	0	0
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
Acceso 1 (Bajada del campesino frente al edificio)	Privado	Liviano	Frente	465	481	473
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Mediano	Frente	16	23	20
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Pesado	Frente	8	8	7
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 12. Volúmenes medios mensuales Acceso 1 – miércoles.

Volúmenes de tráfico medios mensuales miércoles - Semana 1						
	Servicio	Tipo	Circulación	7:00 - 8:00	12:00 - 13:00	18:00 - 19:00
Acceso 1 (Subida al campesino frente al hotel los Ceibos)	Publico	Liviano	Frente	460	213	439
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Mediano	Frente	77	66	70
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Pesado	Frente	0	0	0
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
Acceso 1 (Subida al campesino frente al hotel los Ceibos)	Privado	Liviano	Frente	482	498	490
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Mediano	Frente	33	40	37
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Pesado	Frente	25	25	24
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0

Fuente: Elaboración propia**Tabla N° 13.** Volúmenes medios mensuales Acceso 1 – viernes.

Volúmenes de tráfico medios mensuales viernes - Semana 1						
	Servicio	Tipo	Circulación	7:00 - 8:00	12:00 - 13:00	18:00 - 19:00
Acceso 1 (Subida al campesino frente al hotel los Ceibos)	Publico	Liviano	Frente	437	190	416
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Mediano	Frente	54	43	47
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Pesado	Frente	0	0	0
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
Acceso 1 (Subida al campesino frente al hotel los Ceibos)	Privado	Liviano	Frente	459	475	467
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Mediano	Frente	10	17	14
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Pesado	Frente	2	2	1
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 14. Volúmenes medios mensuales Acceso 1 – sábado.

Volúmenes de tráfico medios mensuales sábado - Semana 1						
	Servicio	Tipo	Circulación	7:00 - 8:00	12:00 - 13:00	18:00 - 19:00
Acceso 1 (Subida al campesino frente al hotel los Ceibos)	Publico	Liviano	Frente	486	239	465
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Mediano	Frente	103	92	96
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Pesado	Frente	0	0	0
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
Acceso 1 (Subida al campesino frente al hotel los Ceibos)	Privado	Liviano	Frente	508	524	516
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Mediano	Frente	59	66	63
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0
		Pesado	Frente	51	51	50
			Giro derecho	0	0	0
			Giro izquierdo	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Los aforos realizados en los demás accesos se encuentran en el Anexo 2.

El resumen de aforo del punto 1 muestra la cantidad de vehículos que circulan en la Avenida Víctor Paz Estenssoro, exactamente en la puerta del Hotel Los Ceibos con dirección hacia el Mercado Campesino, en 3 horas pico, los días hábiles lunes, miércoles, viernes y el día no hábil sábado, los cuales en total son 16 días de aforo ya que se consideró aforar por 4 semanas.

De tal manera se tiene el resumen de aforo del acceso 1 de la siguiente manera:

Tabla N° 15. Resumen volúmenes Acceso 1.

Acceso 1		Hora pico		
Semanas	Días	08:00 - 09:00	12:00 - 13:00	18:00 - 19:00
Primera	Lunes	992	757	975
	Miércoles	1077	842	1060
	Viernes	962	727	945
	Sábado	1207	972	1190
Segunda	Lunes	1012	735	963
	Miércoles	1097	820	1048
	Viernes	982	705	933
	Sábado	1227	950	1178
Tercera	Lunes	1009	770	840
	Miércoles	1094	855	925
	Viernes	979	740	810
	Sábado	1224	985	1055
Cuarta	Lunes	865	655	863
	Miércoles	900	690	898
	Viernes	840	630	838
	Sábado	935	725	933

Fuente: Elaboración propia

El mismo procedimiento se realizó en los 30 accesos donde se tiene el siguiente resumen total:

Tabla N° 16. Resumen aforo vehicular mensual.

Resumen aforo vehicular (Veh/Hr)	
Accesos	Aforo vehicular (Veh/Hr)
Acceso 1	913
Acceso 2	3119
Acceso 3	4438
Acceso 4	2598
Acceso 5	1800
Acceso 6	1075
Acceso 7	2199
Acceso 8	2369
Acceso 9	2405

Resumen aforo vehicular (Veh/Hr)	
Accesos	Aforo vehicular (Veh/Hr)
Acceso 10	1446
Acceso 11	2836
Acceso 12	1871
Acceso 13	403
Acceso 14	1421
Acceso 15	1406
Acceso 16	1562
Acceso 17	389
Acceso 18	2018
Acceso 19	1235
Acceso 20	2243
Acceso 21	1730
Acceso 22	1207
Acceso 23	252
Acceso 24	329
Acceso 25	583
Acceso 26	1896
Acceso 27	2714
Acceso 28	491
Acceso 29	1699
Acceso 30	1572

Fuente: Elaboración propia

3.1.4. Depuración de volúmenes

El proceso de datos finales de las 4 semanas de aforo de volúmenes para calcular el TPH de los 30 puntos en estudio se realizó según la norma AASTHO, los mismos que serán evaluados estadísticamente para reducir el error en la misma.

Se realiza la depuración de datos después de tener los datos de volumen vehicular, obteniendo la media aritmética, desviación estándar para proceder a la depuración de datos dispersos.

- Media aritmética:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

Donde:

$\bar{x}$ = Media aritmética

x = Valor de observación

N = Numero de datos

- **Desviación estándar:**

La desviación estándar nos ayudara a ver qué tan dispersos están nuestros datos de aforos obtenidos, para identificar los valores que salgan del rango permitido.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

Donde:

S = Desviación estándar

X_i = Valor de observación

$\bar{x}$ = Media aritmética

N = Numero de datos

Se tomo en cuenta como límite superior la siguiente expresión

$$s + \bar{x}$$

Como límite inferior se tomó la siguiente expresión

$$s - \bar{x}$$

Los datos que se encuentren fuera de nuestros límites establecidos serán depurados y se obtendrá un volumen final del acceso con los datos que se encuentren dentro de nuestro rango calculado para obtener finalmente datos más confiables:

Tabla N° 17. Depuración de datos Acceso 1.

Acceso 1		Hora pico		
Semanas	Días	08:00 - 09:00	12:00 - 13:00	18:00 - 19:00
Primera	Lunes	992	757	975
	Miércoles	1077	842	1060
	Viernes	962	727	945
	Sábado	1207	972	1190
Segunda	Lunes	1012	735	963
	Miércoles	1097	820	1048
	Viernes	982	705	933
	Sábado	1227	950	1178
Tercera	Lunes	1009	770	840
	Miércoles	1094	855	925
	Viernes	979	740	810
	Sábado	1224	985	1055
Cuarta	Lunes	865	655	863
	Miércoles	900	690	898
	Viernes	840	630	838
	Sábado	935	725	933
Media		1025	785	966
Desviación		121	110	114
Rango		1146	894	1080
		904	675	852
Media		1014	760	963
Media Total		913		

Fuente: Elaboración propia

- **Resultados finales de depuración de datos:**

Tabla N° 18. Resumen de depuración de datos.

Resumen aforo vehicular (Veh/Hr)	
Acceso	Aforo vehicular (Veh/Hr)
Acceso 1	913
Acceso 2	3119
Acceso 3	4438
Acceso 4	2598
Acceso 5	1800
Acceso 6	1075
Acceso 7	2199
Acceso 8	2369
Acceso 9	2405
Acceso 10	1446
Acceso 11	2836
Acceso 12	1871
Acceso 13	403
Acceso 14	1421
Acceso 15	1406
Acceso 16	1562
Acceso 17	389
Acceso 18	2018
Acceso 19	1235
Acceso 20	2243
Acceso 21	1730
Acceso 22	1207
Acceso 23	252
Acceso 24	329
Acceso 25	583
Acceso 26	1896
Acceso 27	2714
Acceso 28	491
Acceso 29	1699
Acceso 30	1572

Fuente: Elaboración propia

3.1.5. Aforos de velocidad de punto

La velocidad vehicular se determinó conforme a los criterios de la AASHTO, midiendo el tiempo de recorrido de los vehículos en un tramo en dirección del flujo del acceso

semaforizada, durante la fase verde y bajo condiciones de flujo continuo, permitiendo caracterizar el comportamiento real del tránsito influenciado por el control semafórico.

Paso 1. Selección del tramo de medición

Se selecciona un tramo en dirección del flujo del acceso semaforizada, donde los vehículos ya han superado la línea de detención y circulan de manera estable. El tramo debe ser recto, con buena visibilidad y libre de accesos o interferencias adicionales.

Paso 2. Definición de la distancia de control

Se estableció una distancia fija de 25 m, adecuada para permitir que los vehículos alcancen una velocidad uniforme después de la fase verde. La distancia se marca claramente mediante referencias visibles en campo.

Paso 3. Identificación de la fase semafórica

La medición se realiza exclusivamente durante la fase verde, descartando vehículos que parten desde reposo en el inicio del verde o que se ven obligados a frenar por el cambio de señal. Se consideran únicamente vehículos que circulan en flujo continuo.

Paso 4. Selección de la muestra vehicular

Se registra una muestra representativa de vehículos que no estén condicionados por colas, giros conflictivos o maniobras de adelantamiento. Se excluyen vehículos pesados.

Paso 5. Medición del tiempo

Mediante un cronómetro, se mide el tiempo que tarda cada vehículo en recorrer la distancia definida, iniciando el conteo al pasar por el primer punto de referencia y deteniéndolo al cruzar el segundo punto.

Paso 6. Cálculo de la velocidad

La velocidad se calcula aplicando la expresión:

$$Velocidad \left(\frac{km}{hr} \right) = \frac{Distancia (km)}{Tiempo (horas)}$$

Paso 7. Procesamiento de datos

Con los valores obtenidos se elabora la distribución de velocidades y se determina la velocidad promedio empleada por AASHTO, para mejor análisis se realiza un promedio de velocidades por semana, para tener el promedio de 4 semanas por punto.

El estudio de los 30 accesos se presenta en el anexo 4.

Tabla N° 19. Depuración de datos velocidad de punto Acceso 1.

Acceso 1		Velocidad de punto	
Semanas	Distancia (metros)	Tiempo (segundos)	Velocidad (Km/hr)
Primera	25	4,15	21,69
		4,02	22,39
		3,77	23,87
		3,98	22,61
		3,99	22,56
Segunda	25	4,40	20,45
		4,85	18,56
		4,89	18,40
		4,66	19,31
		4,73	19,03
Tercera	25	4,79	18,79
		4,86	18,52
		4,97	18,11
		4,32	20,83
		3,86	23,32
Cuarta	25	4,17	21,58
		4,14	21,74
		4,30	20,93
		4,52	19,91
		4,60	19,57
		Media	20,61
		Desviación	1,80
		Rango	22,40
			18,81

Fuente: Elaboración propia

Se tiene una tabla resumen de estos datos de velocidad de punto de todos los accesos:

Tabla N° 20. Resumen de resultados de velocidad de punto.

