

Universidad Autónoma De Baja California
Facultad De Ingeniería



**“IMPLEMENTACIÓN DEL ENFOQUE BIM EN LA
ADMINISTRACIÓN DE INTERSECCIONES EN VIALIDADES
URBANAS”**

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

TESIS

Grado:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Iván Darío Félix Rincón

Director:

DR. Alejandro Sánchez Atondo

Codirector:

DR. Leonel Gabriel García Gómez

Mexicali, Baja California, noviembre del 2025

RESUMEN

El enfoque tradicional evaluación y mantenimiento de intersecciones consta de intervenciones puntuales, reactivas y sin coordinación entre disciplinas, esto ha mostrado límites como: gestión fragmentada, mantenimiento cíclico y uso ineficiente del recurso público, sin resolver la congestión ni mejorar de forma sostenida la experiencia del usuario. Se requiere, por tanto, una metodología de evaluación sustentada en BIM que integre de manera simultánea diseño geométrico, demanda (TDPA) actual y proyectada, condición de la superficie de rodadura, control semafórico y señalamiento, para comparar escenarios con base técnica común y orientar decisiones costo-eficientes.

Bajo este marco, el objetivo general es identificar y valorar los beneficios, en términos de eficiencia operativa y soporte a la toma de decisiones, del uso del enfoque BIM en la administración y mantenimiento de intersecciones urbanas; se complementa con objetivos específicos relativos a la selección de software, el modelado del estado actual y la obtención de una metodología replicable. La hipótesis postula que la aplicación del enfoque BIM en la administración y operación de intersecciones urbanas permite plantear intervenciones más eficientes que un enfoque tradicional.

El caso de estudio se ubica en Mexicali, sobre la Carretera Mexicali–San Felipe, e incluye tres intersecciones urbanas semaforizadas: con Pórticos del Valle, General Santiago Vidaurri (intersección prioritaria) y Avenida Real. Se trata principalmente de intersecciones tipo “T”, con isletas separadoras, cruces peatonales y paradas de transporte público; el diagnóstico de campo incorporó aforos manuales y levantamiento geométrico para alimentar los modelos de simulación.

La metodología se estructura en cuatro etapas: (1) Diagnóstico y proyecciones (M1 y M2); (2) Propuestas; (3) Validación; y (4) Combinación. Dentro de la primera etapa de realiza un levantamiento de las condiciones actuales del caso de estudio, considerando aspectos geométricos, superficie de rodadura y aforos vehiculares. En la segunda etapa se desarrollan tres modelos complementarios: RG (Rediseño Geométrico), verificado con Civil 3D y Vehicle Tracking; DCI (Dispositivos de Control de Intersecciones), optimizado con Synchro y verificado en Vissim; y PI (Plan de Intervención de la superficie de rodadura) a 10 años, estructurado en HDM-4 conforme a estándares de conservación. La validación exige que cada propuesta mejore el nivel de servicio frente a M1; posteriormente, la combinación compara todas las permutaciones y busca la integración RG+DCI+PI como alternativa más robusta. Concluyendo que la opción que involucra todos los modelos desarrollados dentro de la metodología es el que aporta mas beneficios al caso de estudio, mejorando; el nivel de servicio, la superficie de rodadura y condiciones geométricas de una manera integral.

Finalmente, el trabajo contribuye con una metodología BIM aplicada a intersecciones urbanas que articula geometría, operación y conservación bajo un mismo flujo de datos, con capacidad de replicarse en contextos similares y de sustentar decisiones de intervención desde el diagnóstico hasta la evaluación integrada de escenarios.

ABSTRACT

The traditional approach to evaluating and maintaining intersections consists of isolated, reactive interventions with no coordination between disciplines. This has revealed several limitations, including fragmented management, cyclical maintenance, and inefficient use of public resources, without solving congestion or sustainably improving user experience. Therefore, an evaluation methodology based on BIM is needed, one that simultaneously integrates geometric design, current and projected demand (AADT), pavement surface condition, traffic signal control, and signage. This integration would allow for scenario comparison using a shared technical basis and guide cost-effective decision-making.

Within this framework, the general objective is to identify and assess the benefits, in terms of operational efficiency and decision-making support, of using the BIM approach in the administration and maintenance of urban intersections. This is complemented by specific objectives related to software selection, current-state modeling, and the development of a replicable methodology. The hypothesis proposes that applying the BIM approach to the management and operation of urban intersections enables more efficient interventions than the traditional approach.

The case study is located in Mexicali, along the Mexicali–San Felipe Highway, and includes three signalized urban intersections: Pórticos del Valle, General Santiago Vidaurri (the priority intersection), and Avenida Real. These are mainly “T” type intersections, featuring median islands, pedestrian crossings, and public transport stops. The field diagnosis included manual traffic counts and geometric surveying to support simulation models.

The methodology is structured into four stages: (1) Diagnosis and projections (M1 and M2); (2) Proposals; (3) Validation; and (4) Combination. The first stage involves surveying the current conditions of the case study, taking into account geometric features, pavement conditions, and vehicular counts. In the second stage, three complementary models are developed: GD (Geometric Redesign), validated using Civil 3D and Vehicle Tracking; ITD (Intersection Traffic Devices), optimized with Synchro and verified in Vissim; and IM (Intervention Plan for pavement surface) over a 10-year horizon, structured in HDM-4 following conservation standards. Validation requires that each proposal improves the level of service compared to M1. Subsequently, the combination stage compares all permutations and identifies the integration of GD+ITD+IM as the most robust alternative. It concludes that the option integrating all models within the methodology delivers the greatest benefits to the case study, enhancing the level of service, pavement quality, and geometric conditions in an integrated manner.

Finally, this work contributes a BIM-based methodology applied to urban intersections that articulates geometry, operation, and conservation under a unified data flow. It is capable of being replicated in similar contexts and supporting intervention decisions from diagnosis through to integrated scenario evaluation.

Agradecimientos

Primeramente, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, a mi hermano y a toda mi familia, quienes me brindaron su apoyo incondicional a lo largo de mi formación académica, no solo durante esta etapa de maestría, sino también a lo largo de toda mi carrera universitaria. Su amor, paciencia y fe en mí fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

Extiendo mi sincero agradecimiento al Dr. Alejandro Sánchez Atondo por brindarme la oportunidad de desarrollar esta investigación bajo su dirección y por su constante acompañamiento como asesor de tesis. De igual forma, expreso mi gratitud al Dr. Leonel Gabriel García Gómez, quien se desempeñó como codirector de esta investigación, por su valiosa guía, atención cercana y apoyo durante todo el proceso académico.

Quiero reconocer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por confiar en mi potencial y respaldar mi formación académica, lo cual hizo posible que me dedicara de lleno a este proyecto.

Agradezco de manera especial a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), mi alma máter, por haber sido el espacio donde me formé tanto en lo profesional como en lo personal. Esta institución ha sido clave en mi desarrollo como ingeniero civil y como ser humano comprometido con el bienestar social y el progreso técnico.

No puedo dejar de agradecer a todos los maestros de la carrera de Ingeniería Civil, quienes, con su dedicación, enseñanzas y ejemplo, enriquecieron significativamente mi formación académica. Cada uno de ellos contribuyó, directa o indirectamente, al desarrollo de esta tesis, proporcionándome herramientas, conocimientos y motivación para afrontar los retos del camino profesional.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Problemática.....	16
1.2 Objetivos de Investigación	17
1.3 Hipótesis.....	17
1.4 Pregunta de Investigación	18
2. MARCO CONCEPTUAL	19
2.1 Intersección vial y Tipología.....	19
2.2 Aforos Vehiculares, Capacidad y Congestión vial	19
2.3 Niveles de servicio.....	22
2.4 Fundamentos del Building Information Modeling (BIM)	23
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	26
3.1 Administración y gestión de vialidades urbanas.....	26
3.2 BIM dentro de la ingeniería civil	30
3.3 Antecedentes de aplicaciones previas del Enfoque BIM en Intersecciones	32
4. METODOLOGÍA	38
4.1 Etapa 1- Diagnóstico y Proyecciones	39
4.2 Etapa 2- Propuestas.....	42
4.3 Etapa 3- Validación de Propuestas.....	43
4.4 Etapa 4- Combinación de Propuestas	43
5. Resultados.....	45
5.1 Resultados etapa 1- Diagnóstico	45
5.2 Resultados etapa 2- Propuestas.....	66
5.2.1 Rediseño geométrico del caso de estudio (Modelo RG).....	66
5.2.2 Rediseño de dispositivos de control de intersecciones (Modelo DCI).....	78
5.2.3 Plan de intervención en la superficie de rodadura (Modelo PI)	82
5.3 Resultados etapa 3- Validación	86
5.3.1 Validación modelo RG	86
5.3.2 Validación modelo DCI.....	88
5.3.3 Validación modelo PI	89
5.4 Resultados etapa 4- Combinación de modelos.....	93
6. Conclusiones	99
6.1 Conclusión sobre la metodología desarrollada	100
7. BIBLIOGRAFÍA	102

Índice de Figuras

Figura 1.1- Distribución de vehículos por continente. Fuente: extraído de Hedges & Company en 2023.....	10
Figura 4.1- Diagrama metodológico	39
Figura 4.2- Logo software ArcGIS	40
Figura 4.3- Logo Civil 3D	42
Figura 4.4- Logo Vehicle Tracking.....	42
Figura 4.5- Logo PTV Vissim.	43
Figura 4.6- Synchro 11.....	43
Figura 4.7- Logo HDM-4.	43
Figura 4.8- Proceso de combinación de propuestas.....	44
Figura 5.1 - Sección transversal Carretera Mexicali - San Felipe.	46
Figura 5.2 - Tipo de vialidades.	47
Figura 5.3- Población por AGEB.	48
Figura 5.4- Accidentes de tránsito.....	49
Figura 5.5- Personal ocupado por establecimiento.....	50
Figura 5.6- Intersección Carretera Mexicali San Felipe con Avenida Real.	51
Figura 5.7- Intersección Carretera Mexicali San Felipe con Pórticos del Valle.	52
Figura 5.8- Intersección Carretera Mexicali San Felipe con General Santiago Vidaurri.....	53
Figura 5.9- Visualización de nube de puntos “.dwg”.	56
Figura 5.10- Trazado del caso de estudio dentro del software Civil 3D.	56
Figura 5.11- Modelado visual 3D de la intersección carretera Mexicali-San Felipe con Pórticos del Valle.	60
Figura 5.12- Modelado visual 3D de la intersección carretera Mexicali-San Felipe con Gral. Santiago Vidaurri.	60
Figura 5.13- Modelado visual 3D de la intersección carretera Mexicali-San Felipe con Av. Real.	60
Figura 5.14- Modelo de micro simulación vial generado en Vissim.	61
Figura 5.15- Nivel de servicio presente en cada intersección.....	62
Figura 5.16- Regularidad del IRI dentro de 10 años	63
Figura 5.17- Área fisurada total dentro de 10 años	63
Figura 5.18- Área de baches dentro de 10 años	64
Figura 5.19- Ecuación de la gráfica usada para la proyección del crecimiento vehicular	65
<u>Figura 5.20- Nivel de servicio dentro de 10 años en cada intersección</u>	<u>66</u>

Figura 5.21- Plano RG-01, transición de 2 a 3 carriles de Oeste a Norte.....	67
Figura 5.22- Plano RG-02, maniobra de retorno de vehículos pesados de Norte a Norte....	68
Figura 5.23- Plano RG-3, maniobra de retorno de vehículos pesados.....	69
Figura 5.24- Plano RG-4, maniobra de retorno de vehículos pesados.....	70
Figura 5.25- Plano RG-5, maniobra de retorno de vehículos pesados.....	71
Figura 5.26- Plano RG-6, transición de 2 a 3 carriles de Oeste a Norte.....	72
Figura 5.27- Plano RG-7, movimiento de retorno de Norte a Norte.....	73
Figura 5.28- Plano RG-8, movimiento de retorno de Sur a Sur.....	74
Figura 5.29- Intersección carretera Mexicali - San Felipe con Calzada Héctor Terán Terán.....	75
Figura 5.30- Plano RG-9, ampliación de radio de giro vuelta a la derecha.....	76
Figura 5.31- Plano RG-10, ampliación radio de giro vuelta a la derecha.....	77
Figura 5.32- Intersección carretera Mexicali - San Felipe con Calle Lisa.....	78
Figura 5.33-. Modelado dentro de Synchro 11 de Intersección carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del Valle	79
Figura 5.34- Modelado dentro de Synchro 11 de Intersección carretera Mexicali - San Felipe con General Santiago Vidaurri	81
Figura 5.35- Modelado dentro de Synchro 11 de Intersección carretera Mexicali - San Felipe con Av. Real	82
Figura 5.36- Curva de deterioro del pavimento	82
Figura 5.37- Índice de Regularidad del IRI del modelo PI	84
Figura 5.38- Porcentaje de área de baches del modelo PI.....	85
Figura 5.39- Porcentaje de área fisurada del modelo PI.....	85
Figura 5.40- Modelado DCI nivel de servicio actual y nuevo del tramo carretero	89
Figura 5.41- Comparación entre el Índice de Regularidad del IRI de ambas alternativas....	91
Figura 5.42- Comparación del porcentaje de área de baches entre ambas alternativas.....	92
Figura 5.43- Comparación del porcentaje de área fisurada entre ambas alternativas	93
Figura 5.44- Proceso de combinación de propuestas.....	94

Índice de Tablas

Tabla 1.1- Vehículos de motor en México registrados en circulación 2019 -2025..	11
Tabla 1.2.- Tabla comparativa del nivel de satisfacción de diversos elementos de infraestructura México 2023.....	12
Tabla 1.3.- Tabla comparativa de las ciudades de México dentro del top 100 de ciudades con mayor congestión vial....	13
Tabla 1.4.- Tabla resultado ENCIG - 2023 para Baja California.....	15
Tabla 2.1.- Definición de nivel de servicio en intersecciones.....	23
Tabla 3.1.-Rangos de calificación del PCI.....	29
Tabla 3.2- Porcentaje de estudio de áreas y subáreas de la ingeniería civil.....	30
Tabla 3.3- Desarrollo de la ingeniería civil dentro de las dimensiones BIM.....	32
Tabla 3.4- Comparación de las características de los antecedentes.....	35
Tabla 4.1- Softwares y funciones para realización del modelo M1.....	41
Tabla 4.2- Softwares y funciones para realización del modelo M2.....	41
Tabla 5.1- Aforos vehiculares intersección carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del Valle.....	54
Tabla 5.2- Aforos vehiculares intersección carretera Mexicali - San Felipe con Gral. Santiago Vidaurri.....	54
Tabla 5.3- Aforos vehiculares intersección carretera Mexicali - San Felipe con Av. Real.....	55
Tabla 5.4- Ciclo semafórico intersección Carretera Mexicali – Pórticos del Valle.....	57
Tabla 5.5- Ciclo semafórico intersección Carretera Mexicali – San Felipe con General Santiago Vidaurri.....	57
Tabla 5.6- Ciclo semafórico intersección Carretera Mexicali – Avenida Real.....	57
Tabla 5.7-. Condición del pavimento carretera Mexicali – San Felipe.....	58
Tabla 5.8- TDPA carretera Mexicali - San Felipe 2014-2023.....	64
Tabla 5.9- Comparación del ciclo semafórico actual y el propuesto para la intersección Carretera Mexicali – Pórticos del Valle.....	79
Tabla 5.10- Comparación del ciclo semafórico actual y el propuesto para la intersección Carretera Mexicali – General Santiago Vidaurri.....	80
Tabla 5.11- Comparación del ciclo semafórico actual y el propuesto para la intersección Carretera Mexicali – Av. Real.....	81
Tabla 5.12- Trabajos a realizar en la alternativa con mantenimiento.....	83
Tabla 5.13- Tabla comparativa “Alternativa con mantenimiento” y “Alternativa sin mantenimiento”.....	90
Tabla 5.14- Tabla comparativa de los modelos generados a partir de la combinación.....	94
Tabla 5.15- Tabla comparativa del LOS obtenido para cada modelo.....	95
Tabla 5.16- Tabla comparativa de factores obtenidos para cada modelo.....	96

Índice de Anexos

ANEXO 1: RESULTADOS DEL SOFTWARE HDM4.....	107
ANEXO 2: PLANOS DEL MODELO RG.....	116

1.INTRODUCCIÓN

Desde la creación del primer automóvil en 1886 por el ingeniero Alemán Carl Benz (Forrester, 2020), la industria automotriz no ha dejado de tomar fuerza, rápidamente se convirtió en el medio de transporte predilecto para trasladarse por tierra a distancias cortas y medianas, de acuerdo a las estimaciones de Hedges & Company en 2023 hubo un aproximado de 1.474 mil millones de vehículos en todo el mundo (Hedges & Company, 2023). Estos se encuentran distribuidos como se muestra en la figura 1.1. No es de sorprender si consideramos que en 2023 se produjeron 93.5 millones de vehículos, un incremento del 10% en comparación con el año anterior (OICA, 2024).

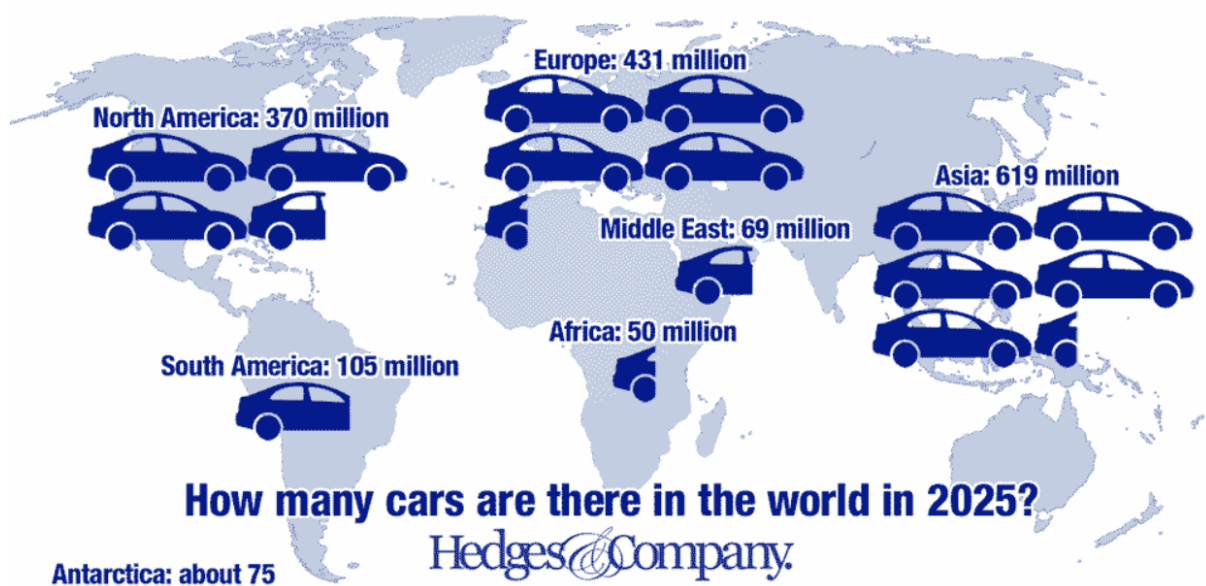


Figura 1.1- Distribución de vehículos por continente. Fuente: extraído de Hedges & Company en 2023

A pesar de que los vehículos son una herramienta que ha permitido el desarrollo de la sociedad, cuando en las ciudades hay más autos intentando circular que espacio disponible en las calles, se genera la congestión vehicular, estos vehículos que se encuentran transitando a velocidad baja provocan un cúmulo de contaminación mayor alrededor de las áreas por donde se desplazan. Un vehículo puede contaminar por tres tipos de emisiones: las emisiones por el tubo de escape, las evaporativas, y el levantamiento de polvo de las calles al desplazarse sobre ellas. Todas estas emisiones generadas por los vehículos son dañinas para la población y degradan de gran manera el medio ambiente (Bull & CEPAL, 2003).

Además de la generación de contaminantes, el hecho de que los vehículos circulen a bajas velocidades provoca indirectamente que los usuarios invierten un mayor tiempo para transportarse afectando a su calidad de vida, dificultando en la realización de actividades cotidianas como; ir al trabajo, escuela, mercados, etc (Pérez, Reátegui &

Mendoza, 2021). Este tiempo pasado en el tráfico podría utilizarse para realizar actividades de esparcimiento.

La problemática de la congestión vehicular es tan amplia que no solo afecta a los usuarios también afecta las vialidades, ya que, a un mayor tiempo de uso se produce un acelerado desgaste en ellas y tienden a presentar fallas antes de cumplir con el tiempo de vida para el cual fueron diseñadas, en caminando a los usuarios buscar vías alternas que estén en mejores condiciones o buscando evitar el congestionamiento, estos vías alternas tienden a ser vialidades secundarias y terciarias sobrepasando las capacidades para las cuales fueron diseñadas y llevándolas a una pronta falla en la superficie de rodamiento, generando un ciclo de desgaste acelerado de la infraestructura vial (Farfán & Pedemonte, 2020).

En México De acuerdo a los datos brindados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), durante los años 2019 al 2025, en promedio hubo un crecimiento de 1, 269, 170 vehículos por año, recalando dentro de esta estadística, la mayor cantidad de vehículos pertenece al transporte particular, siendo en 2025 tres veces mayor que la cantidad de camiones de carga en el país y veinte y ocho veces mayor que la cantidad de camiones de pasajeros (véase tabla 1.1) (INEGI, 2025). En adición el mercado automotriz está presentando un crecimiento después de la emergencia sanitaria por COVID-19, en 2022 las ventas se incrementaron un siete por ciento de acuerdo a la información de (Forbes México, 2023).

VEHICULOS DE MOTOR EN MEXICO REGISTRADOS EN CORCULACION 2019 -2025							
Denominación	Año						
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Automóvil	33,541,093	34,361,715	35,390,425	36,434,606	37,974,028	38,607,470	38,901,607
Camión de pasajeros	450,423	457,620	449,326	465,103	484,157	1,097,996	1,388,624
Camión de carga	10,934,254	10,954,136	11,171,081	11,304,591	11,796,692	12,105,430	12,250,558
Total	44,925,770	45,773,471	47,010,832	48,204,300	50,254,877	51,810,896	52,540,789

Tabla 1.1- Vehículos de motor en México registrados en circulación 2019 -2025. Fuente: elaboración propia a partir de datos del INEGI - Parque Vehicular, 2025.

Con el inevitable crecimiento del parque vehicular en el país es importante contar con una infraestructura de transporte que sea capaz de satisfacer las crecientes necesidades de movilidad. De acuerdo con los mostrado en la tabla 1.2 generada a partir de la Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental (ENCIG) en el país únicamente; el 36.6% de los ciudadanos manifestaron estar satisfechos con la calidad que presentan las calles y avenidas de su localidad, poco más del 30% está conforme con el estado que presentan las carreteras y caminos de tránsito libre (INEGI, 2024), ambos aspectos presentan bajos niveles de aprobación, pero nada en comparación con el grado de satisfacción para la reparación inmediata de baches y coladeras siendo apenas de un 13.1%, demostrando la inconformidad que se tiene por el servicio de mantenimiento urbano actual. En contraste, el 70.4% de la población

encuestada expresó satisfacción hacia el estado de las autopistas de cuota, lo que se puede interpretar como una percepción positiva hacia aquellas vías que son administradas a través de concesionarios.

Hablando de aspectos de seguridad, tan sólo el 35.9% de la población se siente segura y el porcentaje de aceptación para el alumbrado público apenas alcanzó el 43.4%, esto se relaciona ya que influye directamente en la decisión de muchas personas de evitar el uso del transporte público en horarios nocturnos o en zonas poco iluminadas.

TABLA COMPARATIVA ENCIG - 2023		
Elementos de infraestructura	Porcentaje de población satisfecha	Porcentaje de población insatisfecha
Estado de calles y avenidas	36.60%	63.40%
Estado de carreteras y caminos de cuota	33.30%	66.70%
Estado de autopistas con casetas de cuota	70.40%	29.60%
Reparación inmediata de baches y coladeras	13.10%	86.90%
Semáforos funcionales al transitar por las calles y avenidas	64.30%	35.70%
Alumbrado público	43.40%	56.60%
Sensación de seguridad	35.90%	64.10%

Tabla 1.2.- Tabla comparativa del nivel de satisfacción de diversos elementos de infraestructura México 2023. Fuente: elaboración propia a partir de datos del INEGI - Parque Vehicular, 2023.

Dentro del ranking global de ciudades con mayor congestión vial desarrollado por INRIX EN 2024, revela que Ciudad de México se encuentra dentro la cuarta posición mundial, con un promedio de 97 horas perdidas al año por conductor debido a esta problemática de tránsito, sólo por detrás de Estambul, Nueva York y Chicago. Convirtiendo así a la Ciudad de México como la ciudad latinoamericana con mayor congestión, poniendo en evidencia una problemática infraestructura vial la cual comparte con otras grandes urbes densamente pobladas. Guadalajara, Tijuana y Monterrey son las otras tres ciudades mexicanas dentro del top 100 (véase tabla 1.3). El hecho de que estas cuatro ciudades se encuentren dentro de esta lista refleja un

patrón común entre las metrópolis mexicanas, caracterizado por un descontrolado crecimiento urbano, una infraestructura vial rebasada por la demanda, y una preferencia al transporte particular sobre el transporte público.

Al comparar las ciudades mexicanas con ciudades como Londres, París, o Los Ángeles, se observa que a pesar de que comparten niveles de tráfico similares, estas han implementado políticas activas para la mitigación como; reducción del número de carriles para coches en París (González Guzmán, 2021), o la aplicación de un peaje de congestión en Londres (Valdés & Gómez, 2021). En contraste con esto, las ciudades mexicanas siguen presentando rezagos en inversión en infraestructura de transporte público y mantenimiento vial, agravando el problema de la congestión vial. Evidenciando cómo las ciudades mexicanas necesitan urgentemente un plan de mantenimiento y mejora para su infraestructura vial.

TABLA COMPARATIVA DE LAS CIUDADES DE MÉXICO DENTRO DEL TOP 100 CIUDADES CON MAYOR CONGESTIONAMIENTO VIAL			
Posición	Ciudad	País	Horas perdidas por conductor al año
1	Estambul	Turquía	105
2	Ciudad de Nueva York	Estados Unidos	102
3	Chicago	Estados Unidos	102
4	Ciudad de México	México	97
5	Londres	Inglaterra	101
6	París	Francia	97
7	Jakarta	Indonesia	89
8	Los Ángeles	Estados Unidos	88
9	Ciudad del Cabo	Sudáfrica	94
10	Brisbane	Australia	84
46	Guadalajara	México	55
54	Tijuana	México	54
63	Monterrey	México	51

Tabla 1.3.- Tabla comparativa de las ciudades de México dentro del top 100 de ciudades con mayor congestión vial. Fuente: elaboración propia a partir de datos extraídos de INRIX.

Retomando lo expresado por el ENCIG, dentro de la tabla 1.4 se muestran los resultados obtenidos para el estado de Baja California (BC), el transporte público muestra importantes debilidades. De la población encuestada solo 55.8% de los usuarios en BC reportó no haber esperado mucho tiempo para abordar una unidad de transporte situándose ligeramente por encima del promedio nacional que es del 52.8%, esto se traduce como tiempos de espera moderadamente largos. La percepción de satisfacción del trato brindado por los operadores del transporte público es de apenas 50.9%, convirtiendo a Baja California en una de las entidades con menor percepción positiva. En adición el 60.5% de los encuestados consideró que hay rutas suficientes de transporte público, lo cual, aunque se encuentra dentro del rango medio, refleja una insatisfacción estructural con la cobertura y eficiencia en el sistema de transporte público.

Sumando a la insatisfacción actual hacia el transporte público, la percepción de seguridad de la población presenta un alarmante 34.9% que expresó sentirse segura respecto a la labor de la policía, situando nuevamente a Baja California por debajo del promedio nacional (35.9%). Esta percepción de inseguridad influye negativamente en el uso del transporte público, sobre todo en horarios nocturnos o zonas con poca visibilidad.

Dentro de la infraestructura urbana de Baja California también existen carencias marcadas. En materia de reparación inmediata de baches y coladeras únicamente el 8.0% de la población consideró que se actúa con prontitud, una cifra alarmante y por debajo del promedio nacional que es del 13.1%. Estas cifras preocupantes se reflejan también en la conformidad de las condiciones de las calles y avenidas el cual solamente del 7.1%, situando al estado en los niveles más bajos del país. A pesar de que los semáforos son considerados funcionales por su 67.0% de satisfacción, este dato contrasta con la mala condición general de las calles, lo que demuestra un desequilibrio en la gestión del espacio vial.

Todo este conjunto de deficiencias (frecuencia y calidad limitadas del transporte público y escasa sensación de seguridad) provoca que la ciudadanía perciba al transporte público como una opción no confiable ni digna. Como consecuencia, muchas personas optan por utilizar su vehículo particular, generando una mayor demanda de espacio vial, más tráfico y una creciente congestión urbana, acrecentando el problema del mal estado de las vialidades sumando a la baja atención a fallas como baches y coladeras, provoca que el sistema de infraestructura de transporte en las ciudades de Baja California sea deficiente.

Dentro de México el estado de Baja California se caracteriza por su tamaño, dinamismo y crecimiento de sus principales ciudades, posicionándose como un actor clave al norte de México. A pesar de no ser la capital, Tijuana es la ciudad más grande del estado, con una población que supera los 2 millones de habitantes, siendo un punto de gran relevancia económica, industrial y cultural. La cercanía de esta ciudad con Estados Unidos y su conexión directa con San Diego ha potenciado su desarrollo como una metrópoli binacional con una economía orientada a la exportación, el turismo y la innovación. Por su parte, Mexicali, la capital estatal, siguiendo los pasos de Tijuana, en los años recientes ha experimentado un crecimiento acelerado en

sectores como la industria, la agricultura de alto valor y los servicios, consolidándose como un polo económico en el valle del mismo nombre. Ensenada, aunque más pequeña, es clave por su actividad portuaria, científica y vitivinícola. En conjunto, estas ciudades han convertido a Baja California en una región urbana con influencia internacional, conurbaciones transfronterizas y una dinámica demográfica que impulsa su desarrollo continuo (García & Mungaray, 2019).

TABLA RESULTADOS ENCIG - 2023 PARA BAJA CALIFORNIA		
Encuesta	Porcentaje de población satisfecha	Porcentaje de población insatisfecha
Tiempo breve de espera entre cada una de las unidades de transporte público	55.8%	44.2%
Operadores amables y respetuosos del transporte público	50.9%	49.1%
Rutas suficientes de transporte público	60.5%	39.5%
Sensación de seguridad	34.9%	65.1%
Reparación inmediata de baches y coladeras en calles y avenidas	8.0%	92%
Buen estado de calles y avenidas	7.1%	92.9%
Semáforos funcionales en calles y avenidas	67.0%	33.0%

Tabla 1.4.- Tabla resultado ENCIG - 2023 para Baja California. Fuente: elaboración propia a partir de datos extraídos de ENCIG 2023.

A la fecha de realización de este trabajo de investigación en la ciudad de Mexicali se está presentando un acelerado desarrollo de la ciudad, los proyectos comerciales e inmobiliarios en desarrollo son cada vez más, por ello es que conforme al crecimiento de edificación se debe presentar un crecimiento de urbanización. De acuerdo a los datos del Sistema de Seguimiento y Georreferenciación de la Inversión Pública Municipal (SIPM, 2025), durante el 2024 se destinó un monto de \$578,201,344.53 pesos con la intención de realizar un total de 60 obras públicas en beneficio de la sociedad, de estas 27 son obras de urbanización en vialidades, con esto se denota la intención de las instituciones gubernamentales municipales por mantener en óptimas

condiciones las vialidades de la ciudad (Sistema de Seguimiento y Georreferenciación de la Inversión Pública Municipal, 2025).

Lamentablemente estos esfuerzos no han dado los frutos esperados, ya que, a pesar del importante desarrollo de estructuras como puentes en la infraestructura vial de Mexicali, no se ha visto una reducción notable en el congestionamiento vial de la ciudad debido a que la respuesta no siempre es generar más carriles de circulación (Lewis & Mogridge, 1990). Este hecho sugiere que si no se realizan medidas realmente efectivas para la mitigación del congestionamiento vial dentro de Mexicali terminará presentando una situación similar a la de Tijuana, pudiendo llegar a convertirse en otra ciudad mexicana dentro del top 100 ciudades con más horas invertidas en el tráfico vehicular.

1.1 Problemática

La metodología Building Information Modeling (BIM) ha revolucionado el desarrollo de proyectos en ingeniería civil al transformar la forma en que se planifican, diseñan, construyen y gestionan obras de infraestructura. Esta herramienta ha demostrado ser eficaz en la reducción de errores de diseño interdisciplinarios, optimización de recursos constructivos y en la consolidación de entornos colaborativos de alto rendimiento (Bryde, Broquetas & Volm, 2013).

Un análisis cuantitativo de la literatura científica realizado para esta investigación dentro de la base de datos de scopus, demuestra que el mayor número de publicaciones relacionadas con BIM en ingeniería civil corresponde al sector de la construcción, que representa el 41% del total. Otras áreas como estructuras y medio ambiente también presentan un grado importante de desarrollo (16% y 13%, respectivamente), mientras que disciplinas clave para la planificación urbana como el transporte, presentan un rezago significativo en cuanto a estudios e implementación práctica. Inicialmente, el enfoque BIM fue concebido y aplicado principalmente en el ámbito de la arquitectura y construcción vertical, lo cual ha condicionado su desarrollo técnico y normativo hacia estas disciplinas. Sin embargo, investigaciones recientes han comenzado a explorar cómo este enfoque puede adaptarse a otras ramas de la ingeniería civil, evidenciando un interés creciente por expandir su aplicación hacia nuevas áreas especializadas.

Esta disparidad en el desarrollo académico evidencia no sólo las áreas donde BIM ha alcanzado mayor madurez, sino también las oportunidades latentes para la innovación e investigación en el uso de BIM en entornos urbanos complejos, como lo son las intersecciones viales.

Entender que la solución no radica únicamente en construir infraestructura aislada, a menudo ejecutada sin considerar su entorno ni su impacto en la operación urbana, permite reconocer que factores como el estado de la superficie de rodadura, condiciones geométricas y el crecimiento en el flujo vehicular, evidencian las limitaciones del enfoque tradicional en la evaluación y gestión de intersecciones urbanas. Este modelo convencional, basado en intervenciones puntuales y muchas

veces reactivas, ha derivado en una gestión fragmentada de la infraestructura vial, donde la falta de coordinación entre disciplinas y la carencia de análisis predictivos conlleva a una repetición cíclica de mantenimiento, sobredimensionamiento de obras y una utilización ineficiente del recurso público. Como consecuencia, se invierten considerables sumas en proyectos que no solucionan de raíz la problemática de congestión, ni mejoran sustancialmente la experiencia del usuario ni la eficiencia del sistema.

Por ello, se considera necesario generar una metodología de evaluación fundamentada en un enfoque BIM multidisciplinario para intersecciones urbanas, capaz de ser replicable en diversos contextos urbanos. Esta metodología debe integrar de forma simultánea y dinámica los elementos clave del funcionamiento vial: diseño geométrico, TDPA presente y proyectado, condiciones estructurales del pavimento, control semafórico, señalamiento vertical y horizontal, así como todos aquellos factores interdependientes que inciden directamente en el desempeño operativo de una intersección, con la finalidad es construir una herramienta analítica robusta, que permita evaluar escenarios desde una perspectiva sistémica, evitar intervenciones redundantes, optimizar el uso de recursos y alcanzar una administración vial proactiva y eficaz mediante el análisis coordinado de múltiples variables técnicas.

1.2 Objetivos de Investigación

Objetivo General

Evaluar los beneficios en términos de eficiencia operativa y toma de decisiones del uso del enfoque BIM en la administración y mantenimiento de intersecciones urbanas.

Objetivos Específicos

- Encontrar el conjunto de softwares capaces de analizar los diferentes elementos evaluados en las intersecciones, priorizando la eficiencia operativa.
- Caracterizar las condiciones operativas actuales del caso de estudio.
- Obtener una metodología replicable para generar un plan de administración, mantenimiento o rediseño de intersecciones urbanas.

1.3 Hipótesis

La aplicación del enfoque BIM para la administración de intersecciones urbanas permite plantear intervenciones más eficientes en comparación con un enfoque tradicional.

1.4 Pregunta de Investigación

¿En qué medida la implementación del enfoque BIM, aplicado al modelado integrado de geometría vial, control semafórico y características de la superficie de rodadura en la operación y mantenimiento de intersecciones urbanas, mejora los niveles de servicio vehicular, en comparación con intervenciones tradicionales desarrolladas de forma no integrada?

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Intersección vial y Tipología

Las intersecciones son lugares donde se encuentran dos o más caminos y son áreas de alta congestión de tráfico, porque los vehículos deben ceder el paso entre sí. Esto limita la capacidad de las carreteras y puede crear importantes embotellamientos. Intervenciones como semáforos o ampliación de carriles en estas intersecciones pueden mejorar significativamente el flujo del tráfico (Bull & CEPAL, 2003).

Hay numerosas formas de intersecciones, las más frecuentes de las cuales se muestran a continuación:

- a) La intersección en forma de “T” o “Y” está conformada por tres ramales por donde circulan vehículos.
- b) Las cruces en forma de cruz están formadas por cuatro ramas que se asemejan a una cruz.
- c) Las intersecciones múltiples, compuestas por más de cuatro ramales, representan el caso más complejo. Por lo general, lo mejor es quitar uno de los ramales y conectarlo con otro fuera del cruce, si es posible.
- d) Las rotondas son soluciones que conectan cruces mediante un diseño circular, elíptico o similar, donde los vehículos giran hasta llegar a la salida. A veces, los flujos entrantes y salientes pueden cruzarse en uno o más puntos con otros flujos de vehículos.

Es importante especificar que existen las intersecciones a nivel y a desnivel, las primeras corresponden la zona donde dos o más caminos cruzan a nivel, permitiendo así la mezcla de los diferentes flujos de tránsito. Y la segunda es la zona donde de igual manera donde dos o más caminos se interceptan, pero a diferente nivel, con enlaces que unen las distintas ramas de la intersección (SCT, 2018).

2.2 Aforos Vehiculares, Capacidad y Congestión vial

La información sobre el flujo de tránsito es un recurso esencial para el área de la infraestructura vial. Es crucial para la planeación y diseño de proyectos, permitiendo a los ingenieros desarrollar soluciones que respondan adecuadamente a las necesidades de movilidad. Además, estos datos son fundamentales para el mantenimiento de las carreteras, ayudando a identificar áreas que requieren reparaciones o mejoras.

En cuanto a la gestión y administración de la infraestructura vial, el conocimiento detallado del flujo de tránsito permite una toma de decisiones informada y eficiente, optimizando los recursos disponibles. De igual manera, es vital para la evaluación económica de proyectos, ya que facilita el análisis de costos y beneficios, garantizando que las inversiones se realicen de manera rentable.

Este proceso implica la recolección de datos detallados sobre la cantidad y el tipo de vehículos que utilizan las carreteras, así como los patrones de tráfico a lo largo del

tiempo. Para conocer el comportamiento del flujo de tránsito se han establecido en el dos métodos generales de conteo utilizados para la recopilación de datos (SICT, 2016):

- Método manual

El conteo manual es una técnica utilizada para obtener datos sobre el flujo de tránsito mediante personal que realiza un conteo visual de los vehículos. Este método suele emplearse en conteos especiales de corta duración y para verificar la precisión de los conteos automáticos. Se recurre a esta práctica cuando la información necesaria no puede obtenerse con dispositivos automáticos o cuando las condiciones ambientales impiden su uso.

La operación de este método es sencilla: el personal registra y almacena la información del flujo de tránsito en un formulario específico, previamente establecido con la clasificación vehicular adecuada. Este formulario puede ser en papel (una hoja de conteo) o en una tableta electrónica con una aplicación de captura de datos para minimizar errores de procesamiento. Cabe destacar que los detalles específicos de este método no se describen en el presente documento.

- Método automático

El método de conteo automático es un procedimiento que recopila datos usando equipos automáticos diseñados para registrar continuamente los componentes del flujo de tránsito durante un periodo específico, que puede ser minutos, horas, días, semanas, meses o años.

Los atributos del flujo de tránsito son capturados mediante sensores, también conocidos como detectores, que envían la información a un equipo registrador ubicado generalmente al costado del camino. Este equipo almacena y procesa los datos. Además, el dispositivo registrador puede transmitir los datos recopilados en tiempo real a centrales de conteo para su análisis en gabinete, utilizando aditamentos de comunicación para facilitar esta transmisión.

El flujo vehicular es la cantidad de vehículos que pasan por un punto específico de una vía durante un intervalo de tiempo determinado. Se expresa comúnmente en vehículos por hora (veh/h) y constituye una variable fundamental para el análisis del comportamiento del tránsito (HCM, 2016).

En términos matemáticos, el flujo vehicular (q) está relacionado con la densidad de vehículos (k) y su velocidad media (v) mediante la siguiente fórmula:

$$q = k \cdot v$$

La capacidad vial constituye un concepto fundamental en la ingeniería de tránsito, especialmente en el análisis de intersecciones urbanas. Según el Highway Capacity

Manual (HCM, 2016), la capacidad se define como el flujo máximo de vehículos que puede ser razonablemente esperado a pasar por una sección determinada de una vía o por un carril específico durante un período de tiempo dado, bajo condiciones específicas de operación. Esta medida está estrechamente vinculada a las características geométricas, el tipo de control (semafórico o sin control), la demanda vehicular, y las condiciones del entorno.

En el caso de las intersecciones semaforizadas, el HCM proporciona un enfoque analítico para calcular la capacidad de cada movimiento (directo, giro a la izquierda o derecha) mediante la fórmula:

$$C = \frac{S \cdot g}{c}$$

donde:

- C es la **capacidad** del carril o movimiento (vehículos por hora),
- S es la **tasa de flujo de saturación**, normalmente estimada en 1900 veh/h por carril en condiciones ideales,
- g representa el **tiempo efectivo verde** asignado al movimiento durante el ciclo semafórico, y
- c es la **duración total del ciclo del semáforo**.

Este enfoque permite determinar la capacidad de forma desagregada para cada fase de señalización, considerando factores de ajuste por geometría, presencia de transporte público, peatones, vehículos pesados, entre otros.

La congestión vial representa uno de los principales desafíos en la planificación y operación del sistema de transporte urbano contemporáneo. Según Bull (2003), la congestión ocurre cuando la demanda vehicular se aproxima o supera la capacidad de la infraestructura vial, lo que genera un deterioro sustancial en las condiciones de operación del tránsito. Este fenómeno se manifiesta en la reducción de la velocidad de circulación, incremento de los tiempos de viaje, y mayor variabilidad e imprevisibilidad en los desplazamientos.

Desde una perspectiva sistémica, Bull destaca que la congestión no solo compromete la eficiencia del flujo vehicular, sino que también incide negativamente en el consumo energético, las emisiones contaminantes y el bienestar de los usuarios. A nivel estructural, la congestión refleja una falla en la gestión integral del espacio vial,

especialmente en nodos críticos como las intersecciones urbanas, donde se concentran múltiples flujos de movimiento con distintos patrones y jerarquías.

2.3 Niveles de servicio

El término "capacidad" se refiere a la máxima intensidad horaria de vehículos o personas que pueden pasar por un carril o una sección de la vía durante un período de tiempo determinado, bajo condiciones preestablecidas de tráfico (SCT, 2018). Este concepto es crucial para el diseño y gestión de la infraestructura vial, ya que permite evaluar cuánto tráfico puede soportar una vía antes de que se produzcan congestiones significativas.

La capacidad está directamente relacionada a diversas características, tales como su geometría, el estado del pavimento y la composición del tráfico. En adición es importante considerar las regulaciones de circulación vigentes, como las limitaciones de velocidad o las prohibiciones de movimientos específicos en intersecciones (Llanes Ayala, 2014).

El "nivel de servicio" es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación dentro de un flujo vehicular y cómo éstas son percibidas por conductores y pasajeros. Estas condiciones se evalúan a través de factores como, la velocidad y el tiempo de recorrido, la libertad para realizar maniobras, las interrupciones del tráfico, y la comodidad y seguridad vial (Llanes Ayala, 2014).

Se definen seis niveles de servicio, designados con las letras de la "A" a la "F". El nivel de servicio "A" representa las mejores condiciones de operación, mientras que el nivel de servicio "F" indica las peores. Cada uno de estos niveles abarca un rango específico y refleja la percepción de los conductores sobre las condiciones de operación (Transportation Research Board, 2016).

Para determinar el nivel de servicio de una intersección con semáforo, el método Circular 212 de la TRB se basa en dividir la suma de los volúmenes críticos entre la capacidad de la intersección. Este cálculo produce la relación volumen-capacidad (V/C). Los movimientos críticos incluyen las combinaciones de movimientos directos y giros a la derecha, siempre y cuando no exista un carril exclusivo para dicho giro, así como los giros a la izquierda opuestos que representan los volúmenes más altos por carril. Las descripciones de los niveles de servicio para las intersecciones señalizadas, junto con sus V/C correspondientes, se presentan en la Tabla 2.1 (Transportation Research Board, 2016).

Nivel de servicio	Característica	V/C Ratio
A	Operaciones sin congestiones; todas las colas se despejan en un solo ciclo de señal.	Menor que 0.60
B	Congestión muy leve; se utiliza por completo una fase de aproximación ocasional.	$0.60 < V/C < 0.69$
C	Congestión leve; embotellamientos ocasionales en aproximaciones críticas.	$0.70 < V/C < 0.79$
D	Congestión significativa en aproximaciones críticas, pero la intersección funciona. Los autos deben esperar más de un ciclo durante picos cortos. No se forman colas prolongadas.	$0.80 < V/C < 0.89$
E	Congestión severa con algunas colas prolongadas en aproximaciones críticas. Puede ocurrir un bloqueo de la intersección si el semáforo no prevé movimientos de giro protegidos. La cola de tráfico puede bloquear intersecciones cercanas antes de la(s) aproximación(s) crítica(s).	$0.90 < V/C < 0.99$
F	Avería total, operación de parada y arranque.	$V/C \leq 1$ o más

Tabla 2.1.- Definición de nivel de servicio en intersecciones. Fuente: elaboración propia a partir de información extraída del Highway Capacity Manual. 2016.

El nivel de servicio de las vialidades se ve directamente afectado por el desgaste de la superficie de rodamiento, ocasionando que se reduzca la velocidad de operación, disminuya la comodidad de los usuarios, aumenten los costos de mantenimiento y principalmente, se genera un camino con menor seguridad para los vehículos ya que la velocidad de operación es menor en comparación con una superficie en buen estado, a menos que con sacrificio de seguridad se conserve una velocidad alta. El deterioro de la estructura de pavimento es una función de la clase de daño, su severidad y cantidad o densidad del mismo. Para determinar la magnitud de desgaste que existe sobre una viabilidad se puede hacer uso de diferentes métodos de evaluación de la superficie de rodamiento, de entre estos destaca el Índice de Condición del Pavimento (PCI) (SCT, 2018).

2.4 Fundamentos del Building Information Modeling (BIM)

BIM es el acrónimo de Building Information Modeling (modelado de la información de la construcción), y se refiere al conjunto de metodologías de trabajo y herramientas, caracterizado por el uso de información de forma coordinada, coherente, computable y continua; empleando una o más bases de datos compatibles, que contengan toda

la información en lo referente al edificio que se pretende diseñar, construir o usar (Coloma Picó, 2008). Esta información puede ser de tipo formal, pero también puede referirse a aspectos como los materiales empleados y sus calidades físicas, los usos de cada espacio, la eficiencia energética de los cerramientos, etc.

Esta metodología se divide en diferentes "dimensiones". A continuación, se presentan las principales dimensiones del enfoque BIM en la ingeniería civil (Oussouboure & Delgado Victore, 2017).

BIM 3D es un enfoque que utiliza un modelo basado en objetos, como columnas, vigas y muros, para representar de manera integrada toda la información geométrica del proyecto.

BIM 4D, que incluye la dimensión temporal, permite controlar la dinámica del proyecto y realizar simulaciones de sus diferentes etapas. Además, facilita el diseño de un plan de ejecución, que detecta posibles dificultades y permite resolverlas, lo que puede resultar en una reducción de costos y plazos.

En cuanto a BIM 5D, se agrega la dimensión de costos, integrándose al sistema de simulación de ejecución del proyecto. Esto permite un control más preciso de los costos a lo largo del proceso.

BIM 6D se refiere a la dimensión de sostenibilidad del proyecto, que cada vez cobra mayor importancia. En todas las fases del proyecto, se realiza un análisis integral que abarca desde los compromisos establecidos en la etapa de inicio hasta la desactivación del proyecto. Esto facilita la toma de decisiones antes de la ejecución, permitiendo considerar aspectos de sostenibilidad de manera más efectiva. BIM 6D también implica la creación de un sistema de información único para el proyecto.

Por último, BIM 7D se emplea para las operaciones de mantenimiento de las instalaciones durante toda la vida útil de la inversión en un modelo. Esta dimensión tiene en cuenta la gestión y el mantenimiento continuo de las instalaciones, brindando información valiosa para realizar intervenciones eficientes y planificadas.

En resumen, las diferentes dimensiones del enfoque BIM, como el 3D, 4D, 5D, 6D y 7D, agregan progresivamente información adicional y funcionalidades al modelo. Esto permite una gestión más eficiente, precisa y sostenible del proyecto en todas sus etapas, desde el diseño hasta la operación y el mantenimiento.

Levels of Development, o "niveles de desarrollo" traducido al español, determina el grado de madurez o progreso de la información asociada a un elemento específico del modelo. Este nivel se refiere a la parte de un componente, sistema constructivo o conjunto en un edificio en particular (Alonso Madrid, 2015). Esto se relaciona directamente con el modelo digital, ya que, en base a estos criterios, se definiría la cantidad de detalle con la que se trabajará.

Tradicionalmente, se reconocen seis niveles de desarrollo, los cuales van desde el LOD 100 hasta el LOD 500, aunque, en la actualidad, diversos autores especifican la

existencia de niveles adicionales (Dimara, Papaioannou & Stogia, 2025). A continuación, se describen los principales niveles de desarrollo:

LOD 100 es un modelo conceptual que ilustra los elementos básicos de un proyecto. Estos elementos se presentan de forma simplificada, utilizando, en ocasiones, símbolos o formas genéricas. No requieren una definición geométrica detallada, pero pueden depender de otros elementos que sí la requieren. En las fases avanzadas del proyecto, ciertos elementos pueden permanecer en este nivel de desarrollo.

LOD 200 representa un nivel intermedio en el desarrollo de un modelo BIM. Aquí, los elementos del modelo se definen gráficamente, aunque de forma aproximada. La información contenida en un modelo LOD 200 cubre aspectos como dimensiones aproximadas, forma, ubicación y orientación de elementos.

LOD 300 representa un nivel detallado de desarrollo de un modelo BIM. Aquí, los elementos del modelo se definen gráficamente con precisión, incorporando información detallada sobre las cantidades, dimensiones, forma, ubicación y orientación de los elementos.

LOD 350 es un nivel de desarrollo detallado que incluye la detección de posibles conflictos o interferencias entre elementos. Esto es común en proyectos complejos, que involucran disciplinas independientes que afectan la planificación, programación y coordinación del proyecto. Esto, a menudo, puede afectar los costos. Generalmente, todo el proyecto se ajusta a partir de LOD 300, según criterios concretos, privilegiando, generalmente, la estructura sobre las instalaciones, y éstas sobre la arquitectura. Esto requiere una coordinación cuidadosa entre todas las partes, disciplinas y subdisciplinas involucradas, para garantizar una ejecución precisa del trabajo y reducir, significativamente, errores y cambios.

LOD 400 representa un nivel de desarrollo detallado que incluye información completa de cada elemento. Este nivel implica una definición geométrica completa del elemento, detallando su posición, sistema constructivo, uso previsto, montaje, fabricación, instalación y otros detalles. Además de información gráfica, podrá incluir datos no gráficos relevantes.

LOD 500 es un nivel de desarrollo detallado que representa el edificio tal como fue construido. En este nivel, cada elemento se define geométricamente, con información detallada sobre su posición, sistema constructivo, uso previsto, montaje, fabricación, instalación y otros detalles. Como en niveles anteriores, podrá contener información no gráfica relevante para su operación y mantenimiento.

El enfoque Infrastructure Building Information Modeling (I-BIM) representa la aplicación del modelado de información en obras de infraestructura lineal y nodal, como carreteras, intersecciones urbanas y redes de transporte. A diferencia del BIM tradicional, el I-BIM permite modelar y gestionar el ciclo de vida completo de activos viales, incorporando datos geométricos, funcionales y de operación en un entorno colaborativo. Esta metodología facilita la simulación de tránsito, la coordinación

interdisciplinaria y la toma de decisiones sustentadas en datos durante la fase de diseño, construcción y operación (Campisi et al., 2020).

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Administración y gestión de vialidades urbanas

Para llevar a cabo cualquier proyecto es necesario dividirlo en etapas, esto proporciona un enfoque más manejable, reduce riesgos, facilita la planificación y estimación y permite una gestión más eficiente y adaptable del proyecto en su conjunto, las etapas de un proyecto de infraestructura vial son (SEDATU, 2019);

Conceptualización: es el proceso de definir las ideas y objetivos del proyecto, teniendo en cuenta las necesidades y requerimientos de los usuarios de la vía. Estas necesidades pueden ser identificadas a través de estudios empíricos o de procesos de planeación integral. Es importante que el proyecto esté fundamentado en un estudio técnico riguroso, que se alinee con las políticas de movilidad y desarrollo urbano de la ciudad.

Diagnóstico: Una vez que se ha identificado y justificado técnicamente un proyecto de calle, es necesario evaluar su funcionamiento y uso real. Para ello, se debe delimitar el área de intervención y recopilar datos en campo y de estudios previos. Esta información permitirá generar un diagnóstico detallado de los problemas de la calle en diferentes escalas de planeación.

Planeación: El proyecto de una calle debe considerar su función en el sistema vial de la ciudad, su uso como espacio público y las políticas de movilidad y desarrollo urbano. El proyecto debe incluir una visión y líneas estratégicas para la calle, así como un diagnóstico de los problemas existentes. La alternativa de proyecto con mejor valoración será la que se implemente, y con base en ella se desarrollará un anteproyecto conceptual.