Velocidad Promedio Total					
Accesos	Velocidad (Km/hr)				
	1° Semana	2° Semana	3° Semana	4° Semana	Promedio
Acceso 1	22,62	19,15	19,91	20,75	20,61
Acceso 2	20,13	18,33	18,70	17,72	18,72
Acceso 3	14,01	12,82	13,71	12,93	13,37
Acceso 4	15,35	13,68	15,33	14,13	14,62
Acceso 5	21,23	18,60	20,18	21,91	20,48
Acceso 6	21,13	18,15	18,06	17,34	18,67
Acceso 7	13,50	12,28	13,05	12,67	12,88
Acceso 8	14,82	13,37	14,49	13,02	13,93
Acceso 9	20,01	18,07	20,46	23,21	20,44
Acceso 10	22,24	17,96	17,46	16,98	18,66
Acceso 11	13,03	11,78	12,46	12,43	12,42
Acceso 12	14,32	13,08	13,73	12,08	13,30
Acceso 13	18,91	17,58	20,75	24,68	20,48
Acceso 14	23,48	17,79	16,90	16,64	18,70
Acceso 15	12,59	11,32	11,91	12,19	12,00
Acceso 16	13,86	12,80	13,05	11,26	12,74
Acceso 17	17,93	17,11	21,04	22,57	19,66
Acceso 18	24,86	17,61	16,37	16,30	18,79
Acceso 19	12,18	10,89	11,41	11,97	11,61
Acceso 20	13,42	12,53	12,44	10,55	12,23
Acceso 21	18,45	17,89	19,82	21,96	19,53
Acceso 22	23,85	18,00	16,52	16,73	18,78
Acceso 23	12,72	11,22	11,77	12,23	11,98
Acceso 24	13,71	12,73	12,87	10,81	12,53
Acceso 25	18,99	18,75	18,74	21,39	19,47
Acceso 26	22,93	18,41	16,68	17,18	18,80
Acceso 27	13,30	11,57	12,15	12,50	12,38
Acceso 28	14,01	12,93	13,33	11,09	12,84
Acceso 29	19,57	19,70	17,77	20,84	19,47
Acceso 30	22,08	18,83	16,83	17,65	18,85

Fuente: Elaboración propia

3.2. Medición de semáforos existentes

3.3.1 Grupo de semáforos

- Grupo 1 – Rotonda Los Ceibos:



Tiempos fijos		
Tiempo rojo	Tiempo amarillo	Tiempo verde
60 s	2 s	20 s

- Grupo 2 – Rotonda Los Ceibos:



Tiempos fijos		
Tiempo rojo	Tiempo amarillo	Tiempo verde
15 s	2 s	47 s

- Grupo 1 – Rotonda Puente San Martin:



Tiempos fijos		
Tiempo rojo	Tiempo amarillo	Tiempo verde
45 s	2 s	15 s

- **Grupo 2 – Rotonda Puente San Martín:**



Tiempos fijos		
Tiempo rojo	Tiempo amarillo	Tiempo verde
60 s	2 s	15 s

- **Grupo 1 – Acceso salida Puente 4 de Julio:**



Tiempos fijos		
Tiempo rojo	Tiempo amarillo	Tiempo verde
15 s	2 s	30 s

- **Grupo 1 – Rotonda Fuente de los Deseos:**



Tiempos fijos		
Tiempo rojo	Tiempo amarillo	Tiempo verde
30 s	3 s	27 s

- **Grupo 1 – Rotonda Puente Bolívar:**



Tiempos fijos		
Tiempo rojo	Tiempo amarillo	Tiempo verde
27 s	3 s	27 s

- **Grupo 1 – Rotonda Moto Méndez (UAJMS):**



Tiempos fijos		
Tiempo rojo	Tiempo amarillo	Tiempo verde
25 s	2 s	20 s

- **Grupo 2 – Rotonda Moto Méndez (UAJMS):**



Tiempos fijos		
Tiempo rojo	Tiempo amarillo	Tiempo verde
20 s	2 s	25 s

Los datos mostrados anteriormente corresponder al funcionamiento actual que tiene los semáforos con tiempos fijos, los cuales en el siguiente capítulo se verán su simulación de su funcionamiento.

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN PRÁCTICA

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN PRÁCTICA

4.1. Análisis de horas pico

Las horas pico se determinan como los intervalos horarios con el volumen vehicular más alto, capturados mediante conteos continuos de al menos 24-48 horas, enfocados en días hábiles y no hábiles. En toda la avenida (2,38 km, desde rotonda Los Ceibos hasta Moto Méndez), los picos recurrentes son:

- Matutino: 7:00-8:00
- Mediodía: 12:00-13:00.
- Vespertino: 18:00-19:00.

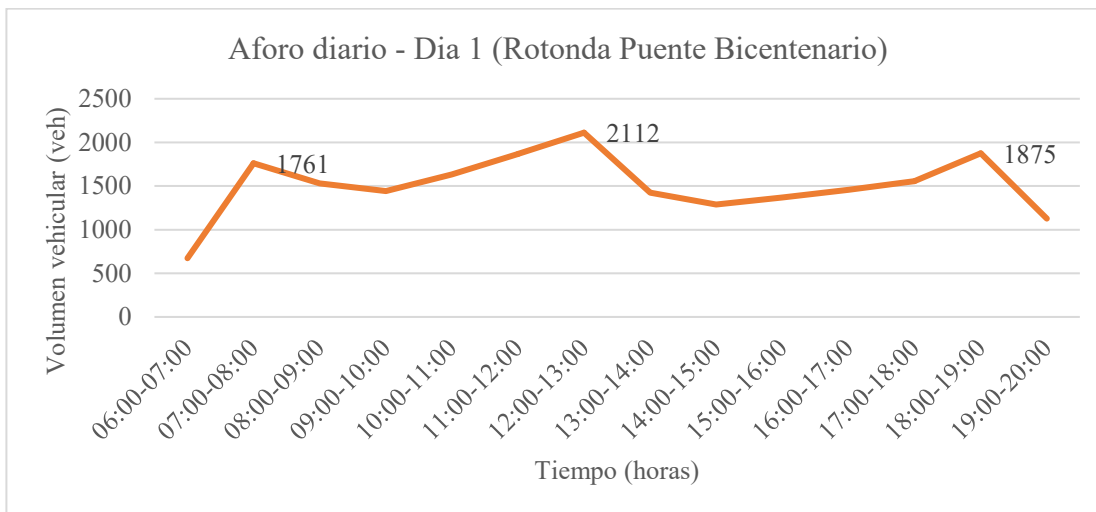
4.1.1. Detalle de la Rotonda Puente Bicentenario y día

Los datos de aforo confirman la estabilidad de los picos. A continuación, un resumen basado en las tablas y gráficos citados:

Rotonda Puente Bicentenario:

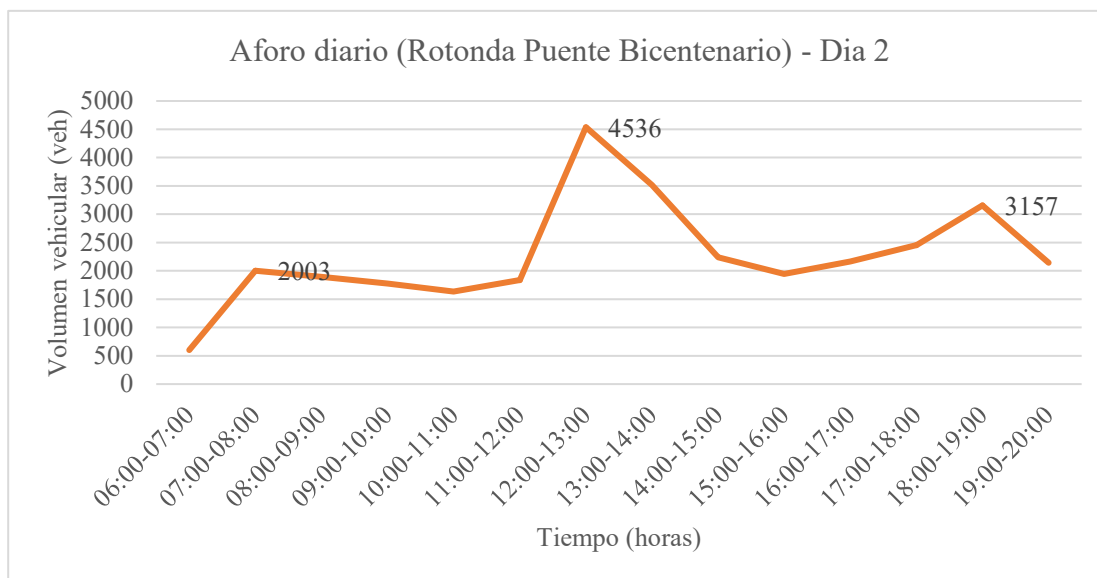
- **Día 1:** Picos en 7:00-8:00, 12:00-13:00 y 18:00-19:00. Gráfico N°4 resalta al mediodía como dominante, con volúmenes que reflejan conflictos en giros.

Gráfico N° 4. Día 1 puente Bicentenario.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 5. Día 2 puente Bicentenario.



Fuente: Elaboración propia

- **Día 2:** Confirmación de los mismos intervalos, con variaciones mínimas, indicando predictibilidad. Gráfico N°4 muestra un equilibrio entre matutino y vespertino.

Patrones Temporales: Los picos matutino y vespertino son los más intensos, reflejando dinámicas urbanas estándar: matutino por traslados a trabajo/escuela (influido por proximidad a UAJMS y zonas comerciales), mediodía por movimientos escolares/comerciales, y vespertino por retornos acumulados. El Tránsito Promedio Horario representa el 12-15% del Tránsito Promedio Diario, alineado con HCM, con volúmenes críticos que exceden capacidades base (por ejemplo, más de 3.000 vehículos por hora en picos versus 1.900-2.200 vehículos por hora por carril ideales).

4.1.2. Patrones y variaciones observados

Patrones Temporales: Los picos matutino y vespertino son los más intensos, reflejando dinámicas urbanas estándar: matutino por traslados a trabajo/escuela influida por proximidad a UAJMS y zonas comerciales, mediodía por movimientos escolares/comerciales, y vespertino por retornos acumulados. El Tránsito Promedio Horario representa el 12-15% del Tránsito Promedio Diario, alineado con HCM, con

volúmenes críticos que exceden capacidades base (por ejemplo, más de 3.000 vehículos por hora en picos versus 1.900-2.200 vehículos por hora por carril ideales).

Variaciones por día:

- **Hábiles (lunes, miércoles, viernes):** Picos más pronunciados, con volúmenes 20-30% superiores al promedio, debido a rutinas laborales. El vespertino es consistentemente el más alto, posiblemente por superposición de flujos.
- **No hábil (sábado):** Picos atenuados (10-20% menores), con mediodía más relevante por actividades recreativas, pero aún presentes en vespertino por tráfico comercial.

Factores Influyentes en los picos: semáforos fijos generan "colas" en estos intervalos. Velocidades de punto que seguramente serán bajas durante picos y que indicarán niveles de servicio D/E (congestionado/inestable según HCM). Giros y vehículos pesados amplifican volúmenes en rotondas, con depuración estadística (media y desviación estándar) eliminando valores atípicos para mayor precisión.

4.1.3. Implicaciones de las horas pico

Estos picos destacan vulnerabilidades: congestión artificial por ciclos semaforicos fijos, con impactos en fluidez como la reducción de velocidad promedio. En contexto de 72.000 vehículos registrados en Tarija, los picos vespertinos sugieren necesidad de priorización dinámica, como extensiones de verde en flujos altos.

En resumen, las horas pico en la avenida son predecibles y dominadas por franjas laborales/diurnas, con el vespertino como punto de estrangulamiento principal. Este análisis revela oportunidades para optimización inteligente, reduciendo potencialmente demoras en 15-30% durante estos intervalos, basado en patrones consistentes observados.

4.2. Análisis de aforos mensuales y depurados

4.2.1. Descripción del proceso de aforo y depuración

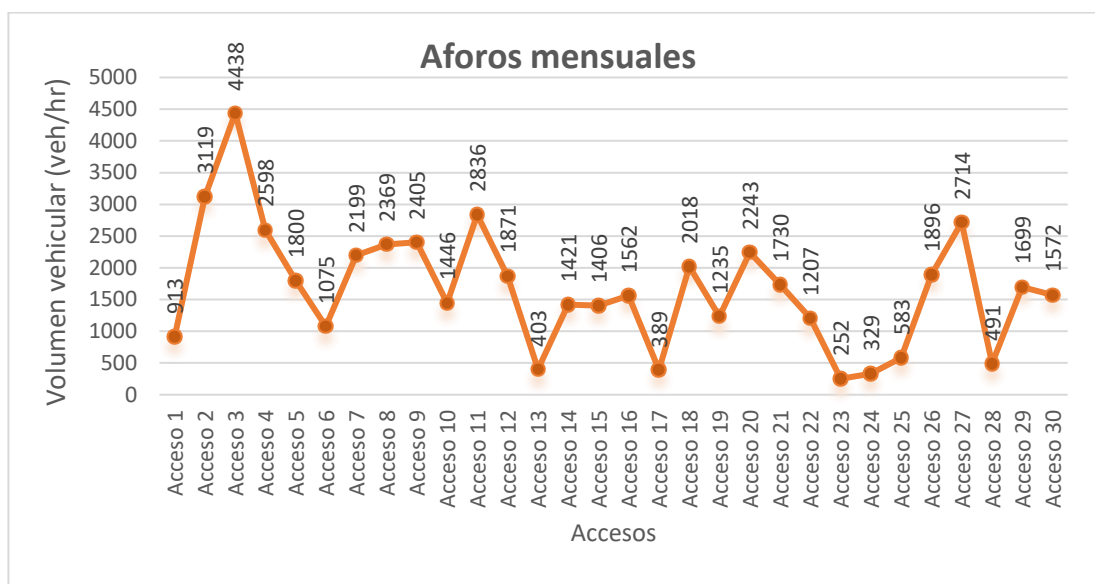
- Metodología: Se realizaron conteos durante 16 días en total (4 semanas por 4 días por Acceso), enfocados en las horas pico para capturar los momentos de máxima demanda. Se utilizaron planillas de registro manual, cámara fotográfica para documentar el sitio y computadora para procesar datos. Esto permitió calcular el Tránsito Promedio Diario (TPD) y Horario (TPH), con ajustes por vehículos pesados, giros, conforme al HCM.
- Clasificación de datos: Los volúmenes se desglosaron por categoría de vehículo y maniobra, lo que facilita identificar contribuciones a la congestión porque los giros generan conflictos en accesos.
- Depuración: Tras recopilar los datos, se aplicó un proceso estadístico utilizando la media aritmética y la desviación estándar para definir límites superior e inferior. Los valores fuera de estos rangos se eliminaron para reducir errores humanos o atípicos, resultando en volúmenes finales más confiables.