Diseño: El diseño ejecutivo de una calle debe elaborarse a partir del diseño conceptual. Este proceso debe ser secuencial y profundizar en los aspectos técnicos del proyecto. También es importante construir una estrategia de gestión social que permita anticiparse a las reacciones de los ciudadanos y otras instituciones, y asignar responsables y acciones para la implementación del proyecto.

Implementación: La implementación de un proyecto de calle se lleva a cabo en diferentes fases, desde la revisión del proyecto ejecutivo hasta la supervisión de la construcción. También es importante incluir estrategias de comunicación, socialización y participación con la comunidad para informar sobre el proyecto y obtener su apoyo.

Evaluación y monitoreo: Una vez que el proyecto ha sido construido, es importante evaluar su impacto. Para ello, se utilizan indicadores previamente definidos que se comparan con las metas establecidas en las fases previas.

El diseño geométrico de intersecciones constituye uno de los elementos fundamentales en la planificación de la infraestructura vial urbana, ya que define la configuración física que permite el cruce eficiente, seguro y ordenado de flujos vehiculares, peatonales y ciclistas. Su adecuada planeación incide directamente en la capacidad operacional del sistema vial, los niveles de servicio, la seguridad vial y la percepción de calidad urbana por parte de los usuarios (Garber & Hoel, 2015).

Este tiene como objetivo adaptar la configuración física del cruce a las características del tránsito esperado, considerando volumen vehicular, tipos de vehículos (vehículos ligeros, pesados, transporte público), velocidades operativas y necesidades de seguridad. En intersecciones semaforizadas o con control por signos, aspectos como el alineamiento de accesos, anchos de carriles, radios de retorno, visibilidad de aproximación, posicionamiento de señales, y elementos canalizadores son clave para una operación segura (AASHTO, 2018).

Deben ser considerados los principios de eficiencia (mínima demora y máxima fluidez), funcionalidad (adaptación al entorno urbano), jerarquía vial (articulación entre vialidades primarias y secundarias) y seguridad (minimización de conflictos).

En México, se encuentra regulado por una serie de normas técnicas emitidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), hoy en día bajo el ámbito de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). La principal referencia normativa es el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras (SICT, 2018), el cual si bien se enfoca en entornos interurbanos, también ofrece lineamientos aplicables a intersecciones urbanas.

Los dispositivos de control y señalamiento en intersecciones son elementos fundamentales en la regulación del tránsito vehicular, peatonal y ciclista. Su función principal es establecer un ordenamiento operativo que asegure condiciones de seguridad, eficiencia y previsibilidad en los puntos de conflicto entre flujos. El diseño e implementación adecuada de estos dispositivos permite minimizar la ocurrencia de incidentes viales, mejorar el nivel de servicio de las intersecciones y optimizar el uso de la infraestructura urbana (Garber & Hoel, 2015).

Los dispositivos de control de tránsito comprenden señales verticales, marcas en el pavimento, semáforos, dispositivos electrónicos, señalización temporal y sistemas de control adaptativo. En el contexto específico de intersecciones urbanas, los más relevantes son:

- Semáforos vehiculares y peatonales: Regulan el derecho de paso de los distintos flujos de manera cíclica o adaptativa.

- Señalización vertical (reglamentaria, preventiva e informativa): Proporciona instrucciones claras al usuario sobre prioridad, restricciones o geometría.
- Marcas en el pavimento: Delimitan carriles, zonas de cruce, líneas de alto y canalizaciones.
- Dispositivos auxiliares (reductores, boyas, señalización luminosa o auditiva): Complementan la percepción de los elementos principales en condiciones de visibilidad reducida o alta densidad.

En México, el uso, diseño y colocación de los dispositivos de control en intersecciones está normado principalmente por el Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras (MDCT), elaborado por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). Este documento es equivalente funcional a los manuales MUTCD de Estados Unidos, y es de aplicación obligatoria en vialidades urbanas y rurales del país.

Además del MDCT, la NOM-034-SCT2-2011, establece las especificaciones técnicas del señalamiento horizontal y vertical en carreteras y vialidades urbanas. Este documento detalla dimensiones, materiales retrorreflectantes, tolerancias y simbología estandarizada para la implementación de señalización en intersecciones.

La gestión de pavimentos es un componente crítico en la planificación, operación y mantenimiento de la infraestructura vial, especialmente en intersecciones urbanas, donde las condiciones de carga, aceleración y frenado inducen un deterioro acelerado de la superficie. A diferencia de los tramos rectos, las intersecciones presentan condiciones de carga por eje más complejas, puntos de detención repetitiva y mayor exposición al escurrimiento superficial, lo que las convierte en zonas altamente susceptibles al deterioro funcional y estructural (Huang, 2004).

Las intersecciones suelen estar sometidas a sollicitaciones dinámicas más intensas debido al arranque y detención de vehículos pesados, virajes frecuentes, mayor densidad de frenado y cargas de impacto. Estos factores originan defectos típicos como (Yoder & Witczak, 1975):

- Deformaciones plásticas (huellas de frenado o arranque),
- Fisuras en bloque o en piel de cocodrilo,
- Desintegración superficial o desgranamiento, y

La evaluación PCI es la metodología más completa para la inspección y calificación objetiva de pavimentos, flexibles y rígidos, esta es de fácil implementación y no requiere de herramientas altamente especializadas.

Este proceso se fundamenta en los resultados de un inventario visual previamente recolectado de la condición actual del pavimento en el cual se establecen CLASE, SEVERIDAD y CANTIDAD de cada daño presentado, de esta manera se obtiene un índice de la integridad estructural del pavimento y de la condición operacional de la superficie. Esto ofrece una percepción clara de las causas de los daños y su relación con las cargas o con el clima (SCT, 2018).

El PCI es un índice numérico que varía desde cero (0), para un pavimento fallado o en mal estado, hasta cien (100) para un pavimento en perfecto estado (véase tabla 3.1).

RANGOS DE CALIFICACION DEL PCI	
Rango	Clasificación
100-85	Excelente
85-70	Muy Bueno
70-55	Bueno
55-40	Regular
40-25	Malo
25-10	Muy Malo
10-0	Fallado

Tabla 3.1.-Rangos de calificación del PCI. Fuente: extraído del documento Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras.

La regulación del diseño y mantenimiento de pavimentos en México está a cargo de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), la cual emite normativas técnicas obligatorias a través de manuales de diseño y Normas Oficiales Mexicanas (NOM). Las principales referencias aplicables son:

- SICT (2020). Manual de diseño de pavimentos: Este documento establece los métodos para dimensionar estructuralmente pavimentos asfálticos, de concreto hidráulico y rígido-junta corta, incluyendo metodologías AASHTO, PCA y métodos empíricos-mecanicistas (SICT, 2020).
- SICT (2013). Manual de conservación de pavimentos: Define los tipos de mantenimiento rutinario, periódico y rehabilitación estructural. Incluye criterios de selección de tratamientos en función del deterioro observado (SICT, 2013).
- NOM-036-SCT2-2016: Regula los procedimientos de evaluación del estado físico de carreteras mediante el Índice de Condición del Pavimento (PCI) y otros indicadores técnicos, también aplicables en contextos urbanos (SCT, 2016).

3.2 BIM dentro de la ingeniería civil

La metodología BIM ha emergido como una herramienta que está cambiando la manera de desarrollar proyectos dentro del campo de la ingeniería civil, donde a través de su implementación se logra un avance significativo en la manera que se planifican, diseñan, construyen y gestionan. Este enfoque destaca, debido a que su uso reduce errores de diseño entre disciplinas, optimiza recursos y permite un entorno colaborativo más eficiente (Bryde et al. 2021). Atraves del análisis cuantitativo realizado para esta investigación dentro de la base de datos de Scopus se buscó mapear el desarrollo de las metodología BIM dentro de la ingeniería civil comparando los resultados obtenidos con lo encontrado en otras revisiones de literatura.

El desarrollo del BIM en la ingeniería civil ha tenido una mayor adopción en el área de la construcción, concentrando el 41% de las publicaciones científicas. Las áreas de estructuras y ambiental son otras de las más estudiadas con un 16% y 13% del total de publicaciones relacionadas con BIM y ingeniería civil, mientras que disciplinas como hidráulica, transporte y geotecnia presentan un marcado menor desarrollo (Oussouboure & Delgado Victore, 2017). Esto revela no sólo los temas mayormente desarrollados, sino también las áreas de oportunidad para el desarrollo de nuevo conocimiento.

Áreas de la ingeniería civil	Total	Subáreas de la ingeniería civil	Porcentaje	Total
Estructuras	16%	Estructuras de concreto reforzado	8%	100%
		Estructuras de mampostería	4%	
		Estructuras de acero	10%	
		Ingeniería sísmica	10%	
		Puentes	31%	
		Estructuras de concreto	12%	
		Ninguno en específico	25%	
Sistemas, planeación y transporte	11%	Aeropuertos	5.9%	100%
		Carretera	28%	
		Ferrocarriles	28.3%	
		Puertos	2%	
		Túneles	12.6%	
		Ninguno en específico	23.2%	

Ambiental	13%	Edificios sustentables	52%	100%
		Energías renovables en edificios	3%	
		Manejo de instalaciones en edificios	20%	
		Plantas de tratamiento de aguas	1%	
		Proyectos sustentables de ingeniería	22%	
		Ninguno en específico	2%	
Hidráulica	2%	Manejo de aguas subterráneas	10%	100%
		Diseño de estructuras hidráulicas	21%	
		Hidráulica urbana	40%	
		Ingeniería de costas	8%	
		Modelación hidráulica	17%	
		Ninguno en específico	4%	
Construcción	41%	Gestión de la construcción	40%	100%
		Seguridad y productividad de obra	35%	
		Supervisión de obras	9%	
		Administración de proyectos	5%	
		Ninguno en específico	11%	
Geotecnia	2%	Bordos y presas	4%	100%
		Dinámica de suelos	37%	
		Estructura de pavimentos	15%	
		Mecánica de suelos	36%	
		Ninguno en específico	8%	
Comprende todas las áreas de la ingeniería civil	15%			

Tabla 3.2- Porcentaje de estudio de áreas y subáreas de la ingeniería civil. Fuente: elaboración propia.

Hablando del uso de la metodología BIM de la ingeniería civil se ha encontrado que al igual que las áreas, hay dimensiones que se desarrollan más que otras. Las dos

más aplicadas son el modelado tridimensional (dimensión 3) y la operación y mantenimiento (dimensión 7) ambas están presentes en un 18% de los artículos científicos desarrollados, esto según estudios consultados. Con esto se demuestra el uso práctico de este enfoque en fases avanzadas del ciclo de vida de los proyectos de ingeniería civil y en contraparte al mismo tiempo también evidencia una menor atención a dimensiones como la idea o el boceto (véase tabla 3.3).

Artículos	Dimensión BIM en que se desarrolla el documento
Documentos que integran la base de datos	Dimensión 1(Idea) 8%
	Dimensión 2(Boceto) 9%
	Dimensión 3(Modelado) 18%
	Dimensión 4(Tiempo) 14%
	Dimensión 5(Costos) 13%
	Dimensión 6(Sustentabilidad) 10%
	Dimensión 7(Operación y Mantenimiento) 18%
	Involucra todas las dimensiones 10%

Tabla 3.3- Desarrollo de la ingeniería civil dentro de las dimensiones BIM. Fuente: elaboración propia.

Los países de China, Estados Unidos y Reino Unido lideran en cuanto al volumen de publicaciones generadas, esto refleja una sólida infraestructura académica y claramente encaminadas a impulsar la digitalización de los proyectos de ingeniería civil. A través de la consulta de análisis cuantitativos se ha identificado que el un impulso reciente en publicaciones a partir de 2017, con un pico en el año 2024 (Zhao, 2017).

Dentro de la literatura científica sobre BIM se identifican intereses predominantes en sustentabilidad, estructuras y seguridad. Esto demuestra como la metodología BIM no solo se está consolidando como un eje técnico en el desarrollo de infraestructura civil, sino también como una plataforma que busca integrar la sostenibilidad a los proyectos de construcción. En conjunto, todos estos hallazgos refuerzan el papel que tiene BIM como una metodología clave para la innovación y transformación digital de la ingeniería civil (Wen, Ren, Lu & Wu, 2021).

3.3 Antecedentes de aplicaciones previas del Enfoque BIM en Intersecciones

El Modelado de Información para la Construcción ha evolucionado de ser una herramienta propia del ámbito arquitectónico a convertirse en una metodología de gestión integral aplicada en diversas áreas de la infraestructura. En el contexto urbano, su aplicación en la administración de intersecciones viales ha ganado especial atención por su capacidad para integrar diseño geométrico, simulación de tráfico, planificación de obra y análisis multidimensional. A pesar de sus ventajas teóricas, aún existen limitaciones prácticas y una adopción parcial en muchas ciudades, especialmente en regiones de América Latina.

Uno de los primeros esfuerzos relevantes para vincular BIM con la planificación vial lo constituye el estudio titulado “BIM-based traffic analysis and simulation at road intersection design”, donde se propone un marco metodológico para integrar el modelado geométrico en 3D con la simulación de tráfico urbano. Este enfoque permite analizar de forma visual y analítica los flujos vehiculares bajo distintas configuraciones de intersección, contribuyendo a una toma de decisiones más precisa y fundamentada (Castañeda, Sánchez, Herrera, Pellicer, & Porras, 2021).

Complementando este aporte, el documento “BIM-lean integration for construction scheduling of road intersections” ofrece una perspectiva centrada en la planificación constructiva. La integración entre BIM y la filosofía Lean permite generar cronogramas más eficientes, reducir el impacto de las obras en la vialidad urbana y anticipar conflictos de construcción mediante simulaciones 4D. Este enfoque es especialmente útil en intersecciones críticas donde la intervención debe minimizar alteraciones al tráfico (Castañeda, Sánchez, Peña, Herrera, & Mejía, 2025).

Desde una perspectiva más integral, el documento “Development of an Integrated BIM and Traffic Simulation-Based Highway Alignment Planning and Optimization Framework” plantea una propuesta metodológica que combina trazado vial, simulación de tráfico y modelado BIM. Su relevancia radica en que supera la visión estática del diseño vial al incorporar variables dinámicas y contextuales, permitiendo una planificación flexible basada en evidencia operativa (Khan et al., 2025).

La aplicación práctica de estas metodologías en el ámbito hispano está representada por la tesis de Joel Santos, titulada “Aplicación de la metodología Building Information Modeling (BIM) para el rediseño de la intersección TF-652”. Este trabajo constituye un caso aplicado de rediseño geométrico de una intersección tipo “T”, donde se utilizó Autodesk Civil 3D para representar la infraestructura y simular el comportamiento vehicular. Lo destacable de esta investigación es su enfoque en las condiciones reales del lugar, incorporando normativas locales, criterios de accesibilidad y seguridad vial (Santos Casanova, 2021).

Por su parte, el artículo “Redesign of a road node with 7D BIM: Geometrical,

environmental and cost dimensions” eleva la discusión al incluir variables ambientales y económicas. El uso de un modelo 7D BIM permite analizar la intersección como un nodo urbano complejo, evaluando no solo su trazado y costos de ejecución, sino también su impacto ecológico y de mantenimiento a largo plazo. Este enfoque es fundamental en contextos donde la sostenibilidad y eficiencia financiera son requisitos clave (Cantisani et al., 2022).

En el contexto latinoamericano, el documento “MEJORA DE INTERSECCIONES VIALES EN LA RED VIAL URBANA USANDO BIM E INFRAWORKS EN EL DISTRITO DE VENTANILLA” representa una experiencia aplicada en Perú, donde se combina InfraWorks con técnicas BIM para modelar y simular intersecciones urbanas. Este estudio demuestra cómo es posible adaptar herramientas digitales avanzadas a contextos locales, con resultados medibles en términos de mejora de fluidez vehicular y reducción de conflictos geométricos (Navarro Vásquez, 2023).

Finalmente, el documento “Microsimulación del flujo vehicular en intersecciones viales empleando modelos BIM” profundiza en el uso de InfraWorks 360 para generar microsimulaciones calibradas del tráfico urbano en Ayacucho. A través del modelado tridimensional basado en datos reales de campo, se evalúan distintas alternativas de diseño y su comportamiento operacional, validando la utilidad de BIM como herramienta predictiva para el desempeño vial (Ataucusi Choquecahua, 2019).

- Discusión de los antecedentes

En el marco del presente trabajo de investigación, se ha realizado una revisión profunda de los antecedentes documentados en el subapartado 3.3 y la tabla 3.4, en los cuales se describen múltiples experiencias internacionales en las que la metodología BIM ha sido empleada para modelar y simular nodos viales urbanos.

Artículo	Autores	Año de publicación	Objetivo	Dimensiones BIM	Software Utilizado	Caso de Estudio	Resultados Obtenidos
BIM-based traffic analysis and simulation at road intersection design	Castañeda, K., Sánchez, O., Herrera, R. F., Pellicer, E., & Porras, H.	2021	Desarrollar un marco metodológico que integre BIM con simulación de tráfico para apoyar el diseño colaborativo de intersecciones.	3D - Modelado 4D - Tiempo 5D - Costos 6D - Sostenibilidad 7D - Operación y Mantenimiento	Infraworks Revit Robot Structural Analysis BIM 360	Intersección tipo 'Y' en Piedecuesta, Santander, Colombia	Evaluación de 4 alternativas de diseño; integración topográfica y simulación mesoscópica mejoró la toma de decisiones; interoperabilidad destacada.
Micro simulación del flujo vehicular en intersecciones viales empleando modelos BIM	Castañeda, K., Sánchez, O., Peña, C. A., Herrera, R. F., & Mejía, G.	2025	Simular y proponer mejoras operativas para una intersección urbana congestionada utilizando modelado BIM y micro simulación calibrada.	3D - Modelado 4D - Tiempo 5D - Costos	InfraWorks BIM 360	Intersección 'Puente Nuevo' en Ayacucho, Perú	Mejora del nivel de servicio, reducción de congestión, validación rigurosa de simulación con datos reales.
Aplicación de la metodología Building Information Modeling (BIM) para el rediseño de la intersección localizada en el PK 3+477 de la carretera TF-652 en la provincia de Santa Cruz de Tenerife	Khan, M. A., Farooq, M. U., Riaz, M. S., Zubair, M. U., Tanoli, W. A., & Qureshi, H. J.	2025	Rediseñar geométricamente una intersección urbana aplicando BIM como sistema integral de planificación, modelado y control constructivo.	3D - Modelado 4D - Tiempo 5D - Costos	Civil 3D Revit InfraWorks Navisworks ReCap Pro	Intersección PK 3+477, TF-652, Santa Cruz de Tenerife, España	Reducción de errores, mejor documentación técnica, cronograma detallado y extracción automática de cantidades.
Re-design of a road node with 7D BIM: Geometrical, environmental and microsimulation approaches to implement a benefit-cost analysis between alternatives	Cantisani, G., Correa Panesso, J. D., Del Serrone, G., Di Mascio, P., Gentile, G., Loprencipe, G., & Moretti, L.	2022	Evaluar múltiples escenarios de rediseño para una intersección compleja mediante un enfoque BIM 7D, incorporando análisis geométrico, ambiental y económico.	3D - Modelado 4D - Tiempo 5D - Costos 6D - Sostenibilidad 7D - Operación y Mantenimiento	Civil 3D PTV VISSIM 11 SimaPro Ecoinvent	Nodo de tres niveles en Bergamo, Italia	Escenario S4 tuvo mejor B/C y menor huella de carbono; interoperabilidad entre disciplinas muy alta.
Improving urban road infrastructure analysis and design using an integrated BIM-GIS and traffic microsimulation framework	Santos Casanova, J.	2021	Comparar cinco alternativas geométricas para una intersección urbana señalizada usando un marco BIM-GIS integrado con simulación vehicular.	3D - Modelado 4D - Tiempo 5D - Costos 6D - Sostenibilidad	PTV VISSIM InfraWorks Formit Pro ArcGIS Lumion	Intersección en Srinagar Highway, Islamabad, Pakistán	Reducción del 86% en tiempo de viaje, 87% en emisiones COx, opción óptima fue paso deprimido.
Development of an Integrated BIM and Traffic Simulation-Based Highway Alignment Planning and Optimization Framework	Navarro Vásquez, M. R.	2023	Optimizar la geometría de un alineamiento vial integrando BIM y simulaciones de tráfico dinámico con criterios ambientales, operativos y económicos.	3D - Modelado 4D - Tiempo 5D - Costos 6D - Sostenibilidad	InfraWorks	Bypass Norte de Dera Ghazi Khan, Pakistán	30% reducción en congestión, 6.48% reducción de costos, cumplimiento de requisitos de visibilidad
BIM-lean integration for construction scheduling of road intersections	Ataucusi Choquechua, C.	2019	Desarrollar un marco metodológico que integre BIM y Lean Construction para la programación eficiente de obras en intersecciones urbanas.	3D - Modelado 4D - Tiempo 5D - Costos	Softwares enfocados en la construcción, tráfico y programación de obras.	Intercambiador 'Cuatro Vientos', Cúcuta, Colombia	Mejora en programación de obra, coordinación interdisciplinaria y gestión del tráfico.

Tabla 3.4- Comparación de las características de los antecedentes. Fuente: Elaboración propia.

Los estudios analizados muestran un panorama robusto y técnicamente avanzado sobre cómo BIM ha sido adaptado a intersecciones urbanas bajo una variedad de enfoques metodológicos. A modo de ejemplo, el trabajo de López et al. (2021), documenta un marco metodológico que integra de forma estructurada la geometría vial, datos de tránsito y análisis de costos dentro de un entorno BIM colaborativo. El modelo generado permitió la simulación de diversas alternativas de diseño para una intersección tipo "Y", con el objetivo de optimizar el nivel de servicio, los costos y la ocupación de terreno. Este enfoque interdisciplinario facilitó una toma de decisiones más informada durante el diseño geométrico.

De manera similar, en el caso peruano del nodo Puente Nuevo en Ayacucho (Computer Integrated Construction Research Program, 2019), el estudio incluyó micro simulación calibrada del flujo vehicular utilizando InfraWorks 360. Este nivel de precisión permitió que las decisiones de rediseño geométrico se fundamentaran en datos reales, simulando escenarios de intervención como ampliaciones de carriles y modificaciones en radios de giro, así como evaluaciones de señalización.

Asimismo, el trabajo de Santos Casanova (2021), en España, desarrolló una aplicación completa de la metodología BIM para el rediseño de una intersección en T, abarcando desde el levantamiento topográfico hasta el cronograma constructivo en 4D y la estimación de presupuestos en 5D. Esta aplicación integral demuestra que BIM no solo es útil como herramienta de diseño, sino como sistema de gestión de información vial durante todo el ciclo de vida del proyecto.

Un avance aún más sofisticado se evidencia en el estudio de Cantisani et al. (2022), en Italia, donde se implementó BIM 7D para integrar aspectos geométricos, ambientales y de micro simulación, lo que permitió realizar un análisis beneficio-costos de alternativas de rediseño. En este caso, la inclusión de la huella de carbono y el valor del tiempo perdido por demoras evidencian la capacidad de BIM como plataforma para evaluación multidimensional.

A pesar del éxito técnico de los estudios revisados, varios autores coinciden en señalar limitaciones significativas. Una de las más recurrentes es la dependencia de software propietarios, como InfraWorks, Revit, o PTV VISSIM, lo cual restringe la flexibilidad operativa y requiere inversiones altas en licencias. Además, pocos estudios incorporan análisis ambientales o sociales, dejando un vacío en la evaluación integral de proyectos viales.

Por otro lado, el trabajo de Sohaib et al. (2024), representa un punto de inflexión al integrar BIM con sistemas de información geográfica (GIS) y simulación vehicular. Este marco permitió no solo evaluar cinco configuraciones geométricas para una intersección urbana compleja en Pakistán, sino también analizar su viabilidad estructural, impacto visual y desempeño operativo. Aquí se pone de manifiesto que la

integración BIM-GIS-Simulación representa el futuro en la evaluación técnica multicriterio de intersecciones urbanas.

- Conclusión de la revisión de literatura

El análisis de antecedentes internacionales muestra que la implementación de BIM en intersecciones urbanas es técnicamente viable, metodológicamente estructurada y operativamente beneficiosa, al permitir simulaciones integradas, evaluación de alternativas y planificación colaborativa. Sin embargo, la inexistencia de investigaciones aplicadas en México representa una brecha crítica en la ingeniería vial nacional.

Dentro de los hallazgos se percató, que a pesar de que en las investigaciones analizadas se realizan trabajos de campo para levantar las condiciones geométricas de las intersecciones urbanas, no se registra ninguna integración sistemática de dichos datos con información sobre el estado del pavimento. Esta desconexión representa una oportunidad desaprovechada, especialmente si se considera que el deterioro de la superficie de rodamiento es uno de los factores principales que intervienen en el nivel de servicio de las intersecciones.

Esta desconexión metodológica podría atenderse si los trabajos de campo para levantamientos topográficos y geométricos se complementarán con inspecciones visuales y no destructivas del pavimento. De esta forma, se podrían generar modelos integrados que incluyan el estado estructural de la carpeta asfáltica o de concreto, permitiendo no solo recrear las condiciones geométricas actuales, sino también el deterioro progresivo de la superficie bajo condiciones reales de carga y clima.

La evidencia empírica mostrada al inicio del apartado 3.3 subraya la necesidad de un enfoque multidimensional para la gestión de intersecciones urbanas, donde aspectos como el estado del pavimento, la semaforización, la geometría vial y la capacidad operativa deben ser abordados de forma integrada. La metodología BIM, complementada con simulación y análisis multicriterio, se presenta como una posible alternativa para subsanar estas carencias estructurales en el análisis técnico de intersecciones urbanas mexicanas.

Finalmente, dentro de los antecedentes revisados, no se ha identificado ninguna investigación publicada que aborde de manera directa y aplicada el uso de BIM en la gestión o rediseño de intersecciones urbanas en México. Se identifica una brecha crítica en la literatura nacional sobre el tema, especialmente frente al elevado grado de congestión vial, el deterioro acelerado de la infraestructura y la insatisfacción ciudadana documentados en el diagnóstico del problema. En consecuencia, La falta de investigaciones aplicadas en México representa una oportunidad relevante para generar conocimiento contextualizado.

4. METODOLOGÍA

La metodología planteada se conforma por cuatro etapas, las cuales se muestran en la Figura 4.1: Diagnóstico, Propuestas, Validación y Comparación de combinaciones. Cada una de estas etapas está compuesta por una serie de acciones que implican el uso de distintos softwares interoperables, enfocados en el análisis de los elementos del caso de estudio. Todo esto tiene como objetivo aportar, de manera integral, a la obtención de un resultado final con la mayor precisión posible.