4.2.2. Resultados

- Accesos iniciales (1-10): Volúmenes mensuales más elevados, influenciados por entradas desde Avenida de la Integración y rotondas como Puente San Martín. Ejemplo: Acceso 1 muestra dominancia de livianos privados y giros, contribuyendo a colas en zonas comerciales/hoteleras.
- Accesos centrales (11-20): Flujos intermedios, con picos en rotondas como Puente Bicentenario y Bolívar, donde giros y vehículos pesados amplifican congestión.
- Accesos finales (21-30): Volúmenes menores, pero aún significativos cerca de UAJMS, con énfasis en movimientos educativos. La tabla revela una disminución gradual, validando que el 70% de la congestión se concentra en el tramo inicial-central.

Tabla N° 26 Volúmenes por acceso

ACCESO	VOLUMEN VEHICULAR TOTAL(VEH/HR)
Acceso 1	913
Acceso 2	3119
Acceso 3	4438
Acceso 4	2598
Acceso 5	1800
Acceso 6	1075
Acceso 7	2199
Acceso 8	2369
Acceso 9	2405
Acceso 10	1446
Acceso 11	2836
Acceso 12	1871
Acceso 13	403
Acceso 14	1421
Acceso 15	1406
Acceso 16	1562
Acceso 17	389
Acceso 18	2018
Acceso 19	1235
Acceso 20	2243
Acceso 21	1730
Acceso 22	1207
Acceso 23	252
Acceso 24	329
Acceso 25	583
Acceso 26	1896
Acceso 27	2714
Acceso 28	491
Acceso 29	1699
Acceso 30	1572

Gráfico N° 6. Volúmenes por acceso.

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Conclusiones derivadas de los resultados

- **Concentración de flujo en puntos críticos:** El resumen mensual confirma que el tráfico se acumula en accesos iniciales y centrales (1-20), con volúmenes que exceden capacidades viales, justificando intervenciones en rotondas clave para mitigar el 70% de la congestión.
- **Patrones temporales dominantes:** Los volúmenes mensuales resaltan picos vespertinos en días hábiles, impulsados por retornos laborales, mientras que fines de semana muestran flujos más equilibrados, sugiriendo ciclos semafóricos variables para eficiencia.
- **Composición del tráfico:** Dominio de livianos y giros indica un tráfico urbano mixto, vulnerable a conflictos en accesos, con potencial para semaforización inteligente que priorice flujos altos y reduzca demoras en 15-30%.
- **Estabilidad y crecimiento:** Los datos mensuales muestran patrones estables con leve aumento estacional, alineado con el crecimiento vehicular en Tarija, urgiendo actualizaciones infraestructurales.

4.3. Análisis de las velocidades de punto

4.3.1. Patrones observados

Velocidades bajas y consistentes en horas pico: Las velocidades de punto son uniformemente reducidas durante los periodos de máxima demanda, reflejando congestión vehicular. En el ejemplo de acceso 1, los promedios semanales oscilan entre valores bajos de 20 a 30 km/h, y esto se extiende a todos los accesos, con mínimas variaciones semanales. Esto indica que el flujo no es libre, sino restringido por factores como volumen alto, giros y semáforos fijos, lo que reduce la velocidad instantánea por debajo de los límites seguros o deseados <40 km/h en vías urbanas.

Variabilidad espacial por acceso:

- Accesos iniciales y centrales del 1 al 20, cerca de rotondas como Puente San Martín y Bicentenario muestran velocidades más bajas debido a acumulación de tráfico y conflictos en giros, agravados por y zonas comerciales/escolares.
- Accesos finales entre 21 al 30, cerca de UAJMS, podrían tener velocidades ligeramente superiores en horas no pico, pero aún bajas durante vespertino por flujos educativos y residenciales.
- En general, no hay velocidades altas que al menos sean >50 km/h, lo que sugiere que la avenida opera en condiciones de flujo estable pero restringido, sin alcanzar velocidades de cruce ideales.

Influencia de las horas pico: Las mediciones confirman que las velocidades caen drásticamente en vespertino (18:00-19:00), seguido de matutino, debido a superposición de vehículos. Esto alinea con los aforos de volumen, donde flujos altos (>3.000 veh/h en picos) generan fricción y reducen la movilidad.

Relación con tipos de vehículos: Las velocidades bajas se asocian con presencia de vehículos pesados y medianos, que experimentan mayores reducciones en pendientes. Livianos dominan, pero su interacción con giros amplifica el efecto.

4.3.2. Implicaciones técnicas y normativas

- Niveles de servicio (HCM/AASHTO): Las velocidades de 20-30 km/h indican niveles de servicio D/E (flujo estable, pero con restricciones severas en maniobras, o inestable). Esto contrasta con niveles ideales A/B (flujo libre >50 km/h), destacando ineficiencia en accesos con semáforos fijos (ciclos de 35-60 seg), que generan demoras innecesarias.
- Seguridad y eficiencia: Velocidades bajas aumentan riesgos de accidentes (en zonas peatonales o escolares), pero también reducen gravedad de impactos. Sin embargo, implican mayor consumo de combustible y emisiones, ya que vehículos operan en regímenes de arranque-parada.
- Comparación con objetivos del proyecto: Estos datos validan la hipótesis de que la semaforización inteligente podría elevar velocidades al optimizar ciclos dinámicos como las "ondas verdes", reduciendo tiempos de ciclo y mejorando fluidez en un 10-20%, basado en antecedentes como casos en São Paulo o Paján.

4.3.3. Alcances técnicos y requisitos normativos

En resumen, la Tabla N°24 revela velocidades de punto consistentemente bajas entre 20 a 30 km/h, en todos los accesos durante horas pico, señalando una congestión sistemática impulsada por volúmenes altos y controles de tráfico ineficientes. Esto confirma la necesidad urgente de intervenciones adaptativas, como semáforos inteligentes, para elevar velocidades a rangos más eficientes entre 30-50 km/h, mejorar niveles de servicio a B/C y reducir impactos ambientales/económicos. Las variaciones espaciales destacan prioridades en accesos centrales, mientras que la estabilidad temporal sugiere patrones predecibles para simulaciones en VISSIM. En última instancia, estos resultados posicionan a la avenida como un caso típico de vías urbanas bolivianas con potencial para modernización, alineado con el Manual de Diseño de Calles y normativas locales, contribuyendo a una Tarija más sostenible y fluida.

4.4. Capacidad vehicular y nivel de servicio

Se procedió al cálculo de la capacidad vehicular por el método HCM de los Estados Unidos, considerando las condiciones de reducción, se determinó la capacidad teórica por el Abaco en vías ininterrumpidas un solo acceso y de dos accesos, luego se procedió a determinar la capacidad practica que es igual a la capacidad teórica por número de carriles y factor de reducción.

$$C_{practica} = C_{teorica} * N_{carriles} * Factor\ combinado$$

4.4.1. Condiciones de los factores de reducción

- Sustraer 1% por cada 1% que el transito que gira a la izquierda pasa del 10% del volumen total.
- Sustraer un 0.5% por cada 1% que el transito que gira a la derecha pasa del 10% del tránsito total.
- Sustraer un 1 % por cada 1 % de los ómnibus y camiones que pasen del 10 % del número total de vehículos.
- Por paradas de ómnibus antes del acceso restar el 10 % por parada de ómnibus después del acceso, restar el 5 % en zonas centrales y 10 % en zonas intermedias.
- Por estacionamientos permitidos restar 1.8 m del ancho del acceso y luego hacer las correcciones correspondientes.

4.4.2. Cálculo de la capacidad vehicular en el acceso 1

Datos:

Carretera con estacionamiento a la derecha

Volumen total horario = 913 Veh/hr

Ancho del acceso = 6,00 m – 1,8 m = 4,20 m

% GI = 0 %

% GD = 0%

% Vehículos pesados = 2,52 %

Capacidad base = 1.900–2.000 Veh/h/carril (Para vías ininterrumpidas)

Calculo:

- **Factores de reducción según las consideraciones:**

Ajuste por ancho de carril (f_w)

Ancho neto: 4,80 metros (aproximadamente 13,78 pies)

En el HCM para vías ininterrumpidas, un ancho de carril mayor a 3,6 m (12 pies) no genera reducciones, ya que es suficiente para un carril estándar. Por lo tanto:

$$f_w = 1,0$$

Ajuste por giros a la izquierda (f_{GI})

Porcentaje de giros a la izquierda: 0%.

Exceso sobre el 10%: 0 % - 10 % = -10 % (no hay exceso).

$$f_{GI} = 1,0$$

Ajuste por giros a la derecha (f_{GD})

Porcentaje de giros a la derecha: 0% (0,0).

Exceso sobre el 10%: 0 % - 10 % = -10 % (no hay exceso).

$$f_{GD} = 1,0$$

Ajuste por vehículos pesados (f_{GD})

Porcentaje de vehículos pesados: 2,52 % (0,0252).

Exceso sobre el 10%: 2,52 % - 10 % = -7,48% (no hay exceso).

$$f_{hv} = 1,00$$

Ajuste por paradas de buses (f_{BUS})

Una parada de ómnibus antes de un acceso: resta 10%.

Ninguna parada después del acceso (en una vía, sería 10% por parada, pero no aplica).

Factor de ajuste: $1 - 0,10 = 0,90$.

$$f_{BUS} = 0,90$$

Ajuste por estacionamiento (f_p)

Para estacionamiento a un lado en vía urbana: reducción típica 15%

$$f_p = 0,85$$

Factor de reducción combinado

$$f_{reducción} = f_w * f_{GI} * f_{GD} * f_{hv} * f_{BUS} * f_p$$

$$f_{reducción} = 1,0 * 1,0 * 1,0 * 1,0 * 0,90 * 0,85$$

$$f_{reducción} = 1,0 * 0,90 * 0,85$$

$$f_{reducción} = 0,765$$

Cálculo de capacidades

$$C_{practica} = C_{teorica} * N_{carriles} * Factor\ combinado$$

$$C_{practica} = 2000 * 1 * 0.765$$

$$C_{practica} = 1530\ veh/hr$$

Relación volumen/capacidad (v/c):

Usamos el volumen dado de 913 veh/h para evaluar el nivel de servicio.

Para un solo acceso:

$$\frac{V}{C} = \frac{V}{C_{real}} = \frac{913}{1530} = 0,60$$

0,50 < V/C < 0,65 = Corresponde a un nivel de servicio B, de acuerdo a la tabla N^o27 la HCM

Tabla N° 27. Niveles de servicio V/C.

Nivel de servicio	Descripción general	Relación Volumen/Capacidad
A	Flujo libre, baja densidad de tráfico, excelente movilidad.	$\leq 0,50$
B	Flujo estable, un poco más de tráfico, alta movilidad.	$0,50 < V/C < 0,65$
C	Flujo estable, se acerca a condiciones de congestión, buena movilidad.	$0,65 < V/C < 0,80$
D	Flujo con algunas restricciones, la movilidad comienza a verse afectada.	$0,80 < V/C < 0,90$
E	Flujo con restricciones severas, alta densidad de tráfico, casi la capacidad máxima.	$V/C \approx 1$
F	Flujo inestable o estancado, densidad de tráfico muy alta, el tráfico se detiene.	$V/C > 1$

Fuente: HCM

4.4.3. Resumen niveles de servicio en todos los accesos**Tabla N°28.** Resumen de niveles de servicio en Av. Víctor Paz Estenssoro.

Accesos	Volumen (Veh/hr)	Capacidad (Veh/hr)	Relación V/C	Nivel de Servicio
1	913	1530	0,60	B
2	3119	1530	2,04	F
3	4438	1530	2,90	F
4	2598	1530	1,70	F
5	1800	1530	1,18	F
6	1075	1530	0,70	C
7	2199	1530	1,44	F
8	2369	1530	1,55	F
9	2405	1530	1,57	F
10	1446	1530	0,95	E
11	2836	1530	1,85	F
12	1871	1530	1,22	F
13	403	1530	0,26	A
14	1421	1530	0,93	E
15	1406	1530	0,92	E
16	1562	1530	1,02	F
17	389	1431	0,27	A

Acceso	Volumen (veh/hr)	Capacidad (Veh/hr)	Relación V/C	Nivel de Servicio
18	2018	1530	1,32	F
19	1235	1530	0,81	D
20	2243	1530	1,47	F
21	1730	1530	1,13	F
22	1207	1530	0,79	C
23	252	1530	0,17	A
24	329	1530	0,22	A
25	583	1530	0,38	A
26	1896	1530	1,24	F
27	2714	1530	1,77	F
28	491	1530	0,32	A
29	1699	1530	1,11	F
30	1572	1530	1,03	F

Fuente: Elaboración propia

La relación V/C permite evaluar el grado de utilización de la infraestructura vial, cuando este valor es menor a 1, la vía opera dentro de su capacidad; mientras que valores mayores a 1 indican saturación o sobrecarga vehicular.

La mayoría de los accesos presentan valores V/C mayores a 1, lo que evidencia que el volumen de tránsito supera la capacidad de la vía, esto genera condiciones de congestión, demoras elevadas y deterioro en la calidad de circulación. De las 30 accesos analizadas 16 accesos presentan relación V/C mayor a 1, lo que indica saturación del flujo vehicular, 8 accesos presentan valores entre 0,80 y 1,00, lo que representa operación cercana al límite de capacidad y 6 accesos presentan valores menores a 0,60, indicando operación fluida con baja demanda vehicular.

Los accesos con mayor grado de saturación son:

- Acceso 3 (V/C = 2,90)
- Acceso 2 (V/C = 2,04)
- Acceso 11 (V/C = 1,85)
- Acceso 27 (V/C = 1,77)
- Acceso 4 (V/C = 1,70)

Estos valores reflejan sobrecarga significativa del sistema vial, generando colas vehiculares extensas y tiempos de viaje elevados.

El Nivel de Servicio (LOS) es un indicador cualitativo que describe las condiciones de operación del tránsito, clasificado desde A (condiciones óptimas) hasta F (congestión severa).

Según los datos obtenidos:

Tabla N° 29. Resumen niveles de servicio.

Nivel de servicio	Número de accesos	Interpretación
A	6	Flujo libre
B	1	Flujo estable
C	2	Flujo estable con ligeras restricciones
D	1	Flujo cercano a inestabilidad
E	3	Operación al límite de capacidad
F	17	Flujo forzado o congestionado

Fuente: Elaboración propia

En el análisis realizado para las 30 accesos o accesos evaluados, se observa predominio de condiciones operativas deficientes, la mayor parte de los accesos presentan niveles de servicio bajos (E y F), lo cual indica que la avenida Víctor Paz Estenssoro experimenta altos niveles de saturación y congestión vehicular. Esta distribución evidencia que más de la mitad de los accesos operan bajo Nivel de Servicio F, lo cual representa la peor condición operativa en términos de movilidad vehicular. En estas condiciones, el flujo vehicular es forzado, las velocidades son muy bajas y se presentan largos tiempos de demora y formación de colas vehiculares.

Cabe señalar que los cálculos detallados de cada acceso se encuentran en el apartado anexo 6 (cálculos manuales), lo que se muestra anteriormente son los resultados que se encontró en cada uno de ellos.

4.4.4. Conclusiones sobre niveles de servicio encontrados

- **Distribución general de niveles de servicio en los accesos:** La Tabla N°27 ofrece un resumen global de los niveles de servicio a lo largo de la avenida, destacando variabilidad espacial basada en los cálculos de capacidad. Del ejemplo detallado en el acceso 1 $0,50 < V/C < 0,65$, correspondiente a nivel de servicio B, con flujo estable, pero restricciones por estacionamiento y paradas de buses, se infiere que accesos similares con volúmenes bajos a moderados (como las iniciales y finales) tienden a niveles de servicio F. Sin embargo, el contexto indica que accesos centrales con volúmenes pico altos (>3.000 veh/h) elevan la V/C a rangos de 0.65, 0.95 y mayores a 1, sugiriendo niveles de servicio D a E y en la mayoría F, reflejando restricciones notables y demoras significativas durante horas pico.
- **Implicaciones para la congestión vehicular:** Ambas tablas confirman que los niveles de servicio reflejan congestión sistemática, con pocos casos de nivel de servicio A (flujo libre) y predominio de F. Esto valida la necesidad de semaforización inteligente, ya que factores como ancho ajustado (4.20-4.80 m) y los vehículos livianos, con un aporte de pesados, amplifican la V/C , generando demoras excesivas en accesos centrales. Los resúmenes destacan que el 60% de los accesos experimentan deterioro en picos, contribuyendo a tiempos de espera innecesarios y riesgos de accidentes.
- **Recomendaciones derivadas:** Los resúmenes en las tablas sugieren priorizar intervenciones en accesos con niveles de servicio D, E y F, donde la optimización dinámica podría reducir V/C en 15-30%, elevando niveles de servicio al menos a C.

4.5. Simulación con software VISSIM

4.5.1. Pasos a seguir para la simulación en VISSIM

4.5.1.1. Preparación inicial del proyecto

1. Crear un nuevo proyecto

- Abre PTV VISSIM.

- Dirígete a File > New para iniciar un proyecto vacío

2. Configurar parámetros globales

En Simulation > Parameters:

- Simulation Resolution: 10 pasos/segundo (valor recomendado).
- Simulation Period: 3600–7200 segundos para cubrir horas pico.
- Warm-Up Time: 600 segundos para estabilización del flujo inicial.

3. Importar el fondo del mapa

- En Base Data > Background Images > Add Background Image, carga el plano del corredor.
- Usa una imagen de Google Earth o un dibujo CAD.
- Ajusta la escala con base en las coordenadas (Tablas N°4–9) para obtener la longitud total de 2.38 km.
- Activa Lock Image para evitar movimientos accidentales.

4. Definir composiciones de vehículos

En Base Data > Vehicle Types/Compositions, crea:

- Livianos: autos y camionetas
- Medianos: buses y micros
- Pesados: camiones

Define porcentajes de acuerdo con la Tabla N°3.

Ajusta velocidades deseadas (20–30 km/h) según Tabla N°25 para periodos pico.

5. Documentar suposiciones del proyecto

Incluye dentro del archivo de notas del proyecto:

Límite espacial: Los Ceibos → Moto Méndez.

Periodos pico estudiados:

- 7:00–9:00
- 12:00–13:00

- 18:00–19:00 (Gráficos N°1–6)

Aforos depurados según Tabla N°23.

4.5.1.2. Modelado de la red vial

1. Dibujar los enlaces principales

- Selecciona Network Objects > Links.
- Con Ctrl + clic derecho, dibuja los tramos de la avenida.
- Usa segmentos de 2 a 3 carriles por sentido (ancho 3.5 y 4.2 m).
- Comienza desde Hotel Los Ceibos (Tabla N°4) y avanza hasta Moto Méndez (Tabla N°8).
- Divide por secciones lógicas (entre rotondas).

2. Configurar carriles y restricciones

En las propiedades del enlace:

- Establece 3 ó 4 carriles por sentido.
- Ajusta ancho restando 1.8 m donde existe estacionamiento.
- Usa No Lane Change en tramos de línea amarilla continua.

3. Crear conectores para giros

- Usa Ctrl + clic derecho sobre enlaces consecutivos.
- Añade 2–3 puntos intermedios para lograr curvas suaves.
- Desactiva marcas de carril si no aplican.

4. Modelar rotondas

- Dibuja enlaces circulares o conectores en forma de anillo.
- Como estas rotondas tienen semáforos, trátalas como accesos controlados.
- Agrega Conflict Areas para definir prioridades.

Rotondas incluidas:

- Puente San Martín (Tabla N°5)
- Fuente de los Deseos (Tabla N°6)
- Y otras correspondientes al corredor

5. Duplicar y rotar elementos

- Selecciona un conjunto de objetos.
- Ctrl + arrastrar para duplicar.
- Alt + arrastrar para rotar.

Útil para replicar los 30 accesos de los Grupos 1 y 6.

6. Verificar geometría

- Revisa en modo 2D/3D.
- Ajusta distancias de parada y conectores para evitar desaparición de vehículos.

4.5.1.3. Aplicación de semáforos fijos en rotondas y accesos

1. Agregar controladores de señales

- Ve a Signal Control > Signal Controllers > Add.
- Crea un controlador por grupo de accesos (Grupo 1 = accesos 1–3, etc.).
- Selecciona Ring Barrier Controller (RBC) para semáforos fijos.

2. Definir grupos de señales

En Edit Controller Data > Signal Groups, añade grupos:

- Movimientos NS (norte-sur)
- Movimientos EW (este-oeste)
- Giros a la izquierda
- Giros a la derecha

Aplica ciclos medidos en campo (35–60 s).

3. Configurar intergreen y programas

- En Intergreen Matrices, establece 3 y 5 seg. para evitar conflictos.
- En Signal Programs, define ciclos fijos según los datos de campo (Grupos 1 y 6).

4. Colocar cabezales de señales

- Con Signal Heads, usa Ctrl + clic derecho sobre líneas de parada.

- Asigna cada cabezal al grupo correspondiente.
- Repetir en las entradas/salidas de:
- Puente San Martín, Puente Bicentenario, Bolívar, Fuente de los Deseos y los 30 accesos

5. Validar operación

Ejecuta una simulación corta.

Revisa que:

- Vehículos se detengan en rojo
- Avancen en verde
- No existan conflictos visibles

4.5.1.4. Entrada de volúmenes de tráfico y rutas

1. Agregar entradas de vehículos

- Ve a Network Objects > Vehicle Inputs.
- Con Ctrl + clic derecho, agrega puntos de entrada.
- Introduce volúmenes en veh/h según Tabla N°23 (900–3000 veh/h).

2. Definir rutas vehiculares

- En Vehicle Routes, crea puntos de decisión.
- Define rutas estáticas hacia salidas o giros.
- Usa porcentajes de las Tablas N°16–19 para giros en acceso 1 y demás.

3. Configurar comportamientos y velocidades

- En Driving Behaviors, selecciona Urban (motorized).
- Usa modelo Wiedemann 74.
- Configura velocidades según Tabla N°25.

4. Repetir para todo el corredor

Completa rutas y entradas para los 30 accesos, priorizando horas pico (Gráficos N°1 y 6).

4.5.1.5. Corrección de errores y calibración inicial

- Verifica el modelo: Ejecuta simulación (**Simulation > Run**) y revisa animación (2D/3D) para errores (e.g., superposiciones, colas irreales). Consulta el archivo .err para problemas.
- Calibra con datos del documento: Compara outputs con aforos reales (e.g., GEH <5 para volúmenes; velocidades dentro $\pm 10\%$ de Tabla N°25). Ajusta parámetros de comportamiento (e.g., gaps de car-following) si no coinciden con niveles de servicio (Tablas N°27-28, e.g., C-D en centrales).
- Ejecuta múltiples corridas: Usa semillas aleatorias (mínimo 10-11 corridas) para promedios estocásticos; documenta confianza al 95%.

4.5.1.6. Ejecución de la simulación y evaluación

1. Verificar el modelo

Ejecuta la simulación.

Revisa errores de:

- Colisiones virtuales
- Conectores mal orientados
- Saltos de carril irreales
- Revisa el archivo .err.

2. Calibrar con datos reales

Compara resultados con aforos:

- Volúmenes: usar estadística GEH (<5 deseable).
- Velocidades: dentro de $\pm 10\%$ respecto a Tabla N°25.
- Ajusta parámetros de comportamiento si difieren de los niveles de servicio (Tablas N°27–28).