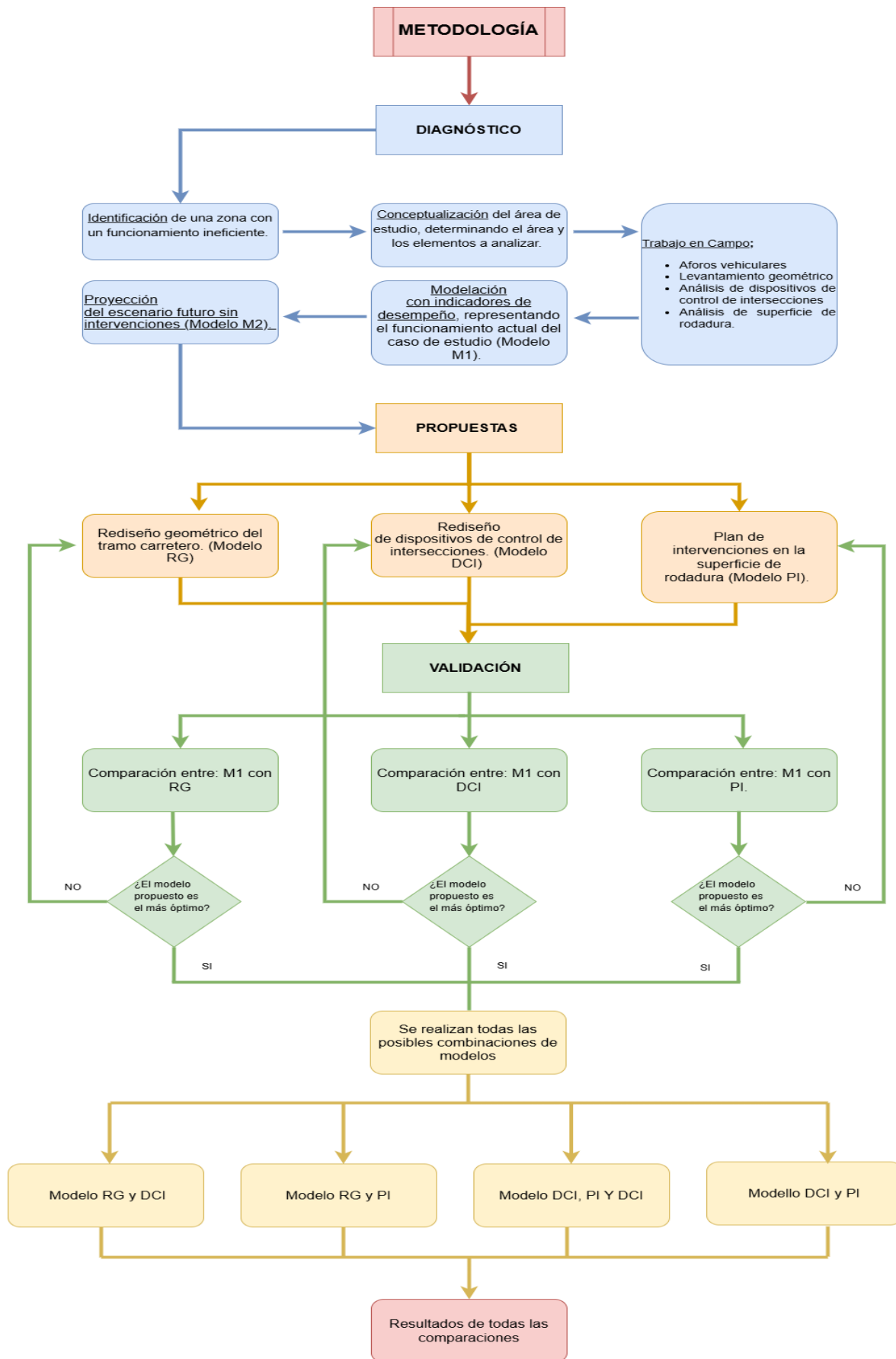


Figura 4.1- Diagrama metodológico.

4.1 Etapa 1- Diagnóstico y Proyecciones

El Diagnóstico es la primera de las cuatro etapas, esta se compone de seis pasos fundamentales para el entendimiento del proyecto, siendo el primero de ellos la identificación de un caso de estudio el cual se busca que sea una intersección o conjunto de intersecciones que presente un funcionamiento ineficiente en función de la demanda a la que es sometida. Una vez identificado el caso de estudio se procede a la conceptualización del mismo, el cual se realizará dentro del software ArcGIS identificado como un sistema de información geográfica, estos son una excelente herramienta para el procesamiento de datos estadísticos y georreferenciados, pudiendo realizar análisis sociales, ambientales, políticos, económicos, etc. Para el caso de México, es posible alimentar este tipo de herramientas con una gran cantidad de datos oficiales brindados por instituciones gubernamentales como INEGI , espacio y datos y DENU. Con esto en mente, se plantea el uso de las bases de datos mencionadas y el visualizador de información ARCGIS versión 10.5, para el análisis del caso de estudio. Esto con el objetivo de identificar los siguientes aspectos de la vialidad;

- Habitantes dentro del tramo carretero.
- Composición vial de la carretera y las vialidades aledañas.
- Zonas que presentan una mayor densidad de establecimientos comerciales.
- Puntos con mayor generación de viajes.



Figura 4.2 - Logo software ArcGIS.
Fuente: ArcGIS Resources

El trabajo en campo funge como una parte fundamental dentro del diagnóstico, en este se realizan acciones claves para la recolección de información fundamental para la elaboración de los diferentes modelos que integran la metodología. Para asegurarse de tener los datos necesarios para la investigación se realizaron las siguientes actividades:

- Aforos vehiculares.
- Levantamiento geométrico.
- Análisis de los dispositivos de control de las intersecciones dentro del caso de estudio.
- Evaluación de la superficie de rodadura.

Una vez recolectada la información antes descrita es posible realizar un modelo que represente las condiciones actuales del tramo carretero analizado. Dentro de la metodología este modelo se denomina **M1** y se realizará de manera conjunta dentro de los softwares mostrados en la tabla 4.1.

MODELO M1	
SOFTWARE	FUNCION
Handy GPS	Recolección de puntos geográficamente referenciados.
Civil3D	Generación de nube de puntos y trazado en 2D del caso de estudio.
Infraworks	Modelado visual 3D de las condiciones actuales del caso de estudio.
PTV Vissim	Microsimulación vial del nivel de servicio presente en las tres intersecciones que conforman el caso de estudio.

Tabla 4.1- Softwares y funciones para realización del modelo M1. Fuente: elaboración propia.

De esta manera se podrá tener un entendimiento más preciso del funcionamiento del tramo carretero, permitiendo identificar áreas de oportunidad que puedan ser atendidas con acciones puntuales en busca de mejorar lo más posible el nivel de servicio.

El último paso de la etapa del diagnóstico consta del desarrollo del **modelo M2**, este se encarga de representar las condiciones futuras del caso de estudio considerando un aumento vehicular en el dentro de 10 años y despreciando cualquier actividad de mantenimiento en el mismo, con ello se refleja la importancia de medidas oportunas de mantenimiento y a su vez se muestran las consecuencias de no hacerlo. Para lograr esto se hará uso de los softwares mostrados en la tabla 4.2 partiendo del archivo previo generado en el **modelo M1**.

MODELO M2	
SOFTWARE	FUNCIÓN
HDM-4	Proyección de las condiciones de la superficie de rodadura dentro de 10 años.
PTV Vissim	Microsimulación vial del nivel de servicio presente en las tres intersecciones que conforman el caso de estudio, considerando un incremento en el flujo vehicular equivalente a 10 años.

Tabla 4.2- Softwares y funciones para realización del modelo M2. Fuente: elaboración propia.

4.2 Etapa 2- Propuestas

La segunda etapa dentro de la metodología consta de las propuestas de mejora, esta es considerada como un paso clave para lograr una implementación de la metodología BIM dentro de la administración de infraestructura vial. Consta de tres modelos independientes de mejora, en cada uno de ellos se atiende un elemento clave para el buen funcionamiento de las intersecciones.

El modelo RG es nombrado así porque consta del planteamiento de un rediseño geométrico, buscando aquellos puntos críticos dentro de la geometría del tramo carretero los cuales propician la generación de congestión vehicular o accidentes viales. Haciendo uso del trazado geométrico de Civil 3D obtenido en el modelo M1 y con la extensión de Vehicle Tracking se hará un recorrido virtual de todas las posible trayectorias de los vehículos con el fin de obtener los puntos antes mencionados, una vez identificados dentro del mismo software y conforme a los parámetros de diseños oficiales se propondrán cambios puntuales en la geometría del tramo carretero los cuales busquen resolver en mayor medida los problemas encontrados (SCT, 2018).



Figura 4.3- Logo Civil 3D. Fuente: Autodesk.



Figura 4.4- Logo Vehicle Tracking. Fuente: Autodesk.

La segunda propuesta de mejora se enfoca en el análisis y modificaciones de los dispositivos de control de intersecciones, a esta se le denomina Modelo DCI, en este punto se trabajará de manera coordinada con los softwares de micro simulación vial Synchro 11 y PTV Vissim, dentro del primero se realizará un modelado de la geometría y funcionamiento cada una de las tres intersecciones que componen el caso de estudio de manera individual, usando las funciones internas de los softwares se obtendrán propuestas para un nuevo ciclo semafórico que busque beneficiar el flujo vehicular en aquellas ramas de la intersección que presenten mayor congestionamiento. Una vez que se cuente con un nuevo ciclo semafórico para cada intersección, dentro del software PTV Vissim, usando una copia del modelo del caso de estudio generado a través de la realización del modelo M1 se hará un análisis en conjunto de las intersecciones con la intención de que el software identifique una mejoría en el nivel de servicio que presenta el tramo carretero.



Figura 4.5- Logo PTV Vissim. Fuente: PTV Group.



Figura 4.6- Synchro 11. Fuente: Scribd.

La última propuesta de la segunda etapa se denomina modelo PI, consiste en un plan de intervención para la superficie de rodadura dentro de un periodo de 10 años, considerando acciones de mantenimiento rutinarias y programadas. Esto se realizará a través del software HDM-4 y bajo los estándares de conservación de carreteras (SCT, 2016).



Figura 4.7- Logo HDM-4. Fuente: HDM Global.

La implementación en conjunto de estas tres propuestas de mejora busca un aumento en el nivel de servicio presente en el tramo carretero, a través de la aplicación de acciones estratégicas realizadas conforme a las necesidades del caso de estudio.

4.3 Etapa 3- Validación de Propuestas

El proceso de validación es la tercera etapa de la metodología descrita en este apartado, consiste en la comparación de los resultados obtenidos en los modelos RG, DCI y PI realizados en la etapa de propuestas con los resultados obtenidos inicialmente en el modelo M1, para comprobar que las medidas planteadas realmente aportan un beneficio al caso de estudio todas las propuestas deben presentar un nivel de servicio mayor al modelo M1. En caso de no ser así, será necesario hacer un replanteamiento de las medidas que componen el modelo que no cumpla con la condición, este proceso se debe realizar hasta que se obtengan los resultados positivos esperados.

4.4 Etapa 4- Combinación de Propuestas

La etapa de las Combinaciones es la cuarta y última de la metodología, se considera como la más importante de este proceso, ya que es donde se valida los beneficios de la aplicación del enfoque BIM en la administración de intersecciones en vialidades urbanas, consiste en la generación de cuatro nuevos modelos, lo cuales son todas las posibles combinaciones de los tres modelos generados en la segunda etapa de

propuestas de la metodología. Una vez que se tienen estos nuevos modelos, se hace una comparación entre el nivel de servicio que ofrece cada uno de ellos, con esto se busca que la propuesta compuesta por los modelos RG, DCI y PI sea la que aporte el mejor nivel de servicio a sus usuarios, ya que es la que considera una mayor cantidad de variables y permite la obtención de medidas de intervención con una mayor precisión (véase figura 4.8).

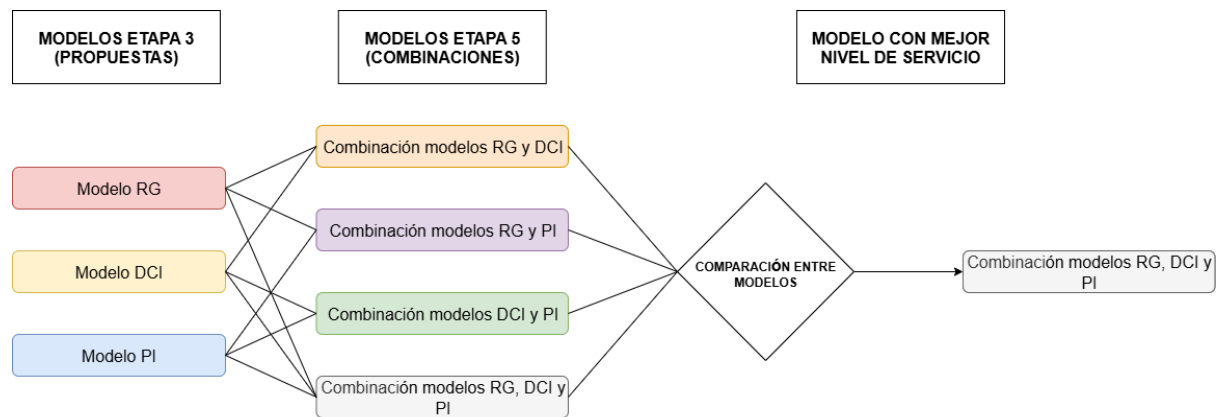


Figura 4.8- Proceso de combinación de propuestas. Fuente: elaboración propia.

5. Resultados

5.1 Resultados etapa 1- Diagnóstico

Identificación y Conceptualización

Dentro del Estado de Baja California al sur del municipio de Mexicali se encuentra la Carretera Mexicali - San Felipe la cual es una importante vía de comunicación en el estado, conectando la ciudad de Mexicali con el puerto turístico de San Felipe, situado a orillas del Mar de Cortés. Conocida oficialmente como Carretera Federal 5 (MEX 5), es vital para la conectividad y el desarrollo económico de la región, facilitando el transporte de bienes y personas entre el interior del país y la costa. Tiene una longitud aproximada de 180 kilómetros, discurriendo en su mayoría en dirección este-oeste. Inicia en la ciudad de Mexicali, capital del estado de Baja California, y finaliza en San Felipe, en la costa del Mar de Cortés (Mungaray & García, 2015).

A través de recorridos sobre la vialidad se ha identificado que el tramo carretero delimitado por las intersecciones con las vialidades; Pórticos del Valle, General Santiago Vidaurri y Avenida Real, se encuentra en una etapa de constante crecimiento, siendo los desarrollos habitacionales y comerciales los que presentan mayor auge al momento en que se realizó el análisis. El tramo carretero analizado dentro de este estudio cuenta con una extensión mayor a dos kilómetros, una sección compuesta por dos carriles de circulación por sentidos acompañados de un carril de acotamiento en su costado derecho, las secciones de la vialidad se encuentran separadas por un camellón central, el cual, a lo largo del tramo, alberga distintos tipos de señalamientos verticales (Figura 5.1 - Sección transversal Carretera Mexicali - San Felipe).

Figura 1. Sección transversal



Figura 5.1 - Sección transversal Carretera Mexicali - San Felipe. Fuente: Elaboración propia con base de datos de google earth.

El acelerado crecimiento del tramo carretero a generado un incremento en el flujo diario de vehículos que transitan sobre él, ocasionando congestionamiento en las horas pico de afluencia vehicular, esto trae consigo problemas como aumento en los accidentes vehiculares, mayor contaminación, incremento en las colas de semáforo, desgaste prematuro de la superficie de rodamiento, etc.

En la Figura 5.2- Tipo de Vialidades, se puede apreciar en color naranja la Carretera Mexicali - San Felipe y en distintas tonalidades de verdes otro tipo de vialidades como; Calles, Boulevard y Avenidas. En esta Figura se puede apreciar cómo es que las vialidades en verde mencionadas desembocan sobre la carretera Mexicali - San Felipe, siendo esta la ruta de entrada y salida para todas estas vías.

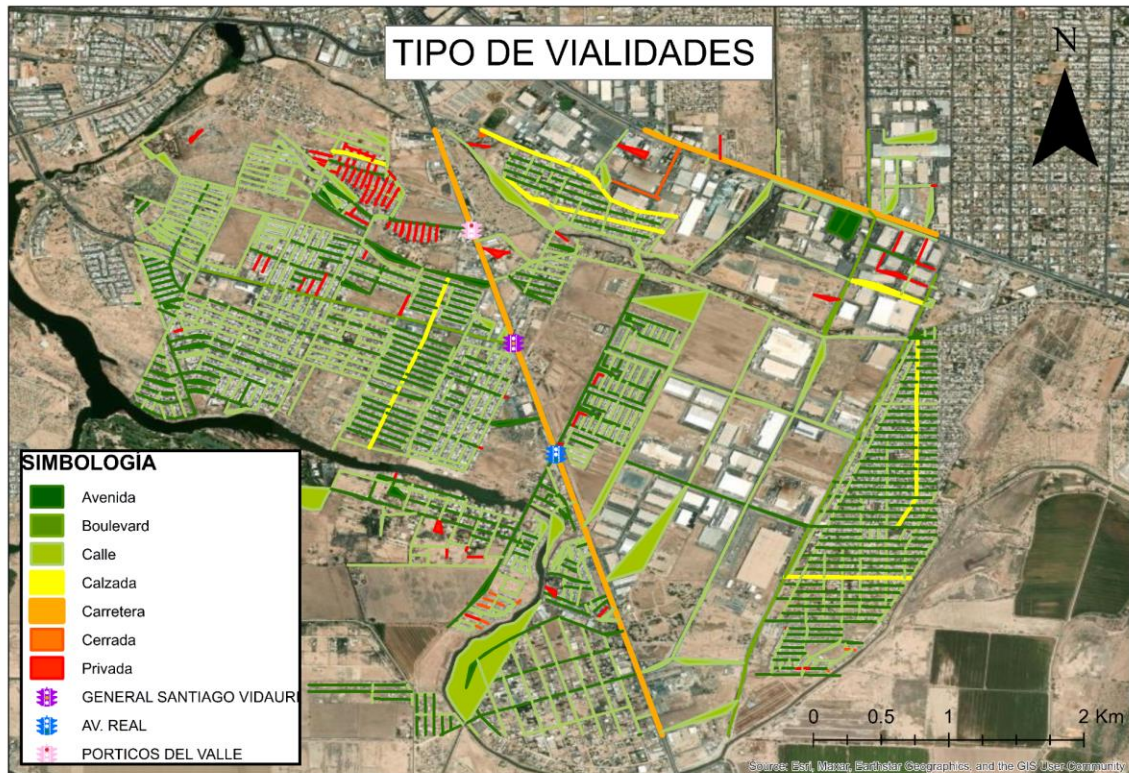


Figura 5.2 - Tipo de vialidades. Fuente: Elaboración propia con base de datos del DENUE.

Para entender la relevancia de la carretera Mexicali - San Felipe para los habitantes de la zona es necesario conocer la distribución de la población que reside en esta área, para ello a través de la información proporcionada por el DENUE, se identificaron un total de 13 unidades tipo AGEB (Área Geoestadística Básica) las cuales fueron seleccionados por su conexión directa con esta carretera. En la siguiente Figura se pueden apreciar las AGEBS mencionadas, caracterizadas por una escala de color de acuerdo a la cantidad de habitantes que residen en ellos. Conforme al análisis se obtiene que aquellos AGEB ubicados sobre la vialidad Gral. Santiago Vidaurri son los que presentan una mayor cantidad de habitantes, considerando entonces la intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Gral. Santiago Vidaurri como la de mayor importancia para los residentes de la zona (Figura 5.3- Población por AGEB).

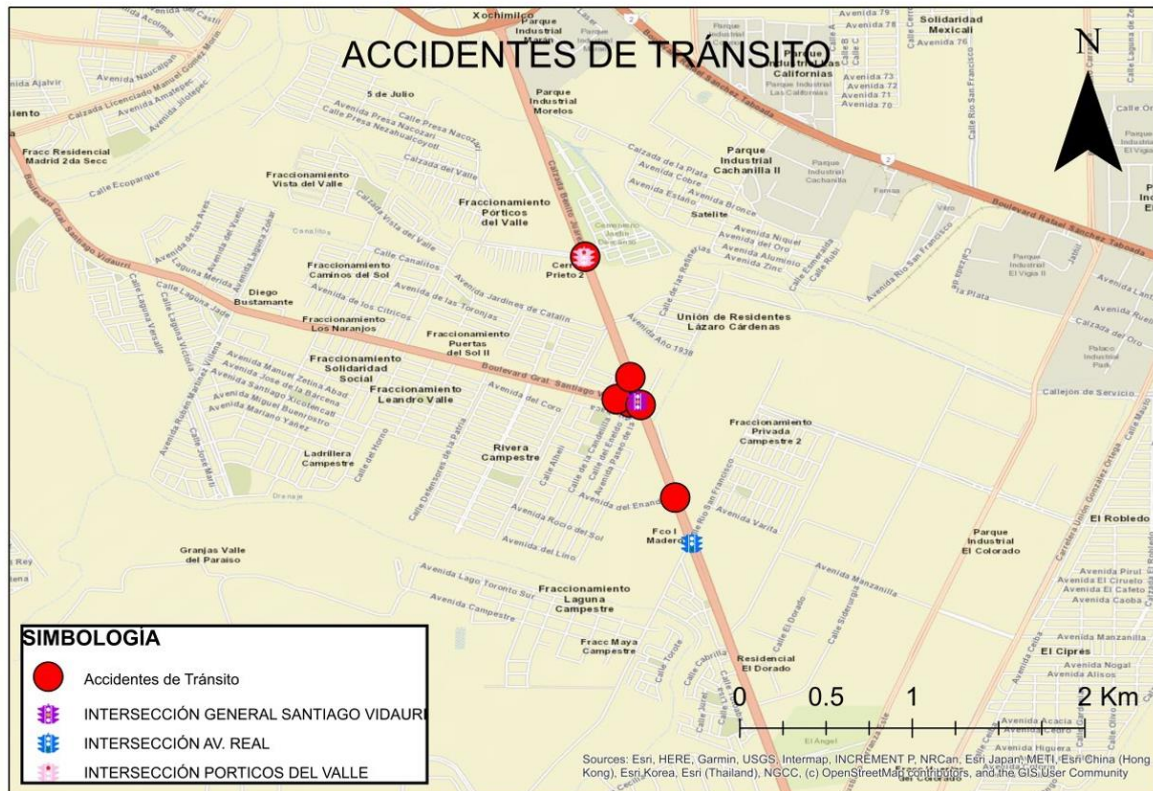


Figura 4.4- Accidentes de tránsito. Fuente: elaboración propia con base de datos del DENUE.

Como se ha mencionado la carretera Mexicali - San Felipe tiene una alta presencia de vehículos pesados, esto por la relevancia que tiene esta vialidad para el transporte de mercancía que, junto con su ubicación al sur de la ciudad, la convierte en una zona ideal para grandes unidades económicas. En la Figura 5.5 se puede apreciar todas las unidades económicas presentes dentro de los AGEBS descritos anteriormente, se observa como en el extremo sur existe una concentración de aquellas unidades económicas con una mayor cantidad de personal ocupado y en la parte superior de la imagen se puede apreciar un fuerte cúmulo de unidades económicas pequeñas, ya que en su mayoría no pasan de 50 empleados, esto es debido a que estas unidades económicas se ubican dentro de los diversos desarrollos habitacionales presentes en la zona. En base a esto, se determina que la carretera Mexicali - San Felipe es una zona altamente comercial, con relevancia no solo para los habitantes de la zona, si no también para la ciudad.



Figura 5.5- Personal ocupado por establecimiento. Fuente: elaboración propia con base de datos del DENUE.

En el extremo sur del caso de estudio se encuentra la intersección entre la Carretera Mexicali - San Felipe y Avenida Real, en ella se encuentra el acceso a diversas zonas habitacionales como los son; Campestre, Coto Sur, El Dorado y Laguna Campestre. Conformada por cuatro ramas, en su sección oeste cuenta con canalizaciones para incorporar a la Avenida Real, a diferencia de su sección opuesta donde este tipo de vueltas carecen de estas estructuras. A pesar de tener cuatro ramas únicamente cuenta con tres dispositivos semafóricos, siendo la rama sobre el lado Este la que no se encuentra regulada, habilitada solo para realizar vuelta a la derecha para los vehículos que circulen sobre ella. Cuenta con sus respectivas secciones para el cruce peatonal, pero no se aprecia en ella ninguna parada para el transporte público. En la Figura 5.6 se muestra la geometría de la intersección mencionada.

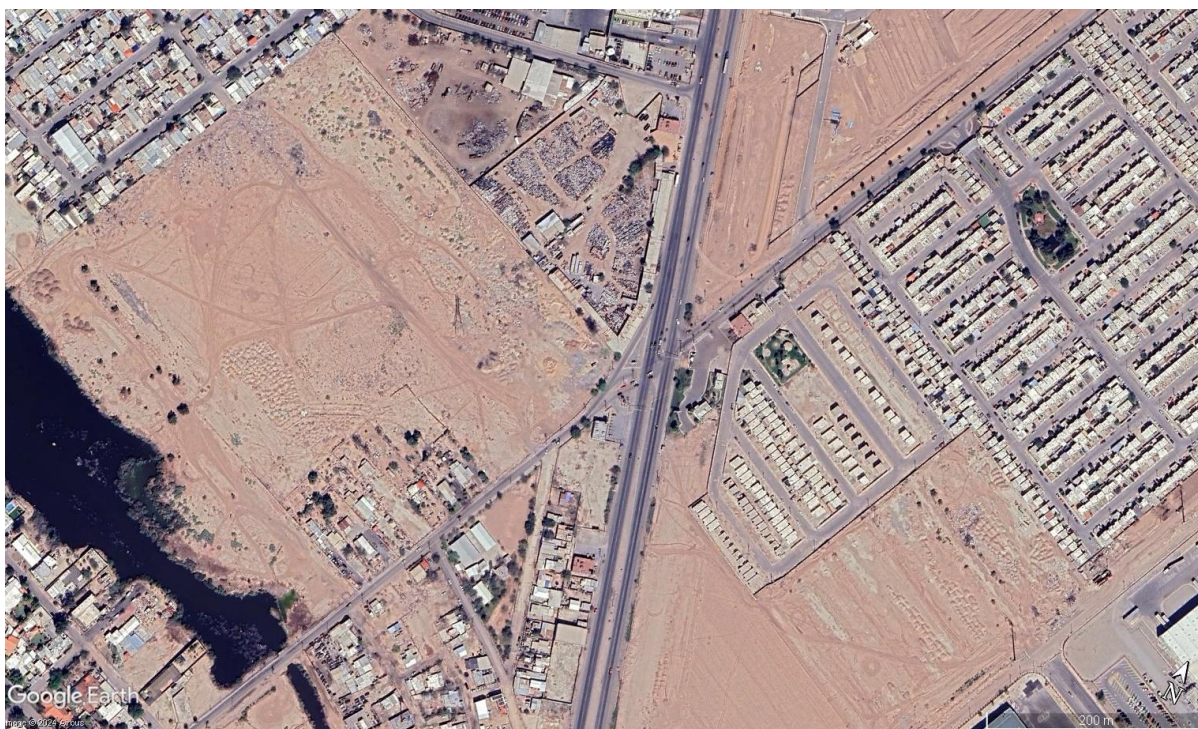


Figura 5.6- Intersección Carretera Mexicali San Felipe con Avenida Real. Fuente: elaboración propia con base de datos de google earth.

La intersección generada entre la Carretera Mexicali - San Felipe y la calle Pórticos del Valle es de tipo T, cuenta con isletas separadoras en ambas vialidades y en sentido sur a norte carece de la presencia de secciones canalizadoras para dar vuelta a la derecha. En ella se recibe flujo vehicular del norte, sur y oeste, el cual es controlado por dispositivos semafóricos, los cuales permiten a los vehículos hacer tres tipos de movimientos; Recto, Vuelta a la Derecha y Retorno. Dentro de sus elementos de infraestructura, cuenta con cruces peatonales delimitados por rayas de cebra en la superficie del pavimento y una parada de transporte público (Véase Figura 5.7- Intersección Carretera Mexicali San Felipe con Pórticos del Valle.).