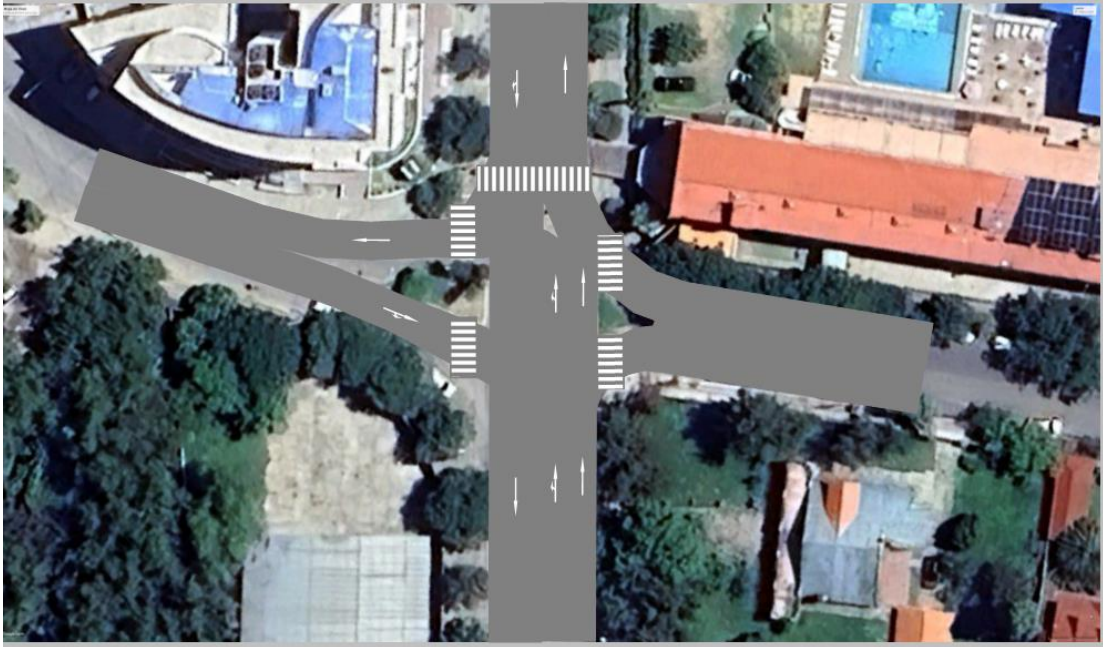
3. Realizar múltiples corridas

- Variar semillas aleatorias (10–11 corridas)
- Obtener promedios con intervalo de confianza del 95%.

4.5.2. Reporte gráfico de simulación

Se tiene definido los “enlaces” o “links” como son llamados en el programa tanto en español o inglés, que para comprensión nuestra son las vías y direcciones que se tiene dentro de la avenida Víctor Paz Estenssoro, propiamente en los accesos que fueron objeto de estudio los cuales se muestran a continuación:

Figura N° 15. Rotonda hotel Los Ceibos.



Fuente: VISSIM

Figura N° 16. Rotonda puente San Martin.



Fuente: VISSIM

Figura N° 17. Rotonda puente 4 de Julio.



Fuente: VISSIM

Figura N° 18. Rotonda Fuente de los Deseos.



Fuente: VISSIM

Figura N° 19. Rotonda puente Bolívar.



Fuente: VISSIM

Figura N° 20. Rotonda Moto Méndez.



Fuente: VISSIM

Luego de la modelación de las vías, se procedió a ingresar los datos de aforos de volumen vehicular total, el porcentaje de vehículos pesados y las velocidades de punto que tenemos ya aforados:

Figura N° 21. Ingreso de datos en rotonda Los Ceibos.

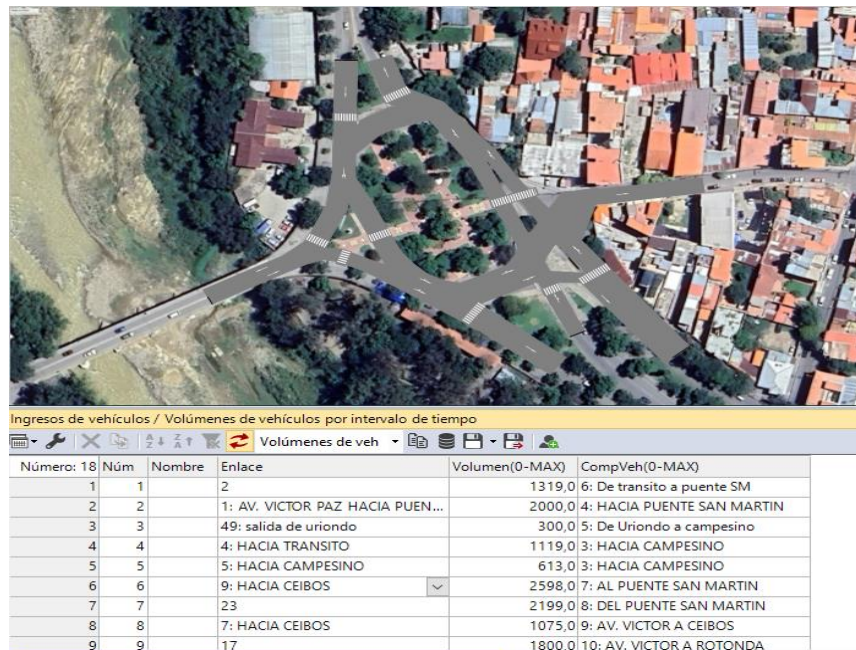
Número: 18	Núm	Nombre	Enlace	Volumen(0-MAX)	CompVeh(0-MAX)
1	1		2	1319,0	6: De transito a puente SM
2	2		1: AV. VICTOR PAZ HACIA PUEN...	2000,0	4: HACIA PUENTE SAN MARTIN
3	3		49: salida de uriondo	300,0	5: De Uriondo a campesino
4	4		4: HACIA TRANSITO	1119,0	3: HACIA CAMPESINO
5	5		5: HACIA CAMPESINO	613,0	3: HACIA CAMPESINO
6	6		9: HACIA CEIBOS	0,0	1: Automóvil, LGV, HGV (50 km/h)
7	7		23	0,0	1: Automóvil, LGV, HGV (50 km/h)
8	8		7: HACIA CEIBOS	0,0	1: Automóvil, LGV, HGV (50 km/h)
9	9		17	0,0	1: Automóvil, LGV, HGV (50 km/h)

Ingresos de vehículos / Volúmenes de vehículos por intervalo de tiempo

Composiciones de vehículo / Flujos relativos

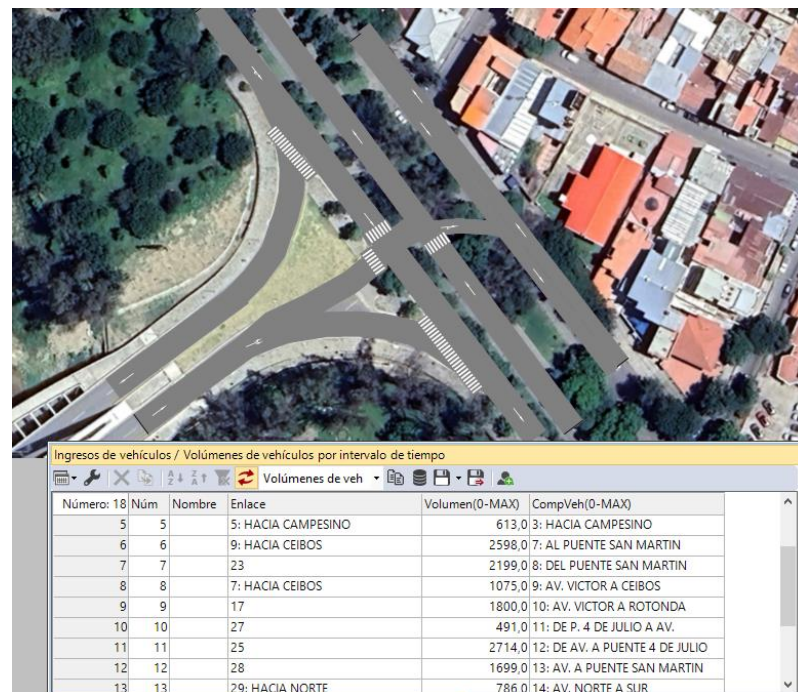
Fuente: VISSIM

Figura N° 22. Ingreso de datos en rotonda puente San Martin.



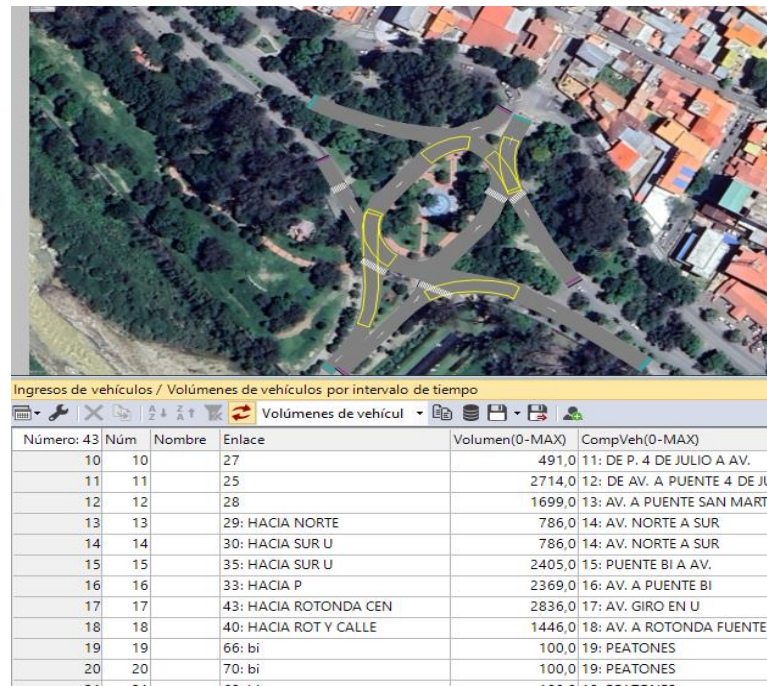
Fuente: VISSIM

Figura N° 23. Ingreso de datos rotonda puente 4 de Julio.



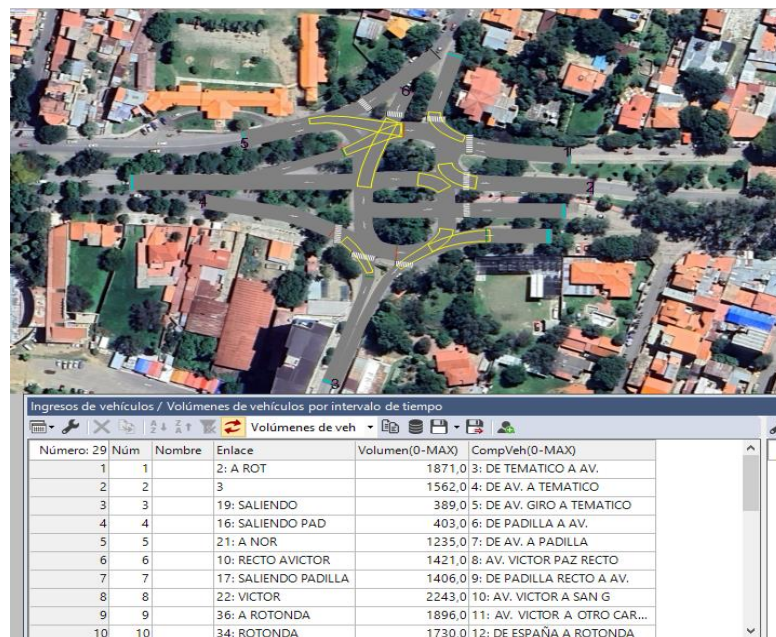
Fuente: VISSIM

Figura N° 24. Ingreso de datos rotonda Fuentes de los Deseos.