Figura 5.7- Intersección Carretera Mexicali San Felipe con Pórticos del Valle. Fuente: elaboración propia con base de datos de google earth.

Con la vialidad General Santiago Vidaurri se genera la segunda intersección analizada, que como se mencionó anteriormente esta es la intersección prioritaria del caso de estudio, al igual que la anterior es una intersección de tipo T con camellones centrales que separan los sentidos de circulación y secciones canalizadoras para aquellos vehículos que requieran de dar vuelta a la derecha. En ella se presenta flujo vehicular con destino al norte, sur y oeste de la ciudad, regulados por tres dispositivos semafóricos permiten a los vehículos hacer tres tipos de movimientos; Recto, Vuelta a la Derecha y Retorno. Sobre su brazo norte se pueden encontrar en ella dos paradas para el transporte público, distribuidas sobre ambos sentidos de la vialidad, en adición, cuenta con tres cruces peatonales, los cuales permiten a los peatones atravesar diferentes secciones de la intersección (Figura 5.8).



Figura 5.8- Intersección Carretera Mexicali San Felipe con General Santiago Vidaurri. Fuente: elaboración propia con base de datos de google earth.

Trabajo en campo

- Aforos vehiculares

Para nutrir de información verídica a los modelos de micro simulación vial se realizaron una serie de aforos manuales en las intersecciones que componen el caso de estudio. Basados en las recomendaciones de guías internacionales de ingeniería de transporte, en cada uno de los puntos analizados se tomaron videos de 15 minutos del flujo vehicular dentro del periodo de 7:30 - 8:30 am en los días martes, miércoles y jueves, se trabajó bajo la metodología de conteo manual y se realizó una clasificación de los vehículos pesados que circulan sobre la vialidad (Institute of Transportation Engineers, 2010; SICT, 2016 ;SCT, 2017).

DIA Y FECHA	HORA INICIO	HORA FIN	N - N	N - S	N - O	S - S	S - N	S - O	O - S	O - N
Pórticos del Valle 11/02/25	7:30	7:45	6	339	55	19	587	18	22	155
	7:45	8:00	4	327	58	15	521	19	19	186
	8:00	8:15	8	364	76	17	369	16	23	111
	8:15	8:30	11	364	76	17	339	16	23	76
Pórticos del Valle	7:30	7:45	6	277	38	24	567	16	17	189
	7:45	8:00	5	391	69	20	524	18	32	130

12/02/25	8:00	8:15	6	328	68	15	104	9	17	309
	8:15	8:30	12	329	64	22	82	20	12	369
Pórticos del Valle 13/02/25	7:30	7:45	9	355	82	9	551	9	17	195
	7:45	8:00	7	355	82	9	534	9	17	152
	8:00	8:15	7	256	85	8	381	13	13	119
	8:15	8:30	3	256	85	8	382	13	13	95

Tabla 5.1- Aforos vehiculares intersección carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del Valle.
Fuente: elaboración propia.

DIA Y FECHA	HORA INICIO	HORA FIN	N - N	N - S	N - O	S - S	S - N	S - O	O - S	O - N
Gral. Santiago Vidaurri 11/02/25	7:30	7:45	7	283	72	6	400	140	194	158
	7:45	8:00	7	298	85	19	373	110	181	126
	8:00	8:15	0	214	75	9	283	88	136	120
	8:15	8:30	2	229	71	9	266	92	114	98
Gral. Santiago Vidaurri 12/02/25	7:30	7:45	7	283	72	6	400	140	194	158
	7:45	8:00	7	298	85	19	373	110	181	126
	8:00	8:15	0	214	75	9	283	88	136	120
	8:15	8:30	2	229	71	9	266	92	114	98
Gral. Santiago Vidaurri 13/02/25	7:30	7:45	7	283	72	6	400	140	194	158
	7:45	8:00	7	298	85	19	373	110	181	126
	8:00	8:15	0	214	75	9	283	88	136	120
	8:15	8:30	2	229	71	9	266	92	114	98

Tabla 5.2- Aforos vehiculares intersección carretera Mexicali - San Felipe con Gral. Santiago Vidaurri.
Fuente: elaboración propia.

DIA Y FEC HA	HOR A INICI O	HOR A FIN	N - N	N - S	N - O	N - E	S - S	S - N	S - O	S - E	O - S	O - E	O - N	E - N
Av. Real 04/02 /25	7:30	7:45	5	284	42	94	7	375	8	11	6	17	64	191
	7:45	8:00	3	334	63	85	2	247	18	7	9	28	66	156
	8:00	8:15	4	344	34	93	6	223	9	11	6	27	41	111
	8:15	8:30	4	275	31	97	10	232	13	13	6	17	64	94
Av. Real 05/02 /25	7:30	7:45	6	335	100	96	6	273	30	5	20	22	64	209
	7:45	8:00	2	340	95	88	4	165	25	12	17	32	71	134
	8:00	8:15	3	344	51	105	5	236	7	12	7	17	66	118
	8:15	8:30	4	238	47	81	1	190	8	8	3	9	64	91
Av. Real 06/02 /25	7:30	7:45	0	307	36	96	4	265	12	5	4	14	71	220
	7:45	8:00	1	352	97	119	4	288	21	10	11	38	66	199
	8:00	8:15	0	299	44	119	8	202	11	10	6	39	62	192
	8:15	8:30	4	300	45	80	4	234	11	4	6	22	31	78

Tabla 5.3- Aforos vehiculares intersección carretera Mexicali - San Felipe con Av. Real. Fuente: elaboración propia.

- Levantamiento geométrico

Para poder elaborar el trazado geométrico se realizaron múltiples visitas al caso de estudio, donde se recolectaron y procesaron puntos geolocalizados, así como un análisis de las dimensiones y cantidad de carriles que componen el tramo carretero analizado.

Para tener una base de puntos sobre la cual realizar el trazado de la vialidad, haciendo uso de la aplicación Handy GPS se recolectaron un total de 1013 puntos geolocalizados a lo largo de los 2 kilómetros de extensión del caso de estudio, estos puntos fueron tomados a cada 5 metros en las intersecciones y a cada 10 metros en tramos libres.

Una vez recolectados los puntos, estos fueron integrados en un formato “.txt” para poder visualizarlos en Civil 3D y generar una nube de puntos en formato “.dwg” (véase figura 5.9).

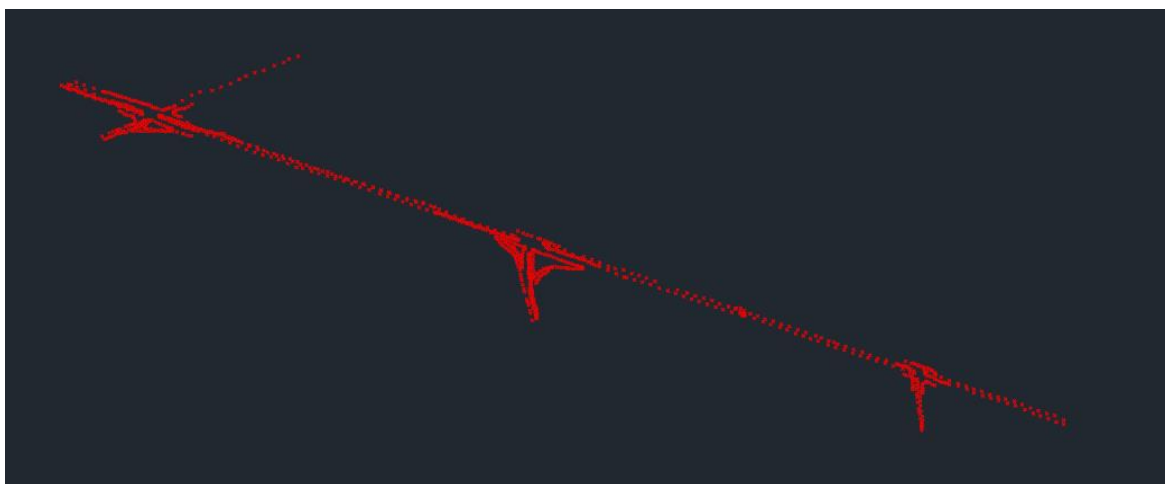


Figura 5.9- Visualización de nube de puntos “.dwg”. Fuente: elaboración propia.

A partir de la obtención de la nube de puntos, se procedió a dibujar la vialidad dentro del software Civil 3D conforme a la cantidad y dimensiones de los carriles identificados en el recorrido visual realizado previamente. Terminado el trazado de la vialidad, se generó una extensión del archivo en formato “.imx” para su posterior integración dentro de los modelos que componen la metodología (véase figura 5.10).

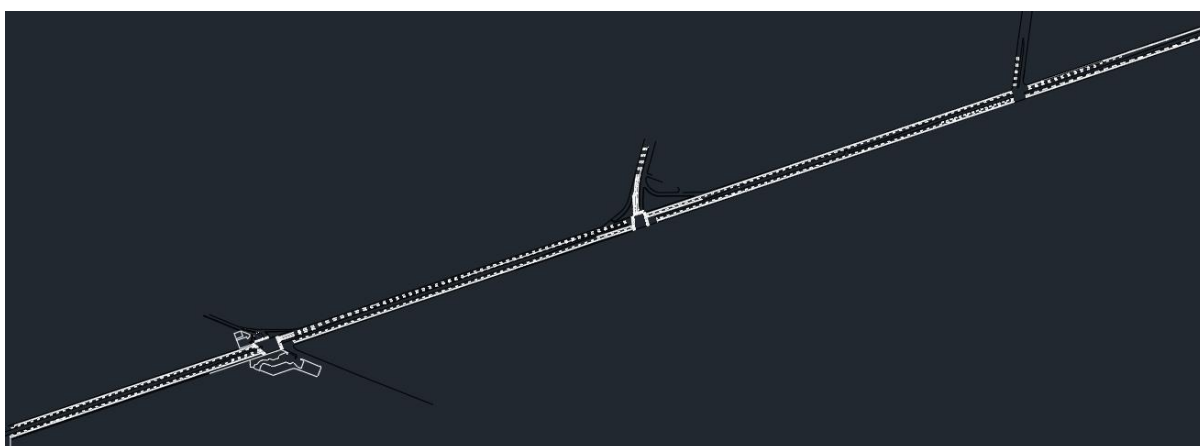


Figura 5.10- Trazado del caso de estudio dentro del software Civil 3D. Fuente: elaboración propia.

- Análisis de dispositivos de control de intersecciones

Con el fin de tener la información necesaria para realizar los modelos de micro simulación vial se analizaron los tiempos de ciclos semafóricos y los aforos recolectados de cada intersección mostrados en las tablas 5.4, 5.5 y 5.6.

CICLO SEMAFÓRICO PORTICOS DEL VALLE 7:30 - 8:30 AM				
SENTIDO	VERDE	AMARILLO	ROJO	TOTAL SEGUNDOS
S - N	78	3	59	134
S - O	21	3	116	
N - S	72	3	65	
N - N	15	3	122	
O - N	32	3	105	

Tabla 5.4- Ciclo semafórico intersección Carretera Mexicali – Pórticos del Valle. Fuente: elaboración propia.

CICLO SEMAFÓRICO SANTIAGO VIDAURRI 7:30 - 8:30 AM				
SENTIDO	VERDE	AMARILLO	ROJO	TOTAL SEGUNDOS
S - N	86	3	51	136
S - O	36	3	101	
N - S	61	3	76	
N - N	11	3	126	
O - N	30	3	107	

Tabla 5.5- Ciclo semafórico intersección Carretera Mexicali – San Felipe con General Santiago Vidaurri. Fuente: elaboración propia.

CICLO SEMAFÓRICO AV. REAL 7:30 - 8:30 AM				
SENTIDO	VERDE	AMARILLO	ROJO	TOTAL SEGUNDOS
S - N	68	3	69	138
S - O	22	3	115	
N - S	80	3	57	
N - N	34	3	103	
O - N	27	3	110	

Tabla 5.6- Ciclo semafórico intersección Carretera Mexicali – Avenida Real. Fuente: elaboración propia.

- Análisis de la superficie de rodadura

Como se mencionó anteriormente, el estado de la superficie de rodamiento influye directamente en el nivel de servicio. Para determinar el estado actual de la superficie de rodamiento, se utilizaron los datos recopilados en el estudio *“Implementación de un sistema de gestión de pavimentos en contextos urbanos: caso de estudio en Mexicali, B.C.”* (Martínez Lazcano et al., 2023). Este trabajo, evaluó el Índice de Condición del Pavimento (PCI) en diversas vialidades de la ciudad de Mexicali, incluyendo la vía analizada en esta investigación. La información sirvió como base para el diagnóstico del estado actual del pavimento.

Dentro del trabajo previamente mencionado dividieron el tramo carretero en 12 secciones y evaluaron individualmente el índice PCI conforme al método de análisis establecido en el manual “PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI)”. En la tabla 5.7 se muestran los valores de PCI obtenidos para cada tramo delimitado.

Índice de Condición del Pavimento (PCI) Carretera Mexicali – San Felipe		
Tramo	PCI	Estado
1	70	Muy bueno
2	60	Bueno
3	16	Muy malo
4	15	Muy malo
5	0	Fallado
6	10	Muy malo
7	60	Bueno
8	50	Regular
9	80	Muy bueno
10	81	Muy bueno
11	81	Muy Bueno
12	15	Muy malo
PCI TOTAL	42	Regular

Tabla 5.7-. Condicion del pavimento carretera Mexicali – San Felipe. Fuente: extraído del estudio *“Implementación de un sistema de gestión de pavimentos en contextos urbanos: caso de estudio en Mexicali, B.C.”*

Conforme a los rangos de clasificación del PCI, en promedio el tramo carretero presenta un estado regular.

Bektursunova, G. y colaboradores, en su documento "Theoretical and Experimental Methods for Determining the Allowable Speed Limits on High-Speed Highways", señalan que, para pavimentos en estado regular los vehículos livianos presentan una reducción del 13 % respecto a la velocidad de diseño, mientras que los vehículos pesados experimentan una disminución aún más significativa, del 34 %. Estos valores se derivan del análisis de campo, donde se midieron velocidades reales en relación con las velocidades teóricas de diseño en segmentos con condiciones de pavimento

similares a las del tramo carretero analizado en esta investigación. (Bektursunova et al. 2025).

Con base en lo mencionado anteriormente, y considerando que la carretera Mexicali–San Felipe tiene una velocidad de diseño de 60 km/h, el estado regular de su superficie de rodadura provoca que los vehículos tiendan a circular a una velocidad aproximada de 56 km/h en el caso de vehículos ligeros, y alrededor de 43 km/h para vehículos pesados.

Esta disminución en la velocidad operativa impacta directamente en el tiempo de viaje, generando demoras acumuladas, especialmente en tramos largos. Una reducción del 15–30 % en la velocidad puede traducirse en un incremento proporcional del tiempo total de recorrido, lo cual afecta la eficiencia logística, el confort del conductor y los costos operativos. Además, la disparidad de velocidades entre tipos de vehículos contribuye a la formación de cuellos de botella, genera maniobras de adelantamiento más frecuentes y puede provocar congestión localizada, sobre todo en horas pico o en zonas con alta densidad vehicular. En el largo plazo, esta situación reduce la capacidad efectiva de la vía, eleva el riesgo de accidentes y exige una planificación más estricta del mantenimiento vial.

Modelo M1

A través del software Infracore, se realizó un modelo visual 3D de las condiciones actuales del caso del estudio con un nivel de detalle de 200 conforme a las especificaciones descritas previamente en el Marco teórico. Con este modelo se busca la obtención de una representación fidedigna del tramo carretero estudiado, la cual servirá como una herramienta de apoyo en análisis de la evaluación inicial de las condiciones geométricas del caso de estudio (véase figuras 5.11, 5.12 y 5.13). Cabe resaltar que la realización de este modelo visual fue gracias a la previa elaboración del trazado del caso de estudio dentro del software Civil 3D, el cual se importó dentro del software Infracore para poder modelar el tramo carretero.

En busca de darle un mayor realismo al modelo, se optó por integrar aquellas edificaciones de mayor relevancia presentes en las intersecciones, estas fueron modeladas por medio del software Sketchup, para posteriormente ser importado a modelos de Infracore.

Para representar adecuadamente la utilidad y calidad del modelo visual 3D generado, se puede encontrar en el siguiente enlace un recorrido virtual de la representación de todo el tramo carretero.

https://drive.google.com/drive/folders/1cObt9ys97G8_onbWplEfa2r4dKlyEbe1?usp=drive_link

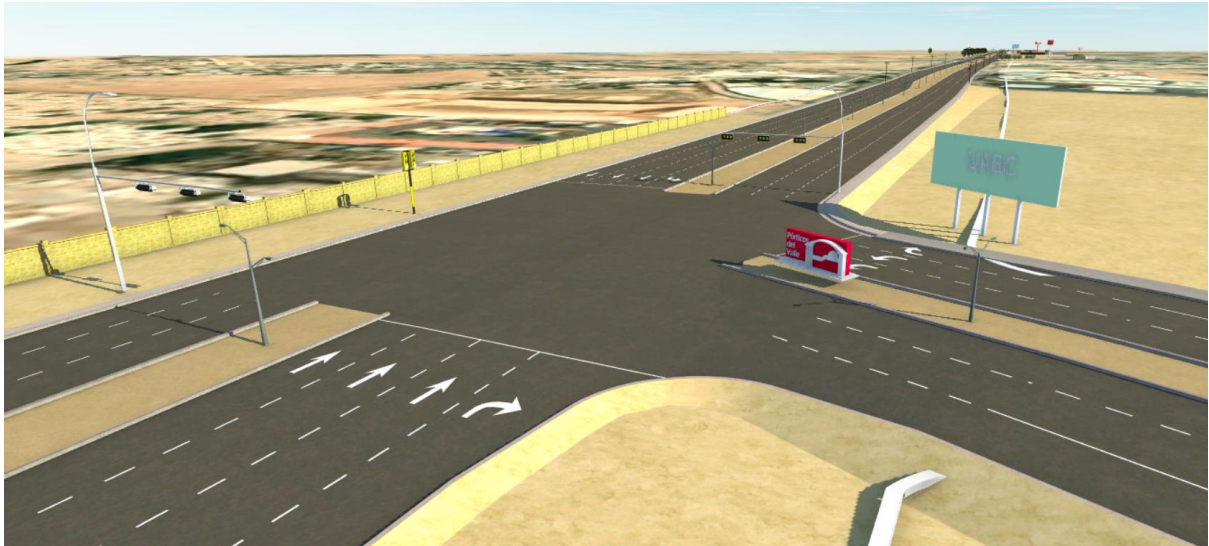


Figura 5.11- Modelado visual 3D de la intersección carretera Mexicali-San Felipe con Pórticos del Valle. Fuente: elaboración propia.



Figura 5.12- Modelado visual 3D de la intersección carretera Mexicali-San Felipe con Gral. Santiago Vidaurri. Fuente: elaboración propia.



Figura 5.13- Modelado visual 3D de la intersección carretera Mexicali-San Felipe con Av. Real. Fuente: elaboración propia.

Conforme al proceso metodológico descrito anteriormente, se hizo uso del software de micro simulación vehicular PTV Vissim, para poder medir el nivel de servicio presente en el tramo carretero y posteriormente evaluar los cambios propuestos por el análisis realizado. Para poder generar un modelo de micro simulación vial fidedigno a la realidad se utilizó el archivo DWG elaborado previamente en el trazo del caso de estudio, este fue usado como mapa base sobre el cual se trazó la carretera, pudiendo representar de esta manera a una escala adecuada el diseño geométrico del tramo carretero (véase figura 5.14).

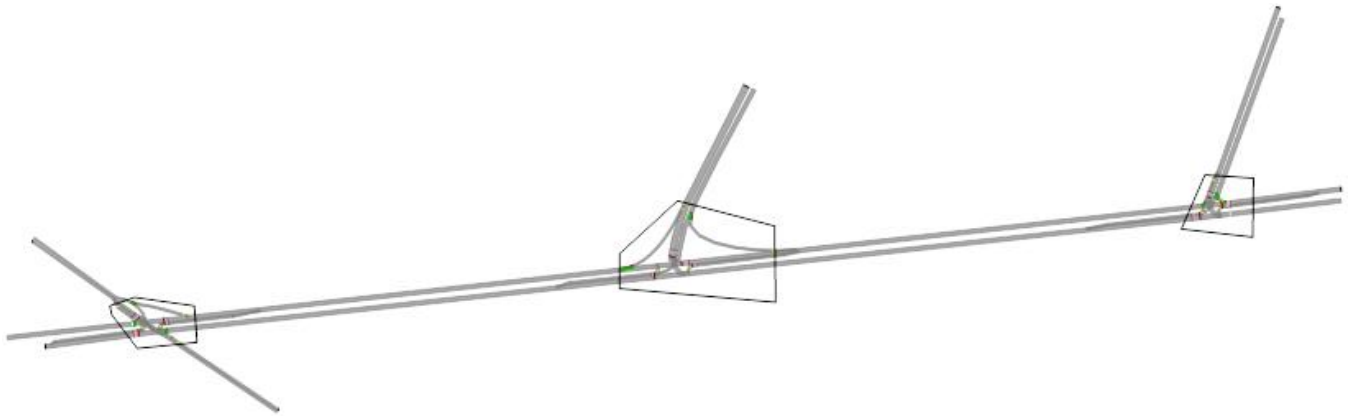


Figura 5.14- Modelo de micro simulación vial generado en Vissim. Fuente: elaboración propia.

Una vez trazada la vialidad dentro del software PTV Vissim, se cargó la información recolectada en la etapa de trabajo de campo, poniendo los respectivos ciclos semafóricos y volúmenes de tránsito para cada una de las tres intersecciones. Con esta información el software pudo realizar una estimación del nivel de servicio presente en cada intersección, arrojando los siguientes resultados;

- Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del valle: Nivel de servicio E.
- Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Gral. Santiago Vidaurri: Nivel de servicio C.
- Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Av. Real: Nivel de servicio D.

Conforme a estos resultados se puede concluir que todas las intersecciones que integran el caso de estudio presentan un nivel de servicio entre al límite del funcionamiento y un funcionamiento deficiente de acuerdo con lo mencionado en el apartado del marco teórico. Esto demuestra la necesidad de acciones oportunas y específicas centradas en mejorar el nivel de servicio.

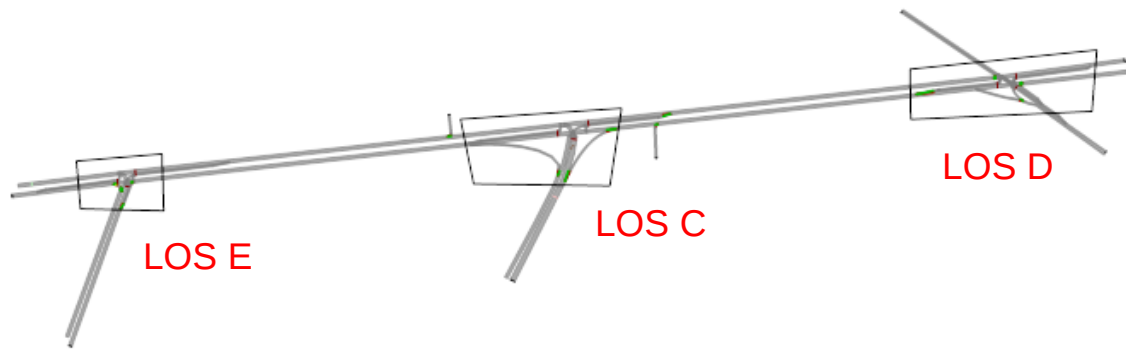


Figura 5.15- Nivel de servicio presente en cada intersección. Fuente: elaboración propia.

Modelo M2

Como último paso de la primera etapa de la metodología se realizó el Modelo M2, el cual representa una proyección dentro de 10 años de las condiciones del caso de estudio considerando que no se realizaron intervenciones de operación y mantenimiento en el mismo.

Con el fin de determinar la condición de la superficie de rodadura durante este periodo, se desarrolló un modelo en el software HDM-4, alimentado con la información recolectada durante los trabajos de campo. Una vez configurado el modelo, se ejecutó una simulación en el programa, obteniéndose los siguientes resultados en los aspectos de regularidad (IRI), área fisurada total y área de baches (véanse las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18).

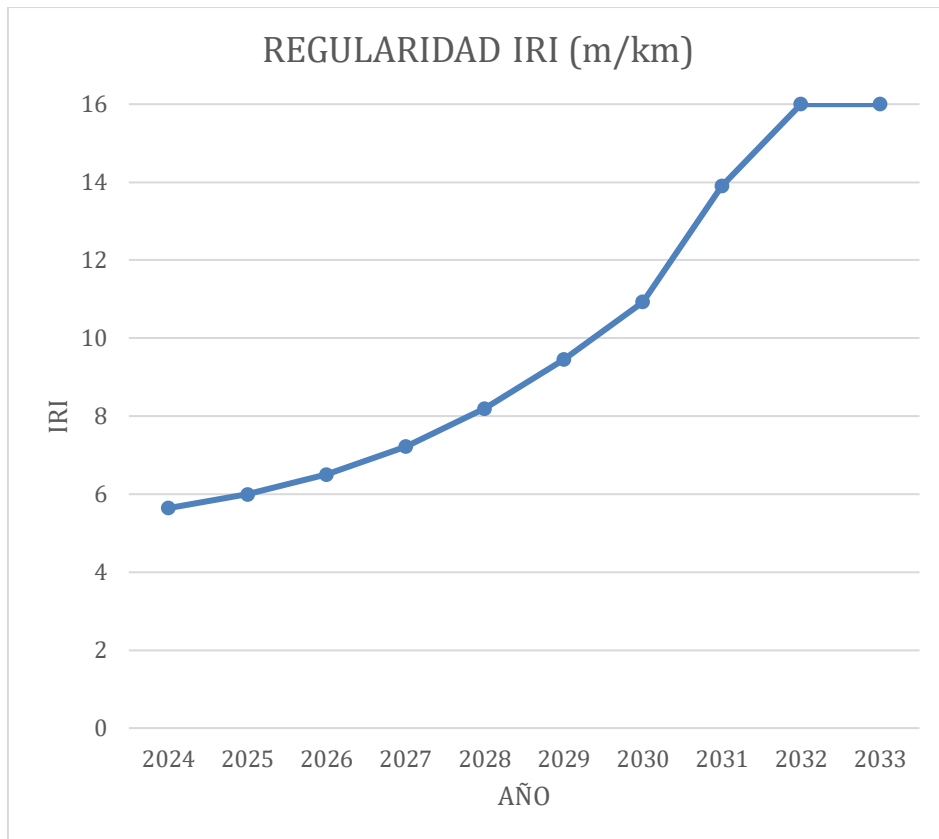


Figura 5.16- Regularidad del IRI dentro de 10 años. Fuente: elaboración propia.