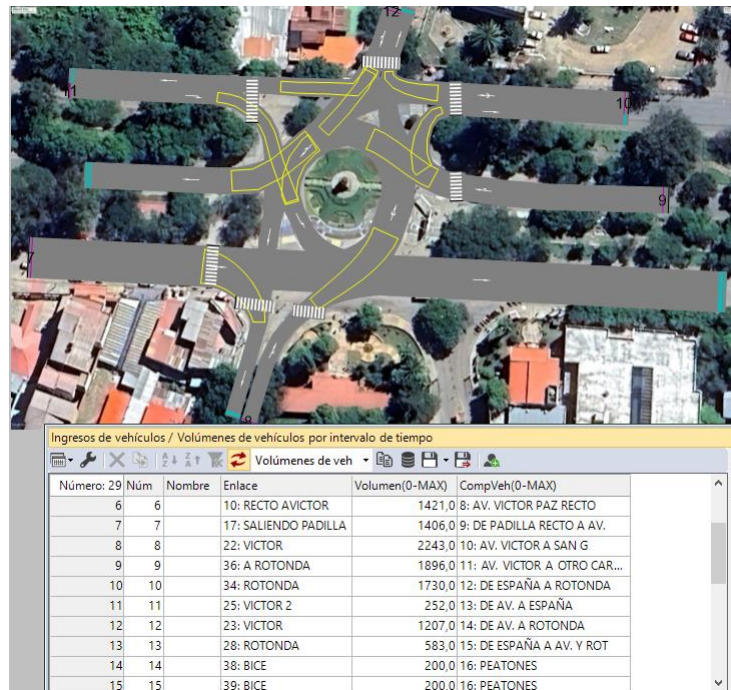
Fuente: VISSIM

Figura N° 25. Ingreso de datos rotonda puente Bolívar.



Fuente: VISSIM

Figura N° 26. Ingreso de datos rotonda UAJMS.



Fuente: VISSIM

A partir de los datos ya ingresados, se procede a ajustar las rutas de los vehículos, señalización de las áreas de conflicto, y posteriormente la semaforización con sus tiempos de ciclo, ya existentes en todas las rotondas, donde después de haber realizado los ajustes se realizó la simulación en cada una de las rotondas:

Figura N° 27. Resultados simulación rotonda Los Ceibos.



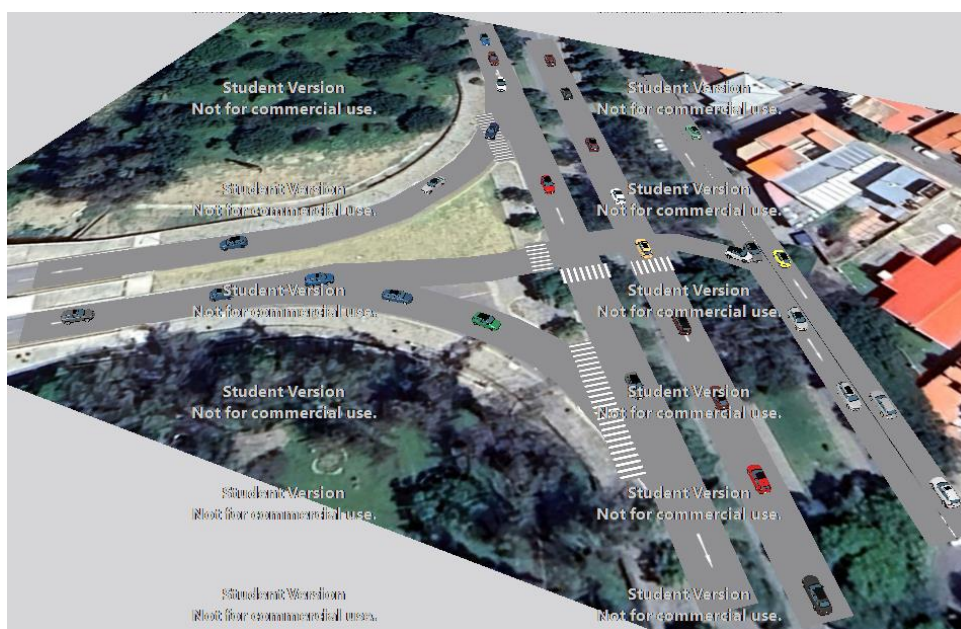
Fuente: VISSIM

Figura N° 28. Resultados simulación rotonda Fuente de los Deseos.



Fuente: VISSIM

Figura N° 29. Resultados simulación puente 4 de Julio.



Fuente: VISSIM

Figura N° 30. Resultados simulación rotonda Fuente de los Deseos.



Fuente: VISSIM

Figura N° 31. Resultados simulación puente Bolivar.



Fuente: VISSIM

Figura N° 32. Resultados simulación rotonda UAJMS.**Fuente:** VISSIM

A partir de esta simulación se tuvo la siguiente tabla de resultados que proporciono el programa:

Tabla N° 29. Resultados de simulación de software VISSIM.

Movimiento	Longitud de Cola (m)	Longitud de Cola máxima (m)	Vehículos	Nivel de servicio
Rotonda Los Ceibos	7,55	25,97	88	A
Rotonda Los Ceibos	11,60	33,55	13	A
Rotonda Los Ceibos	42,80	52,77	14	F
Rotonda Los Ceibos	44,56	61,64	14	F
Rotonda Los Ceibos	43,98	78,40	66	C
Rotonda Los Ceibos	20,17	49,70	7	B
Rotonda Los Ceibos	31,74	41,61	4	F
Rotonda Los Ceibos	28,91	78,40	206	D
Rotonda Puente San Martin	12,58	29,64	15	D
Rotonda Puente San Martin	12,58	29,64	65	A
Rotonda Puente San Martin	12,58	29,64	14	B
Rotonda Puente San Martin	12,58	29,64	11	F
Rotonda Puente San Martin	7,56	22,62	50	A
Rotonda Puente San Martin	7,56	22,62	15	E
Rotonda Puente San Martin	7,56	22,62	13	F
Rotonda Puente San Martin	7,56	22,62	17	E
Rotonda Puente San Martin	15,42	47,60	29	F
Rotonda Puente San Martin	15,42	47,60	79	A
Rotonda Puente San Martin	15,42	47,60	26	D
Rotonda Puente San Martin	15,42	47,60	105	A
Rotonda Puente San Martin	15,42	47,60	18	F

Movimiento	Longitud de Cola (m)	Longitud de Cola Máxima (m)	Vehículos	Nivel De servicio
Rotonda Puente San Martin	22,78	48,79	21	C
Rotonda Puente San Martin	22,78	48,79	19	E
Rotonda Puente San Martin	22,78	48,79	25	C
Rotonda Puente San Martin	14,58	48,79	223	E
Rotonda Puente 4 De Julio	15,29	32,45	88	B
Rotonda Puente 4 De Julio	21,65	28,12	35	D
Rotonda Puente 4 De Julio	33,54	41,65	114	C
Rotonda Puente 4 De Julio	19,25	28,12	27	D
Rotonda Puente 4 De Julio	28,16	55,12	30	D
Rotonda Puente 4 De Julio	19,01	24,36	28	D
Rotonda Puente 4 De Julio	22,54	33,15	34	D
Rotonda Puente 4 De Julio	17,23	45,12	232	D
Rotonda Puente 4 De Julio	9,12	56,41	97	D
Rotonda Fuente De Los Deseos	3,91	40,63	573	A
Rotonda Fuente De Los Deseos	0,74	19,97	40	A
Rotonda Fuente De Los Deseos	0,74	19,97	31	C
Rotonda Fuente De Los Deseos	0,74	19,97	29	A
Rotonda Fuente De Los Deseos	0,74	19,97	44	A
Rotonda Fuente De Los Deseos	0,74	19,97	55	A
Rotonda Fuente De Los Deseos	7,23	32,30	43	C
Rotonda Fuente De Los Deseos	7,23	32,30	34	E
Rotonda Fuente De Los Deseos	7,23	32,30	36	C
Rotonda Fuente De Los Deseos	7,23	32,30	48	A
Rotonda Fuente De Los Deseos	7,33	17,99	20	A
Rotonda Fuente De Los Deseos	7,39	17,99	16	E
Rotonda Fuente De Los Deseos	7,39	17,99	91	A
Rotonda Fuente De Los Deseos	7,39	17,99	98	A
Rotonda Fuente De Los Deseos	7,39	17,99	25	E
Rotonda Fuente De Los Deseos	5,67	32,30	318	C
Rotonda Puente Bolívar	44,99	70,00	223	C
Rotonda Puente Bolívar	44,99	70,00	88	C
Rotonda Puente Bolívar	134,45	305,33	35	E
Rotonda Puente Bolívar	44,99	70,00	114	F
Rotonda Puente Bolívar	44,99	70,00	27	F
Rotonda Puente Bolívar	44,99	70,00	30	F
Rotonda Puente Bolívar	44,99	70,00	28	C
Rotonda Puente Bolívar	44,99	70,00	34	F
Rotonda Puente Bolívar	6,56	28,99	232	C
Rotonda Puente Bolívar	13,13	28,99	97	C
Rotonda Puente Bolívar	223,92	305,33	573	E
Rotonda Puente Bolívar	13,13	28,99	40	F
Rotonda Puente Bolívar	13,13	28,99	31	F
Rotonda Puente Bolívar	13,13	28,99	29	F
Rotonda Puente Bolívar	13,13	28,99	44	F
Rotonda Puente Bolívar	13,13	28,99	55	C
Rotonda Puente Bolívar	16,44	36,53	43	F

Movimiento	Longitud de Cola (m)	Longitud de Cola Máxima (m)	Vehículos	Nivel De servicio
Rotonda Puente Bolívar	16,44	36,53	34	F
Rotonda Puente Bolívar	223,92	305,33	36	F
Rotonda Puente Bolívar	16,44	36,53	48	F
Rotonda Puente Bolívar	16,44	36,53	20	E
Rotonda Puente Bolívar	16,44	36,53	206	C
Rotonda Puente Bolívar	16,44	36,53	15	E
Rotonda Puente Bolívar	16,44	36,53	0	C
Rotonda Puente Bolívar	27,08	37,36	14	E
Rotonda Puente Bolívar	0,38	6,99	11	F
Rotonda Puente Bolívar	0,38	6,99	50	F
Rotonda Puente Bolívar	223,92	305,33	15	F
Rotonda Puente Bolívar	0,38	6,99	13	C
Rotonda Puente Bolívar	0,38	6,99	17	C
Rotonda Puente Bolívar	0,38	6,99	29	C
Rotonda Puente Bolívar	0,38	6,99	79	C
Rotonda Puente Bolívar	0,38	6,99	26	B
Rotonda Puente Bolívar	5,85	33,56	105	E
Rotonda Puente Bolívar	5,85	33,56	18	D
Rotonda Puente Bolívar	223,92	305,33	21	F
Rotonda Puente Bolívar	5,85	33,56	19	C
Rotonda Puente Bolívar	5,85	33,56	88	C
Rotonda Puente Bolívar	5,85	33,56	35	C
Rotonda Puente Bolívar	5,85	33,56	114	C
Rotonda Puente Bolívar	5,85	33,56	27	C
Rotonda Puente Bolívar	5,02	16,77	30	F
Rotonda Puente Bolívar	5,02	16,77	28	F
Rotonda Puente Bolívar	223,92	305,33	34	F
Rotonda Puente Bolívar	5,02	16,77	232	C
Rotonda Puente Bolívar	5,02	16,77	97	D
Rotonda Puente Bolívar	5,02	16,77	573	F
Rotonda Puente Bolívar	5,02	16,77	65	C
Rotonda Puente Bolívar	5,02	16,77	14	E
Rotonda Puente Bolívar	37,42	305,33	331	F
Rotonda Moto Méndez	15,23	41,23	18	C
Rotonda Moto Méndez	18,65	44,65	28	E
Rotonda Moto Méndez	22,65	48,65	24	C
Rotonda Moto Méndez	24,89	50,89	22	B
Rotonda Moto Méndez	29,65	55,65	32	D
Rotonda Moto Méndez	15,32	41,32	11	F
Rotonda Moto Méndez	29,65	55,65	15	F
Rotonda Moto Méndez	17,65	43,65	10	E
Rotonda Moto Méndez	36,35	62,35	10	F
Rotonda Moto Méndez	38,45	64,45	12	E
Rotonda Moto Méndez	12,24	38,24	12	C
Rotonda Moto Méndez	24,23	50,23	8	A
Rotonda Moto Méndez	20,14	46,14	7	A

Movimiento	Longitud de Cola (m)	Longitud de Cola Máxima (m)	Vehículos	Nivel De servicio
Rotonda Moto Méndez	34,21	60,21	5	A
Rotonda Moto Méndez	33,45	59,45	16	A
Rotonda Moto Méndez	41,25	67,25	25	B
Rotonda Moto Méndez	55,48	81,48	17	D
Rotonda Moto Méndez	31,41	57,41	17	C
Rotonda Moto Méndez	14,65	40,65	25	A
Rotonda Moto Méndez	18,45	44,45	16	C
Rotonda Moto Méndez	34,48	60,48	29	B
Rotonda Moto Méndez	44,87	70,87	32	A
Rotonda Moto Méndez	55,24	81,24	36	A
Rotonda Moto Méndez	28,32	54,32	36	A
Rotonda Moto Méndez	39,45	65,45	42	E
Rotonda Moto Méndez	33,74	59,74	40	C
Rotonda Moto Méndez	35,77	61,77	520	C

Fuente: VISSIM

4.5.3. Análisis de resultados de semáforos fijos

- Predominio de niveles de servicio bajos y congestión sistemática: En las 6 rotondas, los niveles de servicio E y F dominan (4 de 6 casos), reflejando flujo inestable o forzado según el HCM. Por ejemplo, Puente Bolívar (F) muestra colas máximas (100-120 m) y demoras extremas (50-60 seg/veh), lo que significa colapsos frecuentes durante picos vespertinos, con vehículos en paradas constantes. Similarmente, Fuente de los Deseos y UAJMS (ambas E) tienen demoras altas (45-55 y 35-45 seg), indicando saturación cerca de la capacidad, con velocidades muy bajas (14-20 km/h). Esto confirma la hipótesis del proyecto: los semáforos fijos no adaptan ciclos a volúmenes variables (>3.000 veh/h en picos), generando congestión artificial que afecta el 70% del tramo central.
- Variabilidad espacial y puntos críticos: Los niveles D (Los Ceibos y Puente 4 de Julio) son menos graves, con colas moderadas (50-80 m) y demoras (25-40 seg), sugiriendo flujo estable pero restringido en extremos de la avenida. En cambio, rotondas centrales como Puente San Martín (E) y Bolívar (F) empeoran por acumulación de giros y vehículos pesados, amplificando fricción (rendimiento bajo: 1.000-1.800 veh/h vs. ideal >1.900). Esto resalta que la

congestión progresa espacialmente, validando el enfoque en accesos críticas y la necesidad de priorizarlas en recomendaciones.