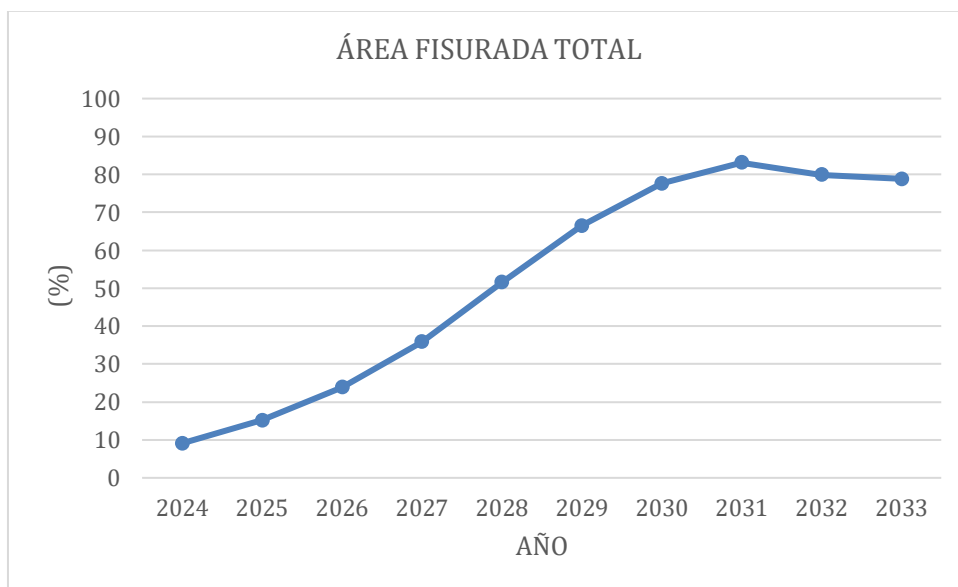


Figura 5.17- Área fisurada total dentro de 10 años. Fuente: elaboración propia.

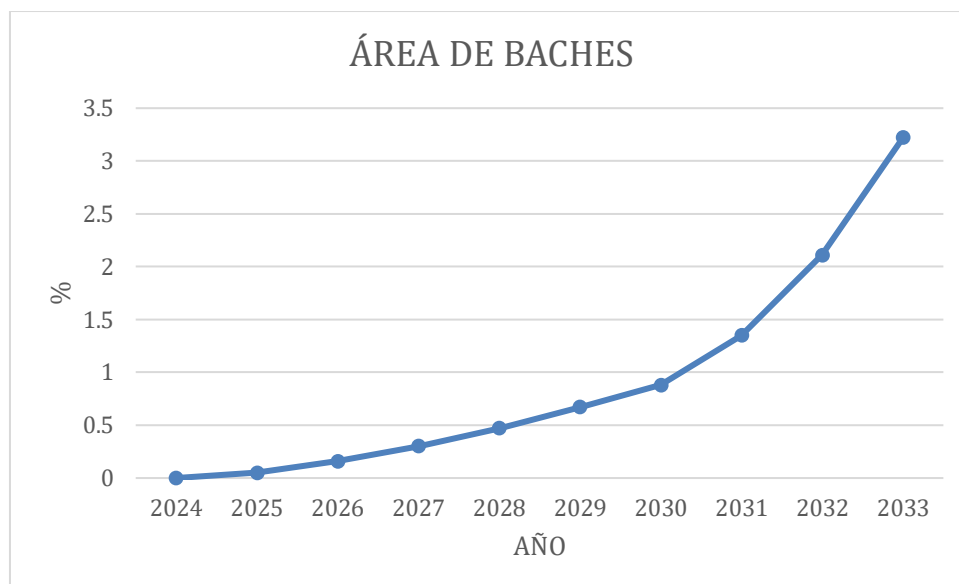


Figura 5.18- Área de baches dentro de 10 años. Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos son los esperados, si no se realiza ninguna medida de mantenimiento sobre la superficie de rodadura a lo largo de 10 años, esta pasará a un estado intransitable, esto lo podemos ver a través del número de la regularidad del IRI el cual es asignado a vialidades que requieren de una reconstrucción de la superficie de rodadura, de igual manera el área de baches y de fisuras es mayor a lo recomendado para superficies de rodadura bituminosas (SCT, 2016).

Para poder medir el nivel de servicio futuro de las intersecciones, es necesario realizar una proyección del crecimiento vehicular dentro de 10 años, para lograr esto se realizó una gráfica de dispersión a partir de los aforos vehiculares entre el periodo de tiempo de 2014-2023 disponible dentro de los datos viales (SICT, 2014–2024). Esto dio como resultado una ecuación de la gráfica con la cual es posible estimar el crecimiento vehicular, cabe mencionar que esta ecuación está respaldada por un valor de R^2 de 0.75, lo cual es considerado como aceptable (Gelman & Hill, 2007).

AÑO	TDPA
2023	27,710
2022	24,712
2021	24,127
2020	22,183
2019	23,488
2018	24,275
2017	22,786
2016	19,898
2015	18,734

2014	20,517
------	--------

Tabla 5.8- TDPA carretera Mexicali - San Felipe 2014-2023. Fuente: elaboración propia a partir de Datos viales.

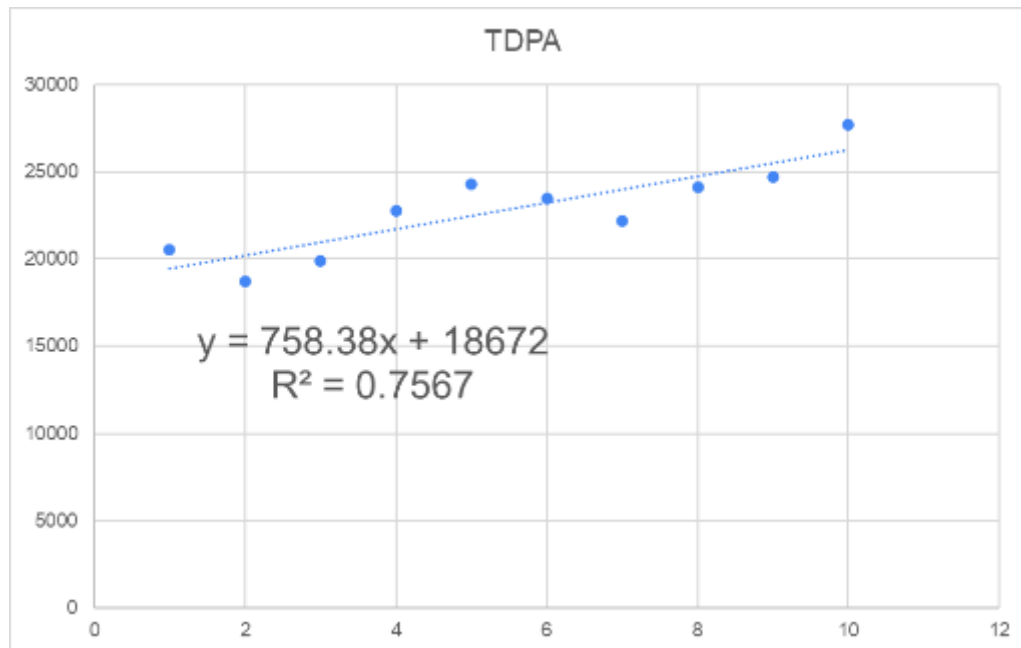


Figura 5.19- Ecuación de la gráfica usada para la proyección del crecimiento vehicular. Fuente: elaboración propia.

Una vez calculado el nuevo flujo vehicular, se realizó una copia del modelo M1 generado dentro del programa PTV Vissim y a este se le asignó el nuevo flujo, generado así el modelo M2 dentro del software arrojando los siguientes resultados;

- Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del valle: Nivel de servicio **D**.
- Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Gral. Santiago Vidaurri: Nivel de servicio **E**.
- Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Av. Real: Nivel de servicio **E**.

Este análisis arrojó como resultado un decremento esperado en el nivel de servicio de las intersecciones en comparación con los resultados mostrados en la figura 4.16. Estos resultados indican que, si no se realiza ninguna modificación en el ciclo semafórico o en la cantidad de carriles del tramo carretero, dentro de 10 años todas sus intersecciones presentaran un nivel de servicio totalmente superado por la demanda.



Figura 5.20- Nivel de servicio dentro de 10 años en cada intersección. Fuente: elaboración propia.

5.2 Resultados etapa 2- Propuestas

5.2.1 Rediseño geométrico del caso de estudio (Modelo RG)

- Análisis geométrico

Al momento de realizar los aforos vehiculares, se identificaron condiciones geométricas que impedían a los usuarios realizar ciertas maniobras de manera segura y eficiente, sobre todo a los vehículos de carga pesada, en donde se encontró que dentro de las tres intersecciones que componen el caso de estudio la geometría de estas impide a este tipo de vehículos realizar maniobras de retorno de una manera segura.

Para identificar con mayor precisión los puntos dentro de las intersecciones donde las condiciones geométricas no son las óptimas, se hizo uso de la extensión Vehicle Tracking en Civil 3D, para evaluar todas las curvas presentes en el caso de estudio usando el trazado geométrico obtenido a partir del **modelo M1**. A continuación se presentan, para cada intersección, aquellos puntos que son considerados de oportunidad para una optimización en su diseño geométrico.

Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con General Santiago Vidaurri: Retomando lo mencionado en el apartado de descripción del caso de estudio, la vialidad General Santiago Vidaurri está compuesta por tres carriles de circulación hasta topar con el punto en donde se intercepta con la carretera Mexicali - San Felipe, esta última únicamente está integrada por dos carriles de circulación. La diferencia de carriles obliga a los vehículos que van dentro del tercer carril de la vialidad General Santiago Vidaurri integrarse de manera brusca al segundo carril o en su defecto invadir el carril de acotamiento al querer incorporarse a la carretera Mexicali - San Felipe. Ambas acciones propician la generación de accidentes vehiculares, ya que no existe una continuidad en este tercer carril que permita una incorporación progresiva y segura, en la figura 21 y en el plano RG - 01 dentro del anexo para los planos del modelo RG se muestra el recorrido de los vehículos antes mencionados.

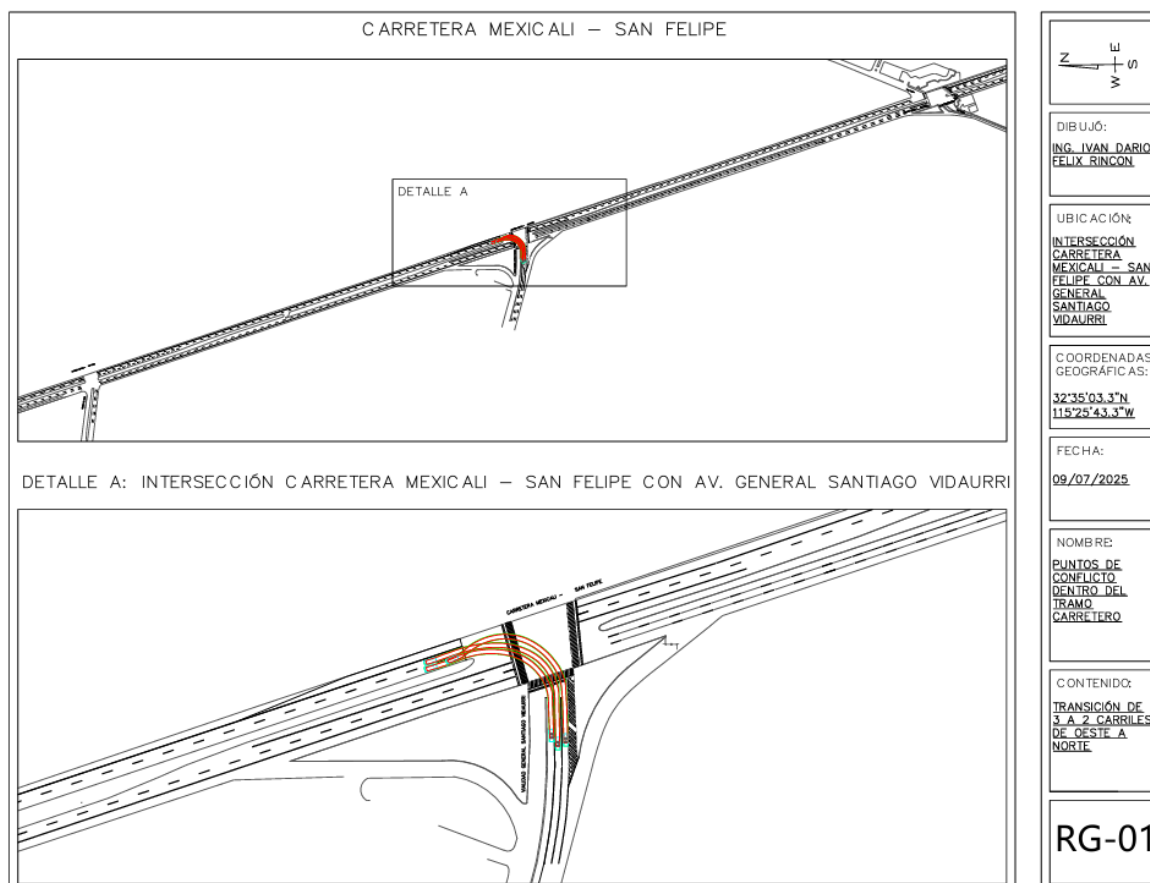


Figura 5.21- Plano RG-01, transición de 2 a 3 carriles de Oeste a Norte. Fuente: elaboración propia.

Se identificó que, en los extremos norte y sur de la intersección, los vehículos pesados tienen dificultades para realizar vueltas en U, esto provoca que los transportistas requieran de realizar más de un movimiento para completar maniobras de retorno de este tipo y en casos particulares, optan por invadir el carril contiguo para tener un mayor radio de giro y poder completar el movimiento. Estas acciones retrasan el flujo vehicular por el tiempo en que toma realizar las maniobras de retorno, además de aumentar la posibilidad de un volcamiento por los giros tan cerrados que se requieren realizar, en la figura 22 y en el plano RG - 02 dentro del anexo para los planos del modelo RG se muestra el recorrido que realizan los vehículos pesados al hacer una maniobra de retorno.

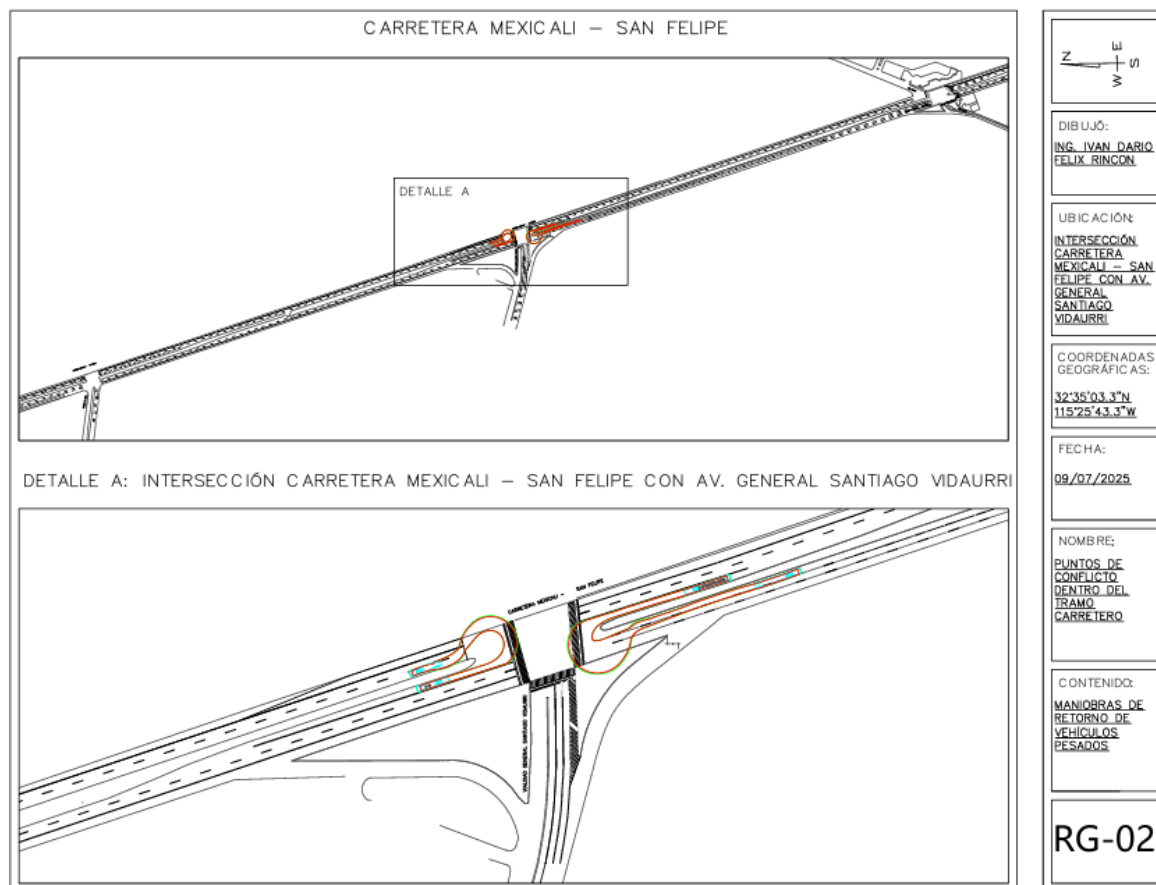


Figura 5.22- Plano RG-02, maniobra de retorno de vehículos pesados de Norte a Norte. Fuente: elaboración propia.

Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del Valle: De acuerdo con el análisis geométrico realizado para esta intersección se deduce que; los vehículos pesados que requieran dar una vuelta en U se ven obstaculizados, debido a que el espacio disponible para maniobrar es insuficiente para estos transportes, esta situación se presenta tanto en el sentido norte como sur de la carretera Mexicali - San Felipe. En adición se identificó, que el radio de giro correspondiente a la vuelta a la derecha de norte a oeste puede no ser óptimo para todos los vehículos, en especial para aquellos cuyas dimensiones sean mayores a la clasificación C3 de la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-012-SCT-2-2017. Los aspectos de la intersección mencionados anteriormente se aprecian en la figura 23 y en el plano RG - 03 dentro del anexo para los planos del modelo RG.

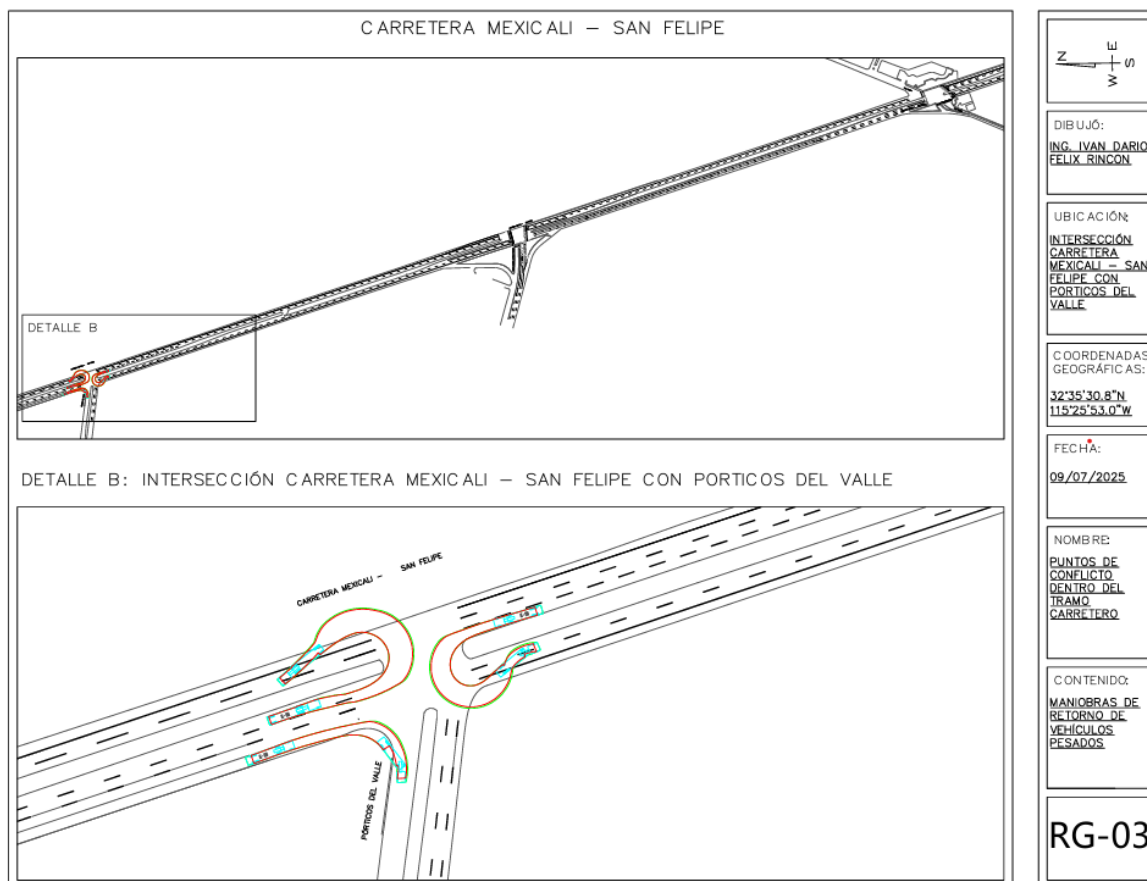


Figura 5.23- Plano RG-3, maniobra de retorno de vehículos pesados. Fuente: elaboración propia.

Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Avenida Real: Como en las anteriores intersecciones, se identificó que en este punto no se brinda a los vehículos de carga pesada las condiciones óptimas para realizar maniobras de retorno sobre la carretera Mexicali - San Felipe en ambos sentidos de circulación, en la figura 24 y el plano RG - 04 dentro del anexo para los planos del modelo RG. Aunado a esto, el carril para realizar vuelta a la derecha ubicado sobre el brazo este de la Avenida Real no presenta un radio de giro adecuado para carriles de ceda el paso, conforme a los parámetros de diseño del manual de proyecto geométrico de carreteras 2018, lo antes dicho se puede apreciar en la figura 25 y en el plano RG - 05 dentro del anexo para los planos del modelo RG.

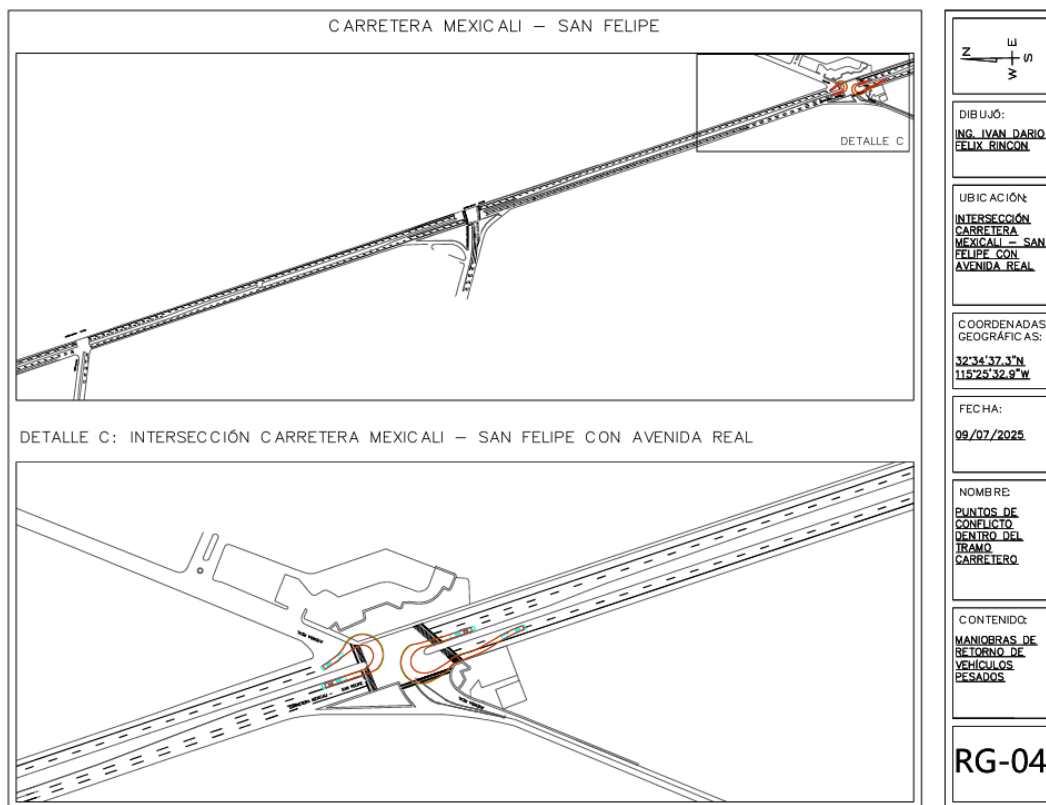


Figura 5.24- Plano RG-4, maniobra de retorno de vehículos pesados. Fuente: elaboración propia.

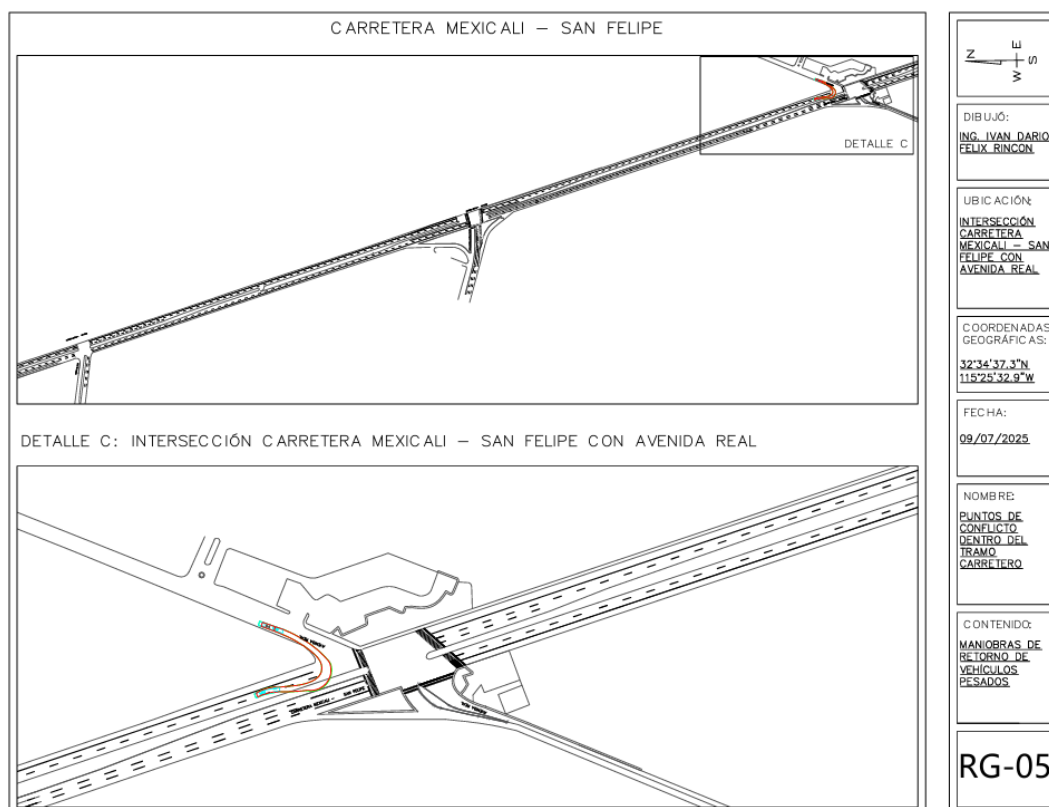


Figura 5.25- Plano RG-5, maniobra de retorno de vehículos pesados. Fuente: elaboración propia.

- Propuestas de Rediseño Geométrico

Conforme a lo obtenido en el análisis geométrico del caso de estudio, se identificó, que en las tres intersecciones no se presenta un diseño geométrico óptimo para todos los tipos de vehículos. Es por ello, que bajo los criterios de diseño del manual del proyecto de carreteras del 2018 (SCT, 2018), se diseñaron propuestas sobre el modelo 2D obtenido anteriormente, en conjunto con el software Civil 3D y la extensión Vehicle Tracking, con la intención de generar un tráfico más fluido y seguro para los usuarios, se desarrollaron las siguientes alternativas de rediseño geométrico de las intersecciones, las cuales buscan una óptima convivencia entre vehículos ligeros y de carga pesada. Dichas propuestas fueron planteadas específicamente para atender los puntos de oportunidad identificados previamente, y en conjunto con las adecuaciones presentadas en el apartado de micro simulación de tráfico conforman el diseño final del caso de estudio presentado en el apartado final.

Intersección entre Carretera Mexicali - San Felipe y General Santiago Vidaurri: En busca de generar una vuelta la izquierda más segura para los usuario que transitan de oeste a norte sobre la intersección, se propone la implementación de un carril de aceleración sobre la sección de acotamiento de la carretera Mexicali - San Felipe, el cual permitirá a los vehículos que transiten sobre el tercer carril de la vialidad General Santiago Vidaurri realizar una incorporación de manera segura y paulatina al segundo carril de la carretera.

Conforme a lo establecido en el manual del proyecto de carreteras del 2018, para vehículos en condición de parada y velocidad de proyecto de 60 km/hr el carril deberá contar con una longitud total de 110 metros, compuesto por un tramo de 56 m con un ancho uniforme de 3.3 m y un segundo tramo de 54 m dedicado a la transición hacia el carril contiguo, los descrito representado por flechas rojas se muestra en la figura 26 y en el plano RG - 06 dentro del anexo para los planos del modelo RG.

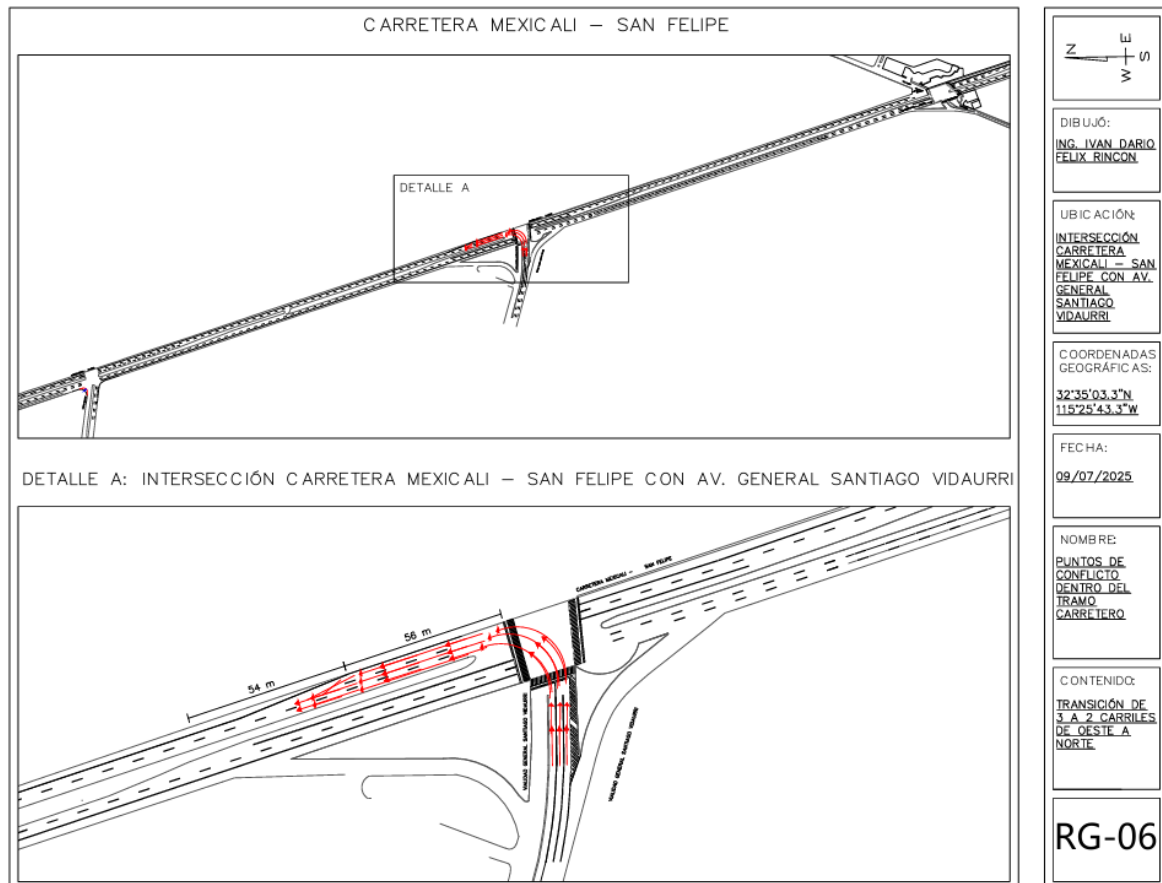


Figura 5.26- Plano RG-6, transición de 2 a 3 carriles de Oeste a Norte. Fuente: elaboración propia.

La adición del tercer carril propuesto, además de permitir una transición segura para los vehículos de Oeste a Norte, para los vehículos pesados cuyo origen sea el Norte y requieran de realizar un movimiento de retorno en la intersección él, brindará el espacio suficiente para ejecutar la maniobra sin salirse de las superficie de la carretera, de esta manera con la adición de un carril de transición se atiende dos puntos identificados con deficiencias geométricas, esto se muestra en la figura 27 y plano RG - 07 dentro del anexo para los planos del modelo RG.

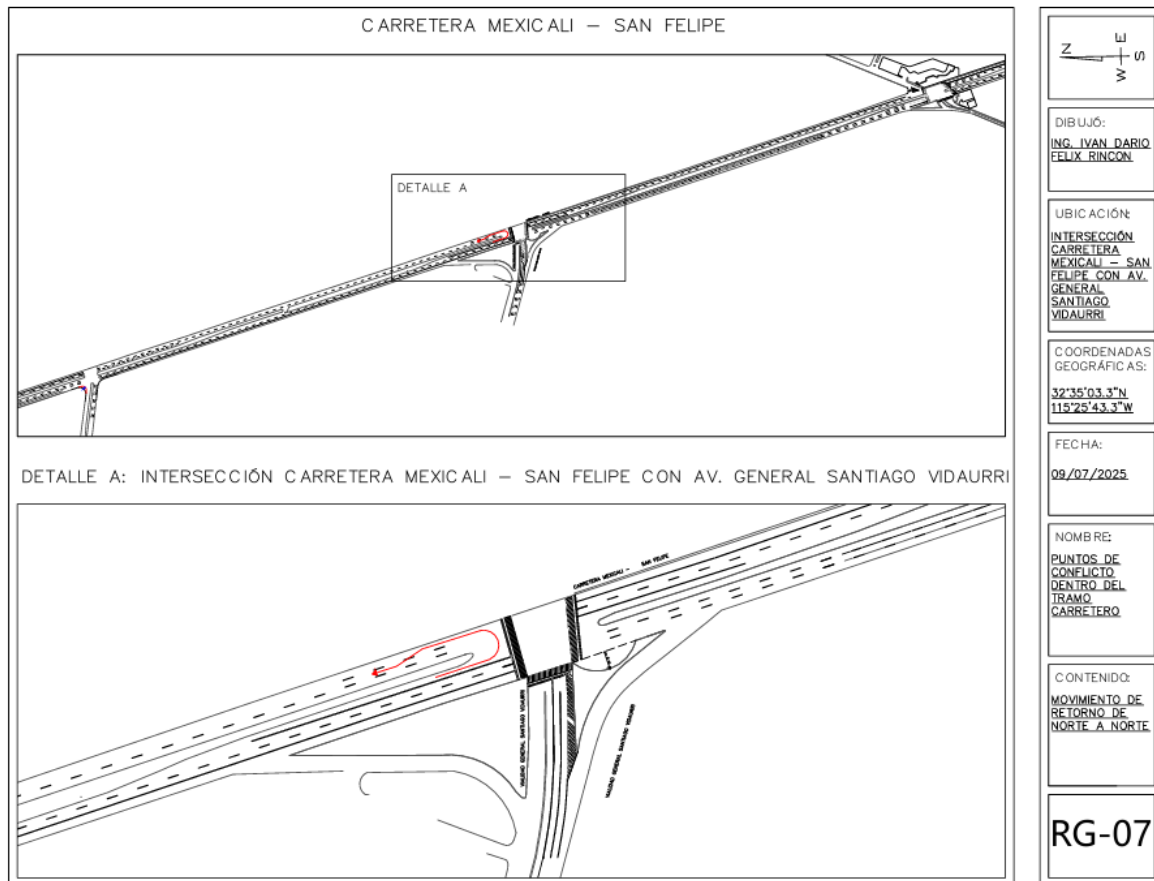


Figura 5.27- Plano RG-7, movimiento de retorno de Norte a Norte. Fuente: elaboración propia.

Para aquellos vehículos de carga provenientes del sur que requieran realizar una vuelta en U, se propone una ampliación a la zona de giro, el cual brindará a este tipo de usuarios un espacio óptimo para realizar sus maniobras de retorno. Este ensanchamiento se ubicará sobre la sección canalizadora en lado suroeste de la intersección, modificando este elemento para albergar las adecuaciones. En la figura 28 y en el plano RG - 08 dentro del anexo para los planos del modelo RG se aprecia como la propuesta es de forma semicircular con un radio de 8 metros.

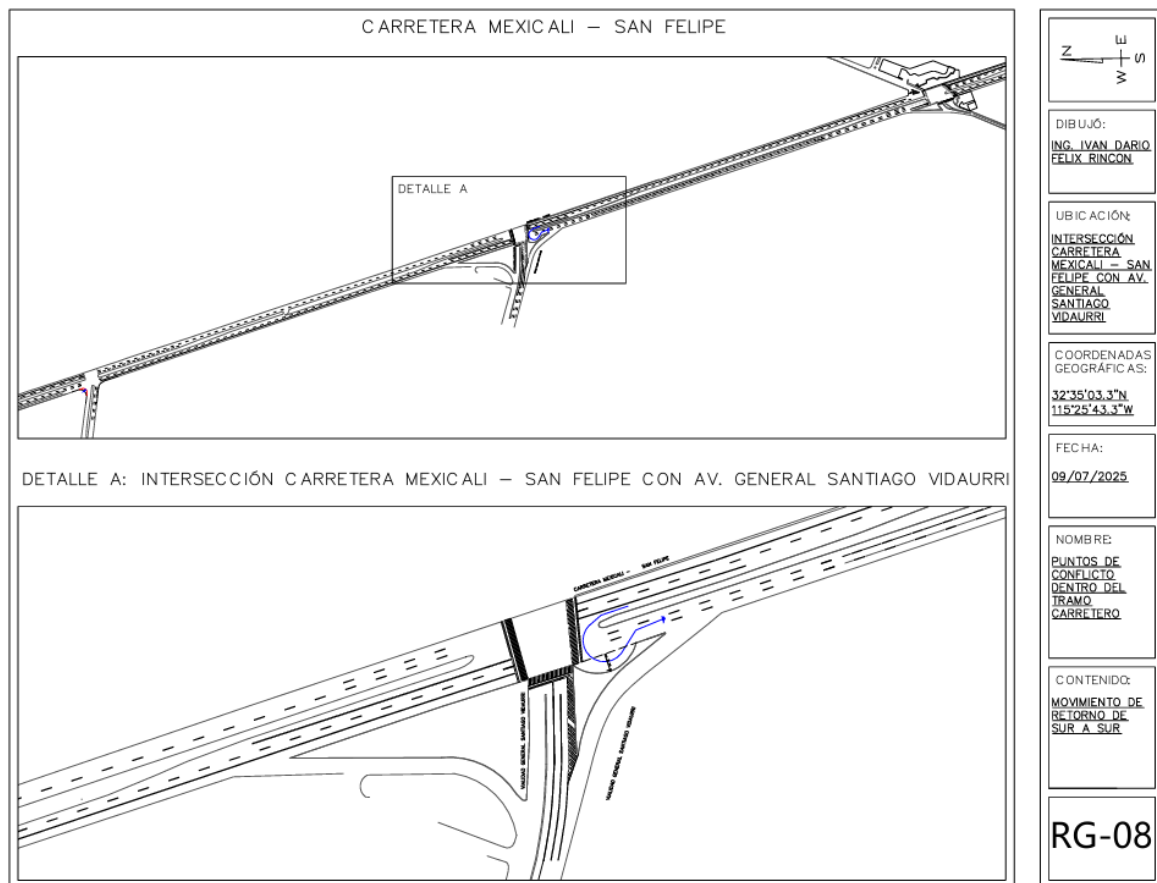


Figura 5.28- Plano RG-8, movimiento de retorno de Sur a Sur. Fuente: elaboración propia.

Intersección entre Carretera Mexicali - Pórticos del Valle: De acuerdo con las áreas de oportunidad identificadas en el análisis geométrico mencionado anteriormente, se propone la prohibición de maniobras de retorno para vehículos pesados en los sentidos norte y sur del cruce, con la intención de que el flujo vehicular no se vea afectado por el tiempo de demora ocasionado al efectuar este tipo de movimientos apreciables en el plano RG - 05.

Para sustituir el movimiento prohibido para el transporte de carga pesada, se define que los vehículos cuyo origen sea el sur y requieran realizar una maniobra de retorno, tendrán que continuar su recorrido hasta la siguiente intersección con la vialidad Calzada Héctor Terán Terán, donde encontrarán el espacio suficiente para realizar sus maniobras. En la figura 5.29, se muestra la geometría del cruce mencionado y representado en flechas rojas el recorrido propuesto del vehículo. En cambio, para los vehículos procedentes del norte y con la misma necesidad de realizar maniobras de retorno, deberán continuar su recorrido hasta la intersección con General Santiago Vidaurri, donde a través de los rediseños geométricos mencionados previamente, esta tendrá la infraestructura adecuada para facilitar las maniobras de retorno a vehículos de grandes dimensiones.



Figura 5.29- Intersección carretera Mexicali - San Felipe con Calzada Héctor Terán Terán. Fuente: elaboración propia con base de datos de google earth.

Como última modificación se plantea la ampliación del radio de giro presente en la vuelta hacia la derecha de norte a oeste, ya que esta es insuficiente para vehículos de tipo C3 o más. En la figura 30 y en el plano RG - 09 dentro del anexo para los planos del modelo RG, se muestra el cambio propuesto, aumentando el radio de giro en 4 metros, a través de esto se busca obtener una vuelta más segura y ergonómica para los usuarios, impactando positivamente en el flujo vehicular y en la reducción de accidentes viales.

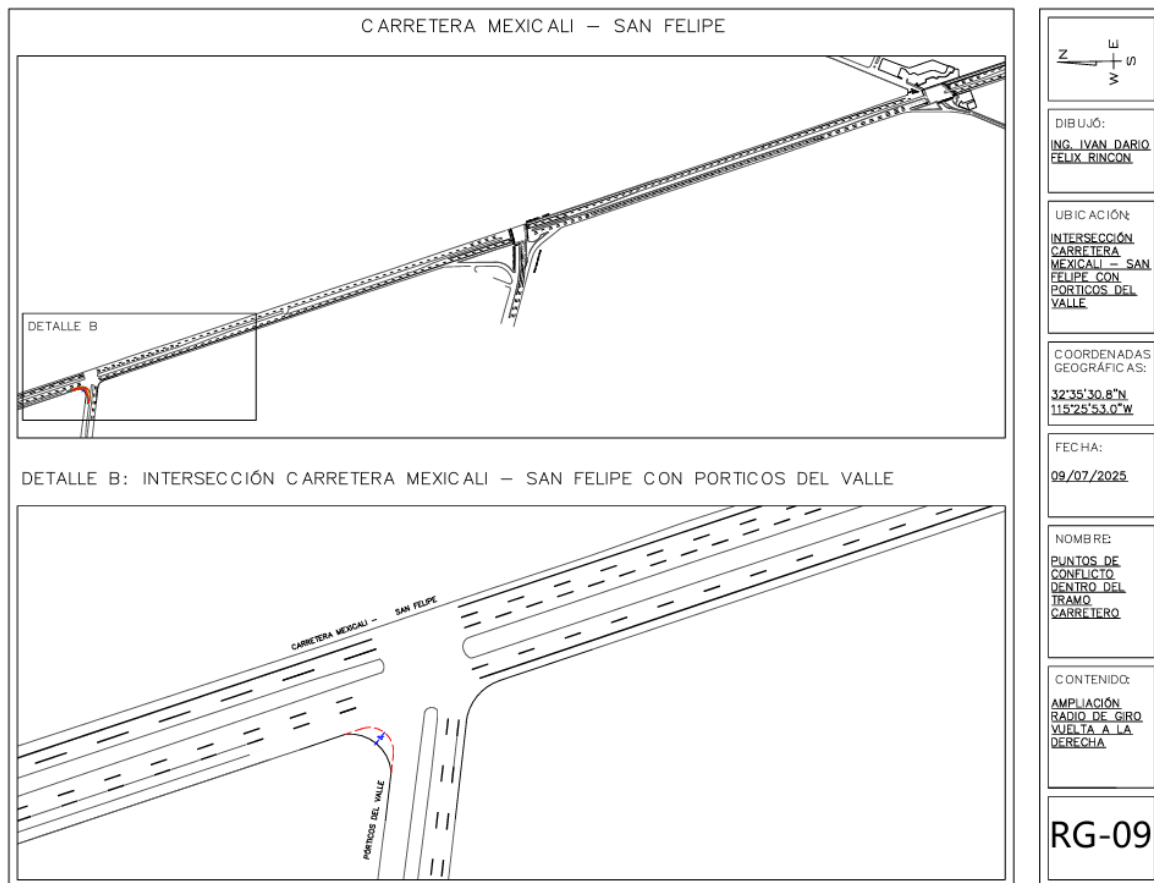


Figura 5.30- Plano RG-9, ampliación de radio de giro vuelta a la derecha. Fuente: elaboración propia.

Intersección entre Carretera Mexicali - San Felipe con Avenida Real: En busca de satisfacer las oportunidades de mejora en el diseño geométrico de la intersección, se propone la ampliación del radio de giro presente en la vuelta a la derecha en sentido este a norte, ya que esta cuenta con un radio de curva insuficiente para los vehículos, en adición se añadirá una zona de forma triangular de marcas viales la cual tendrá la función de separar los sentidos de circulación sobre la Avenida Real, en la figura 31 y en el plano RG - 10 dentro del anexo para los planos del modelo RG se muestran las especificaciones del rediseño geométrico. Esto se verá reflejado en una vuelta a la derecha directa más segura y ergonómica para los usuarios, generando un flujo vehicular con mayor continuidad.

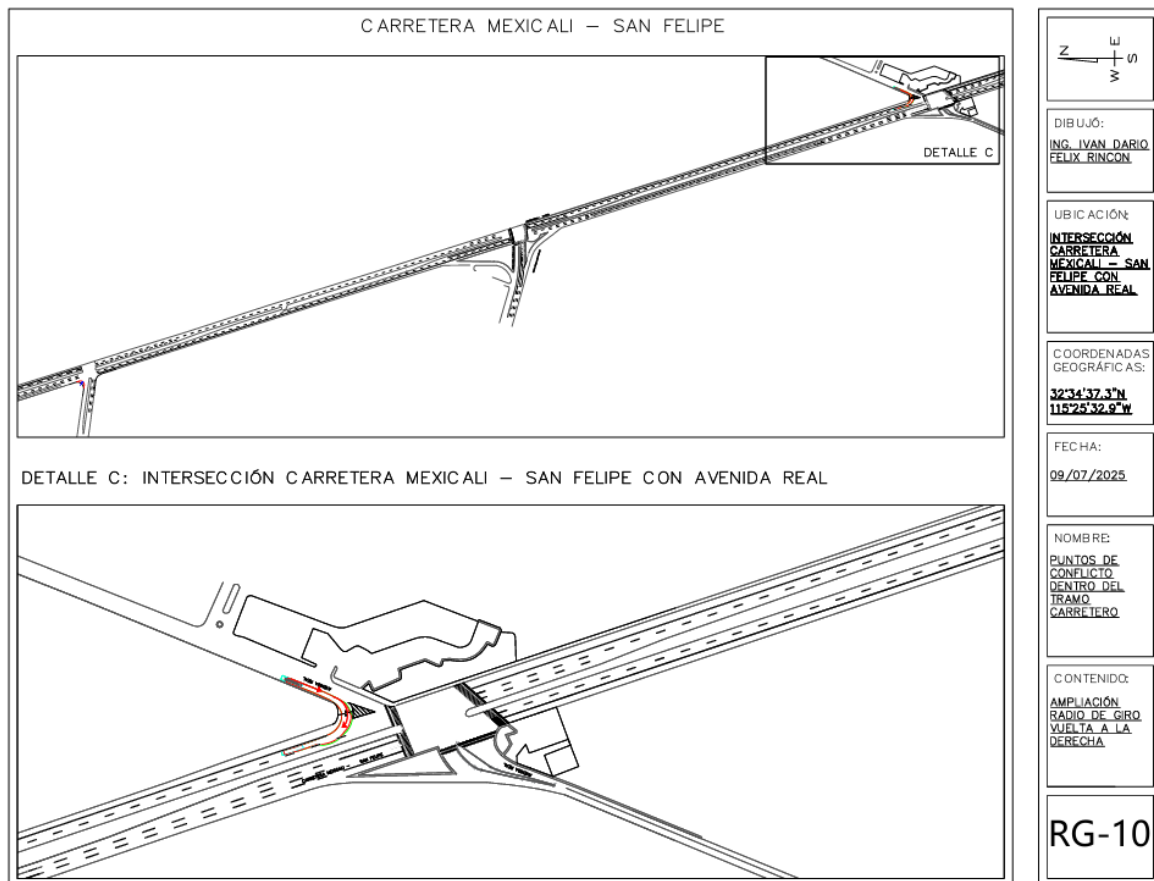


Figura 5.31- Plano RG-10, ampliación radio de giro vuelta a la derecha. Fuente: elaboración propia.

Al ser insuficiente el radio de giro disponible en la intersección para los vehículos de carga pesada cuyo origen sea el norte y desean realizar una maniobra de retorno, se define que; se restringe la vuelta en u para este tipo de vehículos, para realizar esta maniobra deberán continuar su recorrido hasta la siguiente intersección con la calle Lisa, ya que este cruce se encuentra debidamente habilitado para el paso de vehículos pesados, una imagen de la intersección y el recorrido propuesto para los vehículos se muestra en la figura 5.32. En cambio, para los vehículos procedentes del sur y con la misma necesidad de realizar maniobras de retorno, deberán continuar su recorrido hasta la intersección con General Santiago Vidaurri, donde a través de los diseños geométricos mencionados previamente, esta tendrá la infraestructura adecuada para facilitar las maniobras de retorno a vehículos de grandes dimensiones, esto se puede apreciar en el plano RG - 08.



Figura 5.32- Intersección carretera Mexicali - San Felipe con Calle Lisa. Fuente: elaboración propia con base de datos de google earth.

5.2.2 Rediseño de dispositivos de control de intersecciones (Modelo DCI)

Las tres intersecciones que componen el tramo carretero seleccionado como caso de estudio cuentan con dispositivos semafóricos para controlar el flujo vehicular presente en ellas, por lo tanto, si se quiere hacer un rediseño de los dispositivos de control de intersecciones para los elementos analizados es necesario realizar un análisis de estos semáforos y proponer nuevos ciclos semafóricos acorde con la demanda de los usuarios.

Retomando los resultados de la Figura 5.20, se observa que todas las intersecciones que conforman el caso de estudio presentan niveles de servicio cercanos al límite operativo o claramente deficientes. Con el objetivo de mejorar esta situación, se modeló cada intersección de manera individual en 2D utilizando el software Synchro

11. Este programa, mediante sus funciones internas de optimización, permite generar propuestas de ciclos semafóricos ajustadas a las condiciones específicas de cada intersección analizada.

Modelo DCI para intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del Valle

Al realizar el trabajo en campo se determinó que dentro de la intersección Carretera Mexicali - San Felipe con pórticos del valle existen movimientos los cuales requieren de un mayor tiempo de luz verde y en contraparte, otros movimientos necesitan menos tiempo de circulación ya que la demanda es mínima, esto fue respaldado por la micro simulación vial realizada en Synchro 11, ya que el utilizar la función de "Optimize - Cycle length" este realizó cambios en los carriles de; movimiento de retorno de N - N, carril en dirección S-N y el carril en dirección de S-O, reduciendo el tiempo del primer carril mencionado y aumentando el tiempo de los últimos dos, estos cambios realizados por el programa dieron como consecuencia un ligero aumento en el ciclo semafórico total pasando de 134s a 137s. En la tabla 5.9 se aprecia una comparativa del ciclo semafórico actual y el propuesto para esta intersección, resaltando con color gris aquellas celdas que sufrieron de un cambio.

COMPARACIÓN CICLO SEMAFÓRICO ACTUAL Y PROPUESTO									
CICLO SEMAFÓRICO PORTICOS DEL VALLE 7:30 - 8:30 AM					PROPUESTA CICLO SEMAFÓRICO PORTICOS DEL VALLE 7:30 - 8:30 AM				
SENTIDO	VERDE	AMARILLO	ROJO	SEGUNDOS	SENTIDO	VERDE	AMARILLO	ROJO	SEGUNDOS
S - N	78	3	59	134	S - N	82	3	53	137
S - O	21	3	116		S - O	23	3	112	
N - S	72	3	65		N - S	70	3	65	
N - N	15	3	122		N - N	11	3	124	
O - N	32	3	105		O - N	32	3	105	

Tabla 5.9- Comparación del ciclo semafórico actual y el propuesto para la intersección Carretera Mexicali – Pórticos del Valle. Fuente: elaboración propia.



Figura 5.33-. Modelado dentro de Synchro 11 de Intersección carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del Valle. Fuente: elaboración propia.

Modelo DCI para intersección Carretera Mexicali - San Felipe con General Santiago Vidaurri

Para el caso de la intersección entre la Carretera Mexicali - San Felipe con General Santiago Vidaurri, a través del análisis realizado con Synchro 11 se identificó que en cada uno de los brazos de la intersección había un carril que se vería beneficiado al realizar un cambio en su tiempo del ciclo semafórico, estos son; sentido S-O, N-S y O-N. El primer carril únicamente se le aumentó un segundo en el tiempo del ciclo semafórico, para el segundo carril en caso de contrario del primero a este se le resto un segundo a su tiempo de verde y al tercer y último carril se le aumentaron 3 segundos a su tiempo de verde. Los cambios en los dos primeros carriles fueron pequeños ajustes para garantizar un correcto flujo vehicular ante la demanda actual y el cambio realizado en el tercer carril es debido a la distancia existente entre el punto de espera de los vehículos en el brazo Oeste y el punto en donde se considera que el vehículo cruzó la intersección. Al igual que en el caso anterior en esta intersección también hubo un incremento en la longitud total del ciclo semafórico. En la tabla 5.10 se puede observar una comparación entre el ciclo semafórico actual y el propuesto para esta intersección, resaltando con color gris aquellas celdas que sufrieron de un cambio.