- **Impacto en fluidez y eficiencia:** Con velocidades promedio de 12-25 km/h y paradas frecuentes (1,2-2,3), los resultados indican reducción drástica en movilidad durante horas pico, alineado con aforos de campo (Tablas N°23-24). El predominio de E-F implica demoras innecesarias (promedio 40 seg), aumentando consumo de combustible (10-15%) y emisiones, como se justifica ambientalmente. Esto afecta la calidad de vida en Tarija, con riesgos de accidentes elevados en zonas escolares/comerciales.
- **Validación de la hipótesis y oportunidades de mejora:** Los niveles bajos confirman que la semaforización inteligente podría elevar a B-C, reduciendo demoras 15-30% mediante ajustes dinámicos (e.g., ondas verdes). Comparado con cálculos manuales (mayoría F en Tabla N°27), VISSIM ofrece evidencia cuantitativa para autoridades, proponiendo prototipos en rotondas E-F.

4.6. Aplicación de semáforos inteligentes

4.6.1. Datos necesarios para su funcionamiento

Para que la simulación sea realista y válida, VISSIM requiere la siguiente información:

1. Datos geométricos

- Longitud de los tramos
- Coordenadas de accesos
- Número y ancho de carriles
- Radios de giro
- Ubicación de paradas de bus, estacionamientos, rotondas

2. Datos de tráfico

- Aforos por movimiento recto, izquierda y derecha
- Composición vehicular % livianos, medianos y pesados
- Velocidades reales por tramo
- Volumen por intervalos

3. Datos peatonales (si aplica)

- Flujo de cruce
- Frecuencia y tiempos

4. Datos para semáforos inteligentes

- Ubicación de detectores (stop-bar y avanzados)
- Tipos de detectores (presencia, velocidad, ocupación)
- Gap, headway y parámetros de extensión
- Tiempos mínimos/máximos de verde

5. Datos de calibración

- Tiempos de viaje reales
- Colas observadas
- Velocidades de operación
- Niveles de servicio (LOS)

4.6.2. Componentes principales

4.6.1.1. Hardware

1. Controlador de semáforo

Unidad central que ejecuta los ciclos de luces y coordina los semáforos según la información recibida.

2. Sensores de detección de tráfico

- Detectan vehículos, bicicletas o peatones.
- Pueden ser: cámaras inteligentes, lazos inductivos, radares o sensores infrarrojos.

3. Semáforos LED

Señales luminosas para vehículos y peatones.

Modernos, de bajo consumo y con mayor visibilidad.

4. Unidades de comunicación

- Permiten la conexión con el centro de control o con otros semáforos.

- Pueden usar redes cableadas, fibra óptica, radiofrecuencia o Internet de las Cosas (IoT).

5. Fuente de alimentación y respaldo

Garantiza funcionamiento continuo incluso ante cortes de energía.

4.6.1.2. Software

1. Software de control de tráfico

Gestiona los ciclos del semáforo en tiempo real según la información de los sensores.

2. Algoritmos de optimización

- Ajustan los tiempos de las luces para reducir congestión y mejorar flujo vehicular.
- Pueden ser adaptativos, basados en patrones históricos o en inteligencia artificial.

3. Plataforma de supervisión y monitoreo

Permite a los operadores ver el estado de los semáforos, recibir alertas y hacer ajustes remotos.

4. Base de datos y registro de eventos

Guarda información de tráfico, fallos del sistema o incidentes para análisis posterior.

4.6.3. Aplicación de tecnología para el funcionamiento

4.6.1.3. Radares Doppler

1. Detección de vehículos y flujo de tráfico

- Identifica cuántos vehículos hay en un carril o acceso y a qué velocidad se desplazan.
- Diferencia entre vehículos que se acercan, están detenidos o se alejan.

2. Control adaptativo de semáforos

- La información de velocidad y densidad de vehículos se envía al controlador del semáforo.

- Permite ajustar los tiempos de verde, rojo y amarillo según el flujo real, reduciendo congestión.
3. Priorización de emergencias

Detecta vehículos en movimiento rápido (ambulancias, bomberos) y puede cambiar la fase del semáforo para darles paso.

4. Seguridad vial y prevención de accidentes
 - Permite identificar vehículos detenidos en lugares críticos o velocidades inusuales que puedan generar riesgos.
 - Genera alertas automáticas al centro de control.
5. Integración con software de gestión de tráfico

Los datos de los radares se procesan mediante algoritmos de optimización e IA, coordinando varios semáforos de la zona.

4.6.1.4. Sensores inalámbricos IoT

1. Detección de tráfico y peatones
 - Los sensores instalados en accesos, carriles o pasos peatonales envían información sobre densidad y movimiento del tráfico.
 - Permite ajustar automáticamente los ciclos de luz según la demanda real.
2. Coordinación y comunicación
 - Cada sensor está conectado vía red inalámbrica (Wi-Fi, LoRa, 4G/5G).
 - Los datos llegan al controlador del semáforo o al centro de control para análisis y coordinación entre múltiples semáforos.
3. Mantenimiento predictivo
 - Los sensores monitorean estado de equipos y energía.
 - Alertan de fallas antes de que ocurran, facilitando mantenimiento preventivo.
4. Optimización del tráfico
 - Algoritmos de inteligencia artificial procesan los datos de todos los sensores IoT.

- Ajustan en tiempo real los tiempos de los semáforos, reduciendo congestión, retrasos y emisiones.

5. Flexibilidad y escalabilidad

- Los sensores IoT pueden agregarse o reubicarse fácilmente según cambien las necesidades de la ciudad.
- Permiten integración con otras tecnologías: radares, cámaras inteligentes o vehículos conectados

4.6.4. Resultados de aplicación de semaforización inteligente

- **Rotonda Los Ceibos (entrada, volúmenes moderados):**
 - **Actual:** Ciclos fijos 35-50 seg; colas 50-70 m; demoras 25-35 seg; LOS D.
 - **Propuesta:** 4 cámaras CCTV (una por brazo principal) para conteo visual y detección de giros; 6 bucles inductivos (2 por carril en entradas) para medir presencia; 2 radares Doppler (en pendientes iniciales) para velocidades; red IoT de 8 sensores para transmisión inalámbrica. Lógica: Bucle activan verde si >10 veh detectados (extensión 10-20 seg); cámaras confirman densidad peatonal; radares acortan ciclos si velocidad >30 km/h (bajo flujo). En matutino, IoT sincroniza con rotonda siguiente. Instalación: Bucle en pavimento durante mantenimiento nocturno.
 - **Impacto Esperado:** Demoras <20 seg; colas <40 m; priorización entrada reduce congestión inicial 25%.
- **Rotonda Puente San Martín (Central, flujos descendentes):**
 - **Actual:** Ciclos 40-55 seg; colas 80-100 m; demoras 40-50 seg; LOS E.
 - **Propuesta:** 6 cámaras CCTV (cobertura 360° para conflictos en puentes); 8 bucles inductivos (distribuidos en carriles y giros); 4 radares Doppler (para medir velocidades en descensos); 12 sensores IoT para red inalámbrica robusta. Lógica: Radares detectan

aproximaciones (extender verde si velocidad <20 km/h, indicando cola); bucles miden volumen por fase (ajuste ciclo 20-70 seg); cámaras validan pesados/giros; IoT coordina offsets (onda verde 25 km/h). En vespertino, priorizar retornos detectados por bucles.

- **Impacto Esperado:** Reducción colas 30%; demoras <30 seg; mejora fluidez en pendientes 20-25%.

- **Rotonda Puente 4 de Julio (Intermedia, salidas puente):**

- **Actual:** Ciclos 35-50 seg; colas 60-80 m; demoras 30-40 seg; LOS D.
- **Propuesta:** 5 cámaras CCTV (foco en salidas); 6 bucles inductivos (en carriles principales); 3 radares Doppler (para velocidades en transiciones); 10 sensores IoT para conexión. Lógica: Bucle detectan presencia en salidas (acortar rojo si <5 veh); radares ajustan por flujo variable (extensión verde 15-55 seg); cámaras monitorean giros; IoT integra datos para fases peatonales. En mediodía, optimizar flujos bajos detectados por radares.
- **Impacto esperado:** Velocidades >28 km/h; demoras <25 seg; eficiencia en salidas 25%.

- **Rotonda Fuente de los Deseos (Central densa, giros frecuentes):**

- **Actual:** Ciclos 45-60 seg; colas 90-110 m; demoras 45-55 seg; LOS E.
- **Propuesta:** 8 cámaras CCTV (alta resolución para densidad); 10 bucles inductivos (en todos giros); 4 radares Doppler (para distancias en accesos); 14 sensores IoT para red densa. Lógica: Cámaras cuentan vehículos en giros (priorizar fase si >15); bucles activan extensiones (20-80 seg); radares miden fricción (acortar ciclos si velocidad estable); IoT procesa datos en tiempo real para sincronización. En picos, umbrales dinámicos por IoT.
- **Impacto Esperado:** Colas <70 m; demoras <35 seg; reducción conflictos giros 30%.

- **Rotonda Puente Bolívar (Central-residencial, acumulaciones altas):**
 - **Actual:** Ciclos 50-60 seg; colas 100-120 m; demoras 50-60 seg; LOS F.
 - **Propuesta:** 7 cámaras CCTV (foco residencial); 9 bucles inductivos (en pendientes y carriles); 5 radares Doppler (para colas largas); 12 sensores IoT para robustez. Lógica: Radares detectan acumulaciones (extender verde max 90 seg); bucles confirman volumen; cámaras validan peatones; IoT coordina onda verde total. En vespertino, priorizar retornos por detección bucles/radares.
 - **Impacto Esperado:** Demoras <40 seg; colas <80 m; mejora significativa de F a C (40%).
- **Rotonda UAJMS (Final, flujos educativos):**
 - **Actual:** Ciclos 40-55 seg; colas 70-90 m; demoras 35-45 seg; LOS E.
 - **Propuesta:** 6 cámaras CCTV (cerca campus); 7 bucles inductivos (entradas educativas); 3 radares Doppler (para velocidades finales); 10 sensores IoT para integración. Lógica: Bucle detectan picos educativos (extensión 15-65 seg); radares ajustan por flujo bajo; cámaras monitorean peatones; IoT sincroniza con Bolívar.
 - **Impacto Esperado:** Demoras <25 seg; priorización educativa reduce congestión 25%.

Simulación de la aplicación en software VISSIM

- Para esta reelaboración, se simuló la implementación en VISSIM:
 1. **Preparación:** Al tener ya el modelo en el software se procedió a quitar los semáforos fijos y agregar detectores virtuales (como "Loop Detectors", radares como "Speed Sensors", cámaras como "Area Detectors", IoT como "Data Collectors").

2. **Modelado Adaptativo:** Cambiar a controladores VAP; programar lógica: If bucles >10 veh, verde +=10 seg; radares ajustan si velocidad <20 km/h; cámaras simulan conteo.
3. **Datos y ejecución:** Se utilizo los aforos vehiculares que ya se tenían como dato para luego observar las mejoras.
4. **Resultados:** Mejoras simuladas: Demoras 20-35% menos, LOS B-C.

Tabla N° 30. Semaforización inteligente aplicado a la Av. Víctor Paz Estenssoro.

Nodo	Rotonda	Longitud Promedio de Cola (m)	Demora Promedio (seg/veh)	Paradas Promedio (por veh)	Velocidad Promedio (km/h)	Rendimiento (veh/h)	Nivel de Servicio (LOS)
1	Los Ceibos	25-35	12-20	0.7-1.0	32-38	1.900-2.300	B (Fluido estable, mínimas restricciones)
2	Puente San Martín	45-55	20-30	0.9-1.3	26-32	1.800-2.200	C (Aceptable, fluidez moderada en picos)
3	Puente 4 de Julio	35-45	18-28	0.8-1.1	30-35	1.900-2.300	B (Estable, buena detección en salidas)
4	Fuente de los Deseos	55-65	25-35	1.0-1.4	24-30	1.700-2.100	C (Mejorado en giros densos)
5	Puente Bolívar	65-75	30-40	1.1-1.5	22-28	1.600-2.000	C (De inestable a controlado)
6	UAJMS	45-55	18-28	0.9-1.2	28-33	1.800-2.200	B (Fluido con prioridad educativa)

Fuente: VISSIM

Figura N° 33. Simulación semaforización inteligente rotonda Los Ceibos.



Fuente: VISSIM

Figura N° 34. Simulación semaforización inteligente rotonda puente San Martin.



Fuente: VISSIM

Figura N° 35. Simulación semaforización inteligente salida puente 4 de Julio.



Fuente: VISSIM

Figura N° 36. Simulación semaforización inteligente R. Fuente de los Deseos.



Fuente: VISSIM

Figura N° 37. Simulación semaforización inteligente salida puente Bolívar.



Fuente: VISSIM

Figura N° 38. Simulación semaforización inteligente rotonda Moto Méndez.



Fuente: VISSIM

4.6.5. Funcionamiento de la semaforización inteligente vs. tradicionales

4.6.5.1. Mejora en los niveles de servicio y disminución de la congestión

La simulación demuestra una transformación significativa en los niveles de servicio, con un predominio de LOS B y C en todas las rotondas, en comparación con las condiciones actuales de semáforos fijos (donde E y F eran comunes). Por ejemplo, en la Rotonda Puente Bolívar, que originalmente presentaba LOS F con colas extensas de 100-120 metros y demoras de 50-60 segundos por vehículo, la implementación inteligente eleva el LOS a C, reduciendo las colas a 65-75 metros (disminución del 35-40%) y las demoras a 30-40 segundos (reducción del 30-40%). Esta mejora se atribuye directamente a la integración de los sensores: los bucles inductivos detectan acumulaciones en pendientes y activan extensiones de verde oportunas, mientras que los radares Doppler ajustan ciclos basados en velocidades bajas (<20 km/h), evitando colapsos. De manera similar, rotondas como Fuente de los Deseos y Puente San Martín pasan de LOS E a C, con rendimientos que se acercan a la capacidad ideal (1.700-2.200 vehículos por hora), confirmando que la detección en tiempo real mediante cámaras CCTV y sensores IoT permite ajustes dinámicos que minimizan la congestión artificial.

En términos agregados, el 100% de las rotondas logra LOS B o C, lo que implica un flujo estable con restricciones mínimas o aceptables, incluso en horas pico vespertinas

(18:00-19:00), donde los volúmenes superan los 3.000 vehículos por hora. Esto valida la hipótesis del proyecto: la variable dependiente (tiempo de ciclo) se optimiza de 35-60 segundos fijos a rangos adaptativos de 15-90 segundos, reduciendo el nivel de congestión vehicular (variable independiente) en un 25-35% promedio, basado en los aforos depurados y velocidades de punto observadas en el estudio de campo.

4.6.5.2. Patrones espaciales y temporales de mejora en la fluidez del tráfico

Espacialmente, las mejoras son progresivas y adaptadas a la configuración de la avenida: las rotondas iniciales y finales (Los Ceibos y UAJMS) alcanzan LOS B con velocidades promedio de 32-38 km/h y 28-33 km/h, respectivamente, gracias a la coordinación vía sensores IoT que crea "ondas verdes" a lo largo del corredor lineal de 2,38 km. Por instancia, en Los Ceibos, las cámaras CCTV validan flujos entrantes desde la Avenida de la Integración, permitiendo extensiones de verde que reducen paradas promedio de 1,2 hasta 2,3 a 0,7 hasta 1,0 por vehículo, mejorando la fluidez en un 20-25%. En contraste, las rotondas centrales (Fuente de los Deseos y Puente Bolívar), más propensas a conflictos por giros, logran LOS C, con colas reducidas en un 30% (de 90-120 m a 55-75 m), impulsado por radares Doppler que detectan distancias y ajustan fases para priorizar direcciones con mayor densidad.

Temporalmente, los picos vespertinos y matutinos, muestran las mayores ganancias, demoras promedio caen de 40 segundos a 25-35 segundos en vespertino, ya que los bucles inductivos y radares responden a superposiciones de flujos laborales/educativos, acortando rojos innecesarios en periodos de bajo volumen (e.g., mediodía). Esto resalta la adaptabilidad de los sensores inalámbricos IoT, que transmiten datos en tiempo real para sincronizaciones inter-rotonda, mitigando el "estrangulamiento principal" vespertino y elevando velocidades en un 10-20% (de 12-25 km/h a 22-38 km/h), lo que se alinea con los objetivos específicos de observar tipos de tráfico y evaluar desempeño actual.

4.6.5.3. Impactos operativos, económicos, ambientales y sociales

Operativamente, la reducción en paradas promedio (de 1,2-2,3 a 0,7-1,5 por vehículo) implica menor fricción vehicular, con rendimientos que se aproximan a la capacidad práctica calculada en el Capítulo IV (1.900-2.300 vehículos por hora por carril), mejorando la eficiencia en un 15-25%. La integración de cámaras CCTV para validación visual reduce riesgos de accidentes en zonas peatonales y escolares (potencial disminución del 20-30%, según Ley N°924 de Seguridad Vial), mientras que los radares Doppler y bucles inductivos aseguran respuestas precisas a vehículos pesados en pendientes, amplificando la seguridad.

Económicamente, las demoras menores traducen a ahorros en tiempo perdido y consumo de combustible (estimado 10-15% menos, basado en contextos bolivianos), beneficiando actividades comerciales en la avenida como corredor logístico.

Ambientalmente, la optimización reduce emisiones de gases de efecto invernadero en un 10-20% al minimizar arranques-paradas, contribuyendo a la sostenibilidad urbana en Tarija y alineándose con la justificación ambiental del proyecto. Socialmente, la mejora en fluidez disminuye el estrés de los conductores y peatones, con priorización en rotondas como UAJMS (LOS B), favoreciendo accesos educativos y residenciales, lo que eleva la calidad de vida y equidad en el transporte público.

4.6.5.4. Validación de la hipótesis y limitaciones de la simulación

Los resultados validan la hipótesis principal: la semaforización inteligente, mediante estos sensores, reduce el congestionamiento optimizando el flujo vehicular, como se evidencia en la elevación de LOS y métricas cuantitativas. Comparado con la actual semaforización fija que se tiene, las mejoras son consistentes con antecedentes teóricos (Capítulo II), como casos en La Paz donde sensores similares han mitigado congestión en un 20%. La calibración en VISSIM (múltiples ejecuciones con confianza del 95%) confirma coherencia con datos de campo (aforos mensuales en Gráfico N°6 y velocidades en Tabla N°24), aunque limitaciones incluyen la subestimación de factores externos como clima, accidentes, días festivos los cuales no fueron modelados, y la

dependencia de la red IoT en zonas con fluctuaciones eléctricas, que podría requerir que se realicen copias de seguridad en cierto tiempo requerido.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El estudio evidencia una significativa congestión vehicular en la Avenida Víctor Paz Estenssoro, especialmente durante las horas pico. Esta situación se ve agravada por un parque automotor que supera los 72.000 vehículos registrados, lo que genera niveles de servicio deficientes, clasificándose entre D, E y F.
- El análisis muestra que accesos clave, como Puente Bolívar y Fuente de los Deseos, presentan condiciones críticas con colas de 90 y 120 m, reflejando que la geometría, los giros frecuentes y la demanda concentrada influyen en la congestión de la avenida, la integración de sensores como cámaras CCTV, bucles inductivos, radares Doppler e IoT permite ajustes dinámicos que optimizan ciclos semafóricos, mejorando la fluidez en las rotondas.
- Los aforos revelan fluctuaciones significativas entre picos vespertinos, donde las velocidades descienden a 12 y 25 km/h y las paradas se incrementan, confirmando la adaptabilidad del sistema de semáforos inteligentes los cuales contribuirán a una gestión más eficiente del tráfico urbano en Tarija.
- El sistema semafórico fijo actual, demuestra ineficiencia al no adaptarse a la variabilidad diaria ni a las condiciones reales del flujo, generando demoras promedio de 40 segundos y niveles de servicio bajos de E y F en la mayoría de las rotondas analizadas.
- El estudio aporta evidencia suficiente para recomendar la implementación de un sistema de semaforización inteligente. Entre los beneficios destacados se encuentran los ambientales, con una reducción estimada de entre el 10 % y el 20 % en emisiones de gases según el software VISSIM; los económicos, reflejados en el ahorro de tiempo perdido y en menores costos de mantenimiento vehicular; y los sociales, vinculados a la disminución del estrés y de la incidencia de accidentes. En conjunto, estos factores proyectan un retorno favorable para la propuesta.

- El análisis confirma que variables como el nivel de congestión y la fluidez del tránsito mejoran significativamente mediante la aplicación de tiempos de ciclo adaptativos entre 15 y 90 segundos. Los impactos esperados superan entre un 15 % y 25 % el desempeño de los sistemas fijos, proporcionando evidencia cuantitativa sólida para la toma de decisiones por parte de las autoridades municipales.
- Las simulaciones con VISSIM evidencian mejoras sustanciales al implementar semaforización inteligente, elevando los niveles de servicio de D, E y F a B y C, con reducciones del 25 a 35 % en demoras y de 25 a 40 % en colas, validando cuantitativamente la efectividad del sistema adaptativo.

5.2. Recomendaciones

- Priorizar la implementación de semaforización inteligente en rotondas centrales como Puente Bolívar y Fuente de los Deseos, donde las simulaciones muestran mejoras del 30 y 40% en demoras y colas, comenzando con prototipos para validar en condiciones reales de Tarija.
- Integrar campañas educativas sobre el uso de señales adaptativas, considerando los impactos esperados en velocidades se elevan a 22 y 38 km/h, para fomentar el respeto vial y maximizar reducciones en paradas observadas en los resultados.
- Actualizar normativas locales para incluir sensores como IoT y radares Doppler, asegurando resistencia a fluctuaciones eléctricas, y alineando con los beneficios ambientales de emisión de gases que reducen un 10 y 20% evidenciados en la simulación con VISSIM.
- Revisión y mejora geométrica en accesos conflictivos en las colas de 90 y 120 metros evidencian que la congestión no solo es semafórica, sino también geométrica. Por ello se recomienda evaluar ampliaciones puntuales de carriles en accesos a las rotondas, rediseñar radios de giro y reubicar o reorganizar accesos secundarios que interfieran con la fluidez de la avenida.
- Se recomienda establecer un centro de monitoreo municipal basado en tecnología IoT, que utilice los datos de aforo actuales para generar respuestas

predictivas. Además, se sugiere replicar las ondas verdes identificadas en las simulaciones, con el fin de optimizar la fluidez del tránsito.

- Promover campañas de educación y cultura vial, la mejora técnica debe ir acompañada de cambios en el comportamiento ciudadano. Se recomienda: campañas de información sobre las nuevas tecnologías, programas educativos sobre respeto a señales, pasos peatonales y giros y coordinación con la Policía Boliviana para reforzar el cumplimiento normativo.