COMPARACIÓN CICLO SEMAFÓRICO ACTUAL Y PROPUESTO									
CICLO SEMAFÓRICO SANTIAGO VIDAURRI 7:30 - 8:30 AM					PROPUESTA CICLO SEMAFÓRICO SANTIAGO VIDAURRI 7:30 - 8:30 AM				
SENTIDO	VERDE	AMARILLO	ROJO	SEGUNDOS	SENTIDO	VERDE	AMARILLO	ROJO	SEGUNDOS
S - N	86	3	51	136	S - N	86	3	54	142
S - O	36	3	101		S - O	37	3	103	
N - S	61	3	76		N - S	60	3	80	
N - N	11	3	126		N - N	11	3	129	
O - N	30	3	107		O - N	33	3	107	

Tabla 5.10- Comparación del ciclo semafórico actual y el propuesto para la intersección Carretera Mexicali – General Santiago Vidaurri. Fuente: elaboración propia.

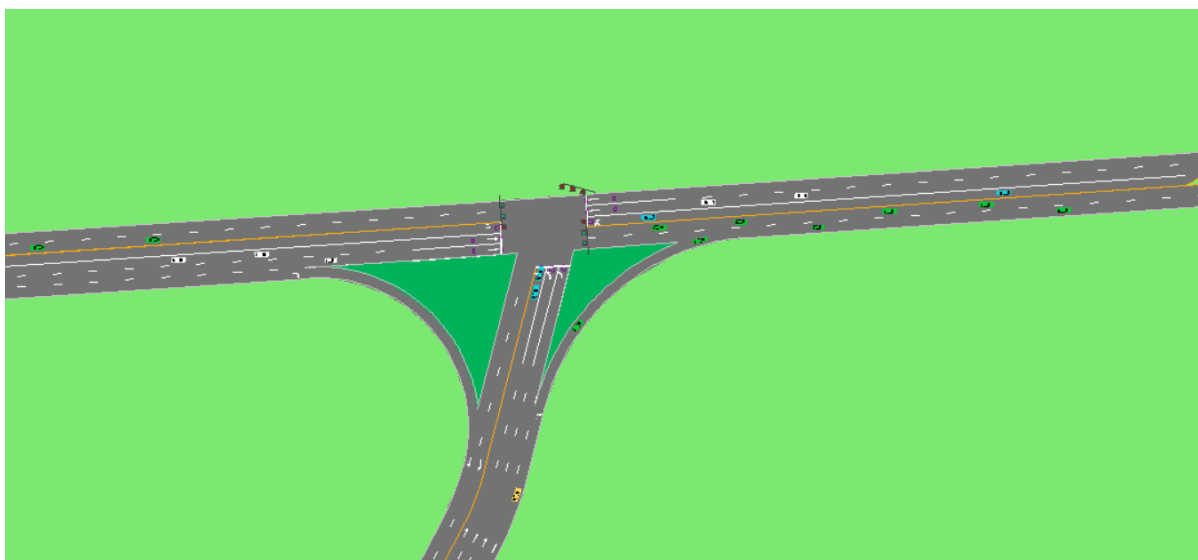


Figura 5.34- Modelado dentro de Synchro 11 de Intersección carretera Mexicali - San Felipe con General Santiago Vidaurri. Fuente: elaboración propia.

Modelo DCI para intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Av. Real

La tercera intersección del caso de estudio, conformada por la Carretera Mexicali - San Felipe y Av. Real es la única que está compuesta por cuatro brazos, al contar con esta cantidad de vías un ciclo semafórico demasiado largo causaría que los vehículos esperen mucho a que sea su turno. A través de utilizar el software Synchro 11 para el análisis del ciclo semafórico se obtuvo una reducción del ciclo semafórico pasando de 138s a 124s, restando tiempo a aquellos carriles que tienen menor demanda y afectando lo menos posible a las principales líneas de la intersección. En la tabla 5.11 se encuentra una comparativa entre el ciclo semafórico actual y el propuesto para la intersección analizada, resaltando con color gris aquellas celdas que sufrieron una reducción en su tiempo de semáforo.

COMPARACIÓN CICLO SEMAFÓRICO ACTUAL Y PROPUESTO									
CICLO SEMAFÓRICO AV. REAL 7:30 - 8:30 AM					PROPUESTA CICLO SEMAFÓRICO AV. REAL 7:30 - 8:30 AM				
SENTIDO	VERDE	AMARILLO	ROJO	TOTAL SEGUNDOS	SENTIDO	VERDE	AMARILLO	ROJO	TOTAL SEGUNDOS
S - N	68	3	69	138	S - N	56	3	65	124
S - O	22	3	115		S - O	16	3	105	
N - S	80	3	57		N - S	71	3	50	
N - N	34	3	103		N - N	31	3	90	
O - N	27	3	110		O - N	25	3	96	

Tabla 5.11- Comparación del ciclo semafórico actual y el propuesto para la intersección Carretera Mexicali – Av. Real. Fuente: elaboración propia.

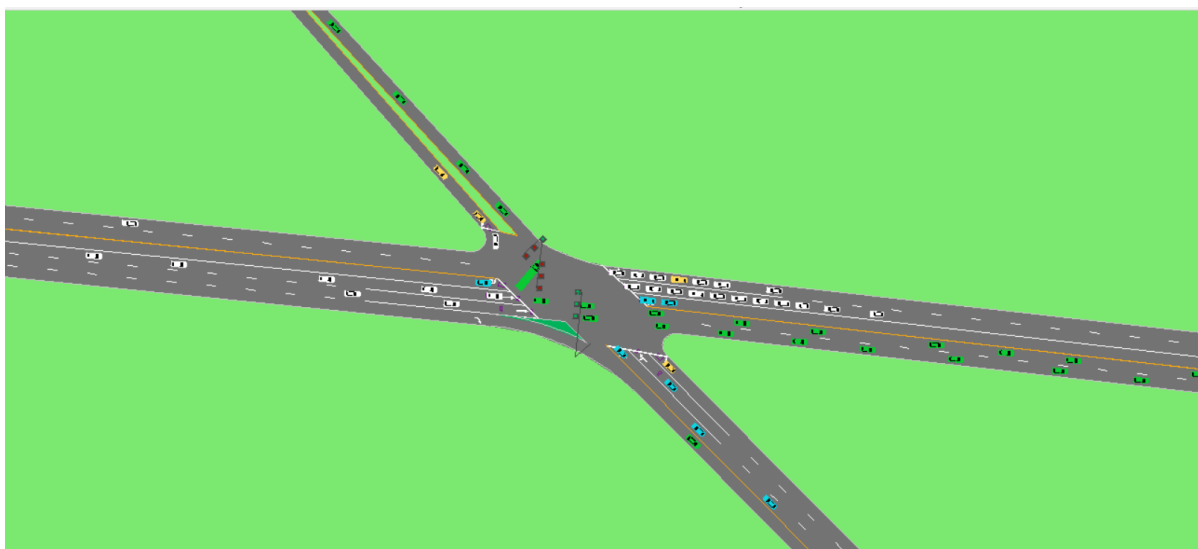


Figura 5.35- Modelado dentro de Synchro 11 de Intersección carretera Mexicali - San Felipe con Av. Real. Fuente: elaboración propia.

5.2.3 Plan de intervención en la superficie de rodadura (Modelo PI)

Retomando lo mencionado anteriormente en el subapartado “Análisis de la superficie de rodadura” en promedio el caso de estudio se encuentra en un estado regular. En la figura 5.36, podemos observar la curva de deterioro del pavimento mostrada por el Dr. Delmar Salomón en su artículo “Conservación de Pavimentos: Metodología y Estrategias” (Salomón, 2009). Al estar en un estado regular se asume que el pavimento cuenta con más de 15 años de servicio, conforme a lo visualizado en la figura 5.36 el pavimento ha pasado el umbral de acción recomendado para conservar la superficie de rodadura en condiciones óptimas. En dado caso de no realizar intervenciones en el pavimento en cinco años más presentará un deterioro acelerado de su superficie, este se encontrará en un estado totalmente deteriorado después de un lustro de tiempo tal como se pudo apreciar en los resultados del Modelo M2, terminado anticipadamente con la vida útil del pavimento, forzando a realizar la demolición y reconstrucción de este.

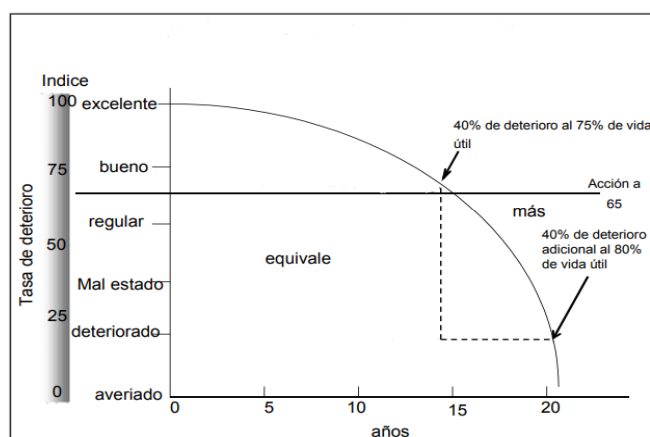


Figura 5.36- Curva de deterioro del pavimento. Fuente: Imagen extraída del documento Conservación de Pavimentos: Metodología y Estrategias

Por lo antes mencionado, se considera indispensable realizar un plan de intervención en la superficie de rodadura, el cual garantice la integridad y calidad del mismo, con el fin de evitar el deterioro prematuro en la vialidad, disminuir los costos de operación y mantenimiento del tramo carretero y evitar afectar a los usuarios de esta vía.

Apegado a lo descrito en la sección metodológica, el plan de intervención de la superficie de rodadura se realizó dentro del software HDM-4, con la intención de tener claro los beneficios, sin considerar el aspecto económico. Para el plan de intervención de la superficie de rodadura se considerará un periodo de análisis de 10 años, realizando actividades de conservación rutinaria y periódica, establecidos en el documento “GUÍA DE PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS PARA LA CONSERVACIÓN DE CARRETERAS EN MÉXICO 2016”, disponiendo de los datos vehiculares presentados por la SCT (SICT, 2023), se obtuvo la composición vehicular exacta para el tramo carretero y para medir el impacto del crecimiento vehicular, los modelos se hicieron considerando un crecimiento anual del 5 % en el parque vehicular, este valor fue obtenido a través de la información compartida por INEGI EN LA PLATAFORMA VEHÍCULOS DE MOTOR REGISTRADOS EN CIRCULACIÓN (INEGI, 2025), nutriendo el modelo con la información antes mencionada es posible obtener resultados más precisos y específicos para el caso de estudio. Los conceptos de todos los trabajos a realizar en la alternativa con mantenimiento se encuentran en la tabla 5.12.

ALTERNATIVA CON MANTENIMIENTO	
Intervenciones en la superficie de rodadura	Bacheo (Anualmente)
	Relleno de grietas (Anualmente)
	Renivelación (IRI ≥ 4)
	Re encarpetado (Área dañada $\geq 30\%$ de la superficie)

Tabla 5.12- Trabajos a realizar en la alternativa con mantenimiento. Fuente: elaboración propia.

Una vez realizada la simulación del estado del tramo carretero dentro del software HDM-4, se obtuvo información detallada sobre la evolución del pavimento a lo largo del tiempo, incluyendo indicadores como el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), niveles de fisuración, desintegración superficial, tasa de deterioro estructural y porcentaje de área de baches.

Interpretación de resultados obtenidos

Para evaluar los resultados obtenidos a través del modelo PI se muestra a continuación el análisis de tres aspectos cruciales para el mantenimiento preventivo y correctivo, estos son; el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), porcentaje de área de baches, niveles de fisuración, ya que estos son aspectos claves en el deterioro

acelerado de la superficie de rodadura, la comodidad y seguridad del usuario (López et al. 2021).

Dentro de la figura 5.37 se muestra la evolución del Índice IRI, a través de ella es posible observar cómo es que en el año 2025 se presenta una disminución abrupta del IRI, reduciendo de 3.7 a 1.9 m/km, esto se asocia a la implementación del plan de intervenciones, ya que, conforme a los criterios de aplicación de las medidas de mantenimiento mostrados en la tabla 5.21 al alcanzarse un umbral de IRI mayor o igual a 4 el software HDM4 implementaba acciones de mantenimiento. Entre el periodo de tiempo de 2026 y 2033, el comportamiento del IRI muestra un incremento gradual, pero al ser este un deterioro natural del pavimento debido al uso y el tiempo. Alrededor del año 2033 u mayor aumento del del IRI, esto sugiere que el área dañada podría haber alcanzado el 30 % de la superficie de rodadura, eso no presenta ningún problema, ya que conforme a los criterios de aplicación de las medidas establecidos en el plan de intervención, en estos casos se realiza una medida de Re encarpetado. Estos resultados evidencian que las medidas de mantenimiento propuestas son efectivas para prolongar la vida útil del pavimento y mantener un nivel de servicio óptimo durante la mayor parte del horizonte de análisis.

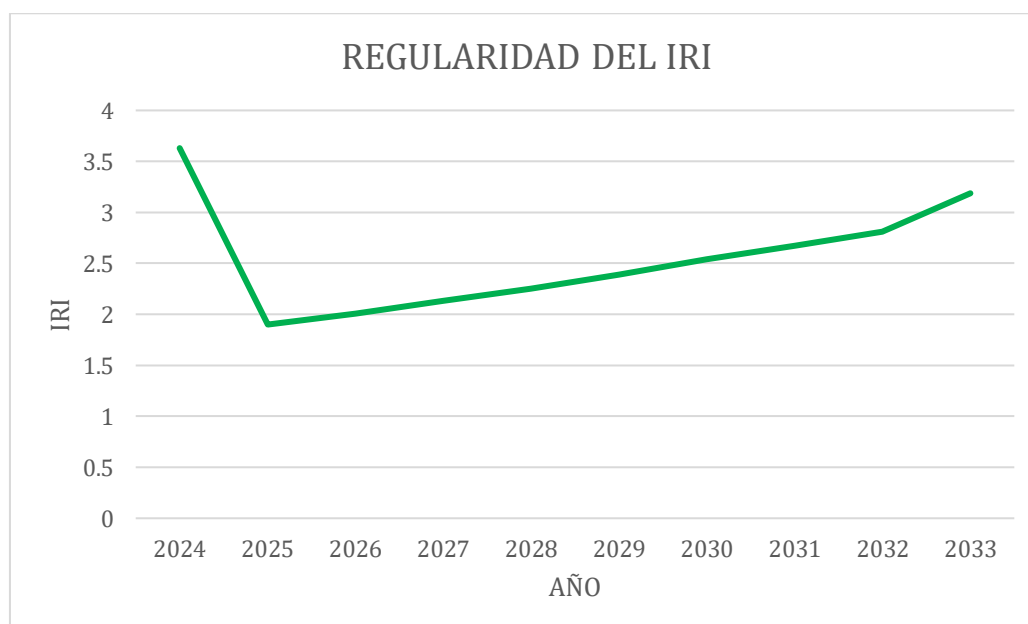


Figura 5.37- Índice de Regularidad del IRI del modelo PI. Fuente: elaboración propia.

Para analizar el porcentaje de baches obtenidos se muestra la figura 5.38, esta señala un comportamiento totalmente estable dentro de todo el periodo de análisis, la inexistencia de variaciones dentro la gráfica sugiere que el mantenimiento fue ejecutado de manera oportuna cada año, impidiendo que el deterioro progresara hasta niveles visibles o estructurales. De esta manera se comprueba que el bacheo anual es una estrategia adecuada para conservar la integridad superficial de la carretera.

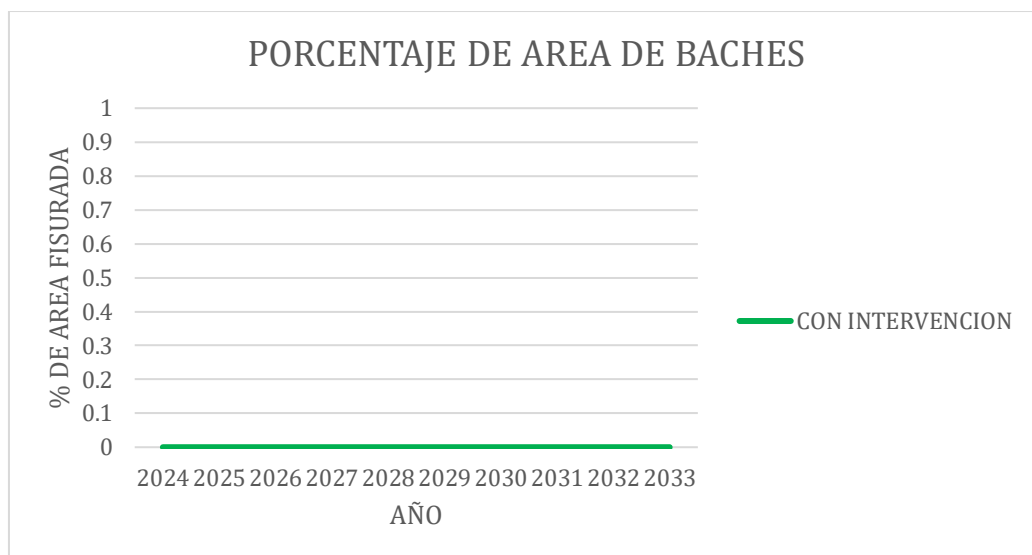


Figura 5.38- Porcentaje de área de baches del modelo PI. Fuente: elaboración propia.

La figura 5.39 del porcentaje de área fisurada muestra el año 2025 una reducción drástica del área fisurada, estando en un valor cercano al 10 % en 2024 a prácticamente 0 %, esto atribuido a la aplicación anual del relleno de grietas la cual es una medida preventiva clave para evitar la propagación del deterioro superficial. Hasta el año 2028 el porcentaje de área fisurada se mantiene estable indicando que las intervenciones preventivas fueron efectivas en los primeros años. A pesar de esto, después del 2029 se empieza a mostrar un incremento constante del área fisurada. Esta tendencia muestra que a pesar de que el mantenimiento anual se mantuvo, su capacidad de control fue superada por el avance natural del deterioro del pavimento, posiblemente debido al aumento acumulado del flujo vehicular.

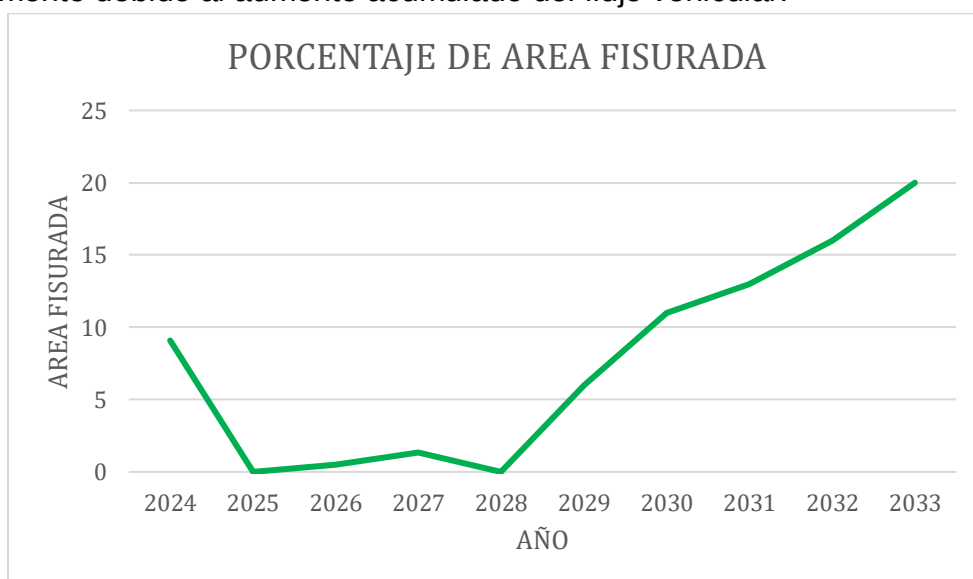


Figura 5.39- Porcentaje de área fisurada del modelo PI. Fuente: elaboración propia.

Todos los resultados obtenidos a través de la simulación se encuentran en el anexo 1 de este documento.

5.3 Resultados etapa 3- Validación

En este tercer apartado de la metodología desarrollada, se validará que todos los resultados obtenidos en los tres modelos generados previamente realmente aporten un beneficio al tramo carretero seleccionado como caso de estudio. Para lograrlo, se realizará una comparativa entre los resultados entre el modelo M1 y los modelos DCI, PI y RG. Esta comparación deberá demostrar que el modelo propuesto ofrece un mejor nivel de servicio que el observado en el caso de estudio. De no ser así, el modelo propuesto no superará la etapa de validación y deberá ser replanteado hasta obtener una nueva versión que cumpla con la condición mencionada.

5.3.1 Validación modelo RG

Para validar los cambios geométricos propuestos dentro del modelo RG se realizó nuevamente un recorrido de la trayectoria de los vehículos con ayuda de la extensión vehicle tracking, pero esta vez se utilizó el trazado en 2D desarrollado dentro de civil 3D con las adecuaciones geométricas, esto con la intención de comprobar que realmente todas las propuestas cumplan con su función.

- ***Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con General Santiago Vidaurri***

Recapitulando lo mencionado anteriormente en el apartado del análisis geométrico, dentro de la intersección entre la Carretera Mexicali - San Felipe con General Santiago Vidaurri se encontró oportunidad de mejora en la geometría de los movimientos de O-N, N-N y S-S, a continuación, en los planos RG - 11 y RG - 12 dentro del anexo para los planos del modelo RG se muestra el recorrido que realizarían los vehículos si se implementaran las propuestas geométricas planteados en el modelo RG.

Como se pudo apreciar en los planos RG - 11 y RG - 12 se realizó un recorrido con un vehículo tipo DE-760 Camión unitario de carga conforme a la NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, en ambos casos los vehículos pudieron completar el recorrido sin salirse de la vialidad u invasar los carriles adyacentes, considerándose como satisfactorio las propuestas de rediseño geométrico para este punto, ya que a través de ellas se les brinda a los vehículos este tipo de maniobras de retorno.

- ***Intersección entre Carretera Mexicali - Pórticos del Valle***

Al igual que la primera intersección dentro del punto de convergencia entre la Carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del Valle se identificaron tres puntos con oportunidad de mejora geométrica, siendo el primero de ellos la necesidad de la

ampliación del radio de giro presente en la vuelta libre a la derecha de N-O, como se mencionó en el apartado del modelo RG se propuso la ampliación de este radio de giro, en el plano RG - 13 dentro del anexo para los planos del modelo RG, se puede apreciar el recorrido del vehículo (tipo DE-760 Camión unitario) donde cumple satisfactoriamente con el espacio requerido para poder realizar una vuelta a la derecha libremente.

Dentro de la intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del Valle los movimientos de retorno de N-N y S-S pueden ser complicados para vehículos pesados, por lo tanto en el apartado de propuestas de Rediseño Geométrico se propuso que los vehículos que requieran hacer un movimiento de retorno de N-N continuarán su camino hasta la intersección Carretera Mexicali - San Felipe con General Santiago Vidaurri donde, después de las intervenciones geométricas realizadas en ese punto quedó habilitada para permitir a vehículos pesados realizar maniobras de retorno de N-N y validado su funcionamiento dentro de este apartado en plano RG - 12, para el movimiento de retorno de S-S se propuso que los vehículos pesados continuarán su camino hasta la intersección carretera Mexicali - San Felipe con Calzada Héctor Terán Terán donde al contar con un espacio de giro de 15 metros de ancho se considera a este punto como óptimo para realizar maniobras de retorno para cualquier tipo de vehículo pesado (figura 5.29).

- ***Intersección entre Carretera Mexicali - San Felipe con Avenida Real***

En la intersección entre carretera Mexicali - San Felipe con Av. Real a diferencia de su contraparte únicamente se identificaron dos puntos de oportunidad de mejora geométrica, parecido al caso de la intersección carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del Valle se encontró que la vuelta a la derecha sobre Av. Real hacia Carretera Mexicali - San Felipe también carecía de un radio de giro eficiente, por lo tanto anteriormente se propuso la ampliación del mismo, por medio de vehicle tracking se realizó el recorrido utilizando un vehículo pesado dentro de este punto, identificando que después de la ampliación se obtuvo una vuelta a la derecha más fluida y segura para los vehículos (plano RG - 14 dentro del anexo para los planos del modelo RG).

Al igual como se ha visto en las anteriores dos intersecciones, el movimiento de retorno de N-N es insuficiente para vehículos pesados, dentro del apartado de propuestas de Rediseño Geométrico se planteó la opción de que estos vehículos cuando requieran hacer un movimiento de retorno de N-N continuarán su camino hasta la intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Calle Lisa, la cual al ser la entrada a un parque industrial cuenta con el espacio suficiente para que estos vehículos realicen maniobras de retorno de manera segura, algo que se pudo comprar en las diferentes vista a campo realizadas para la recolección de datos.

A través de la validación realizada al modelo RG se demuestra de forma contundente que las propuestas de rediseño geométrico planteadas mejoran significativamente la operatividad y funcionalidad de las intersecciones presentes en el tramo carretero seleccionado como caso de estudio. El uso de herramientas como *Vehicle Tracking* sobre modelos en 2D dentro del software Civil 3D permitió verificar con precisión los trayectos de vehículos pesados, atendiendo satisfactoriamente las necesidades generadas por las limitaciones originales, optimizando los radios de giro y reubicando maniobras conflictivas, concluyendo que las propuestas:

- Cumplen con los estándares técnicos y normativos.
- Mejoran el nivel de servicio y la seguridad vial.
- Aumentan la capacidad operativa del corredor para el tránsito de vehículos pesados.

5.3.2 Validación modelo DCI

En busca de validar el modelo DCI se exportaron los nuevos tiempos del ciclo semafórico para las tres intersecciones obtenidos a través de los análisis realizados en Synchro 11, se generó una copia del modelo M1 realizado dentro del software PTV Vissim explicado previamente en el apartado del modelo M1 denominando a este archivo modelo DCI, después se rediseñaron los semáforos aplicando los tiempos semafóricos propuestos, para poder evaluar el nivel de servicio presente en el caso de estudio.

Hecho esto, se corrió una simulación del funcionamiento de las intersecciones que componen el caso de estudio, dando como resultado una mejoría significativa en dos de los tres puntos analizados, los niveles de servicio obtenidos fueron los siguientes:

- Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del valle: Nivel de servicio **D**.
- Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Gral. Santiago Vidaurri: Nivel de servicio **C**.
- Intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Av. Real: Nivel de servicio **D**.

A pesar de que no se presentó un cambio significativo desde una perspectiva general del caso de estudio, en la intersección generada entre la carretera Mexicali – San Felipe con Pórticos del Valle el nivel de servicio cambio de E a D, lo cual se considera un resultado exitoso, ya que a través de este cambio el funcionamiento del tramo carretero ya se encontraría en un estado aceptable a diferencia del nivel de servicio que presentó en el modelo M1 el cual estaba entre el límite del funcionamiento y un

funcionamiento deficiente de acuerdo a lo mencionado en el apartado del modelo M1. En la figura 5.40, se muestra una comparativa de los niveles de servicio entre el modelo M1 y el modelo MCI.

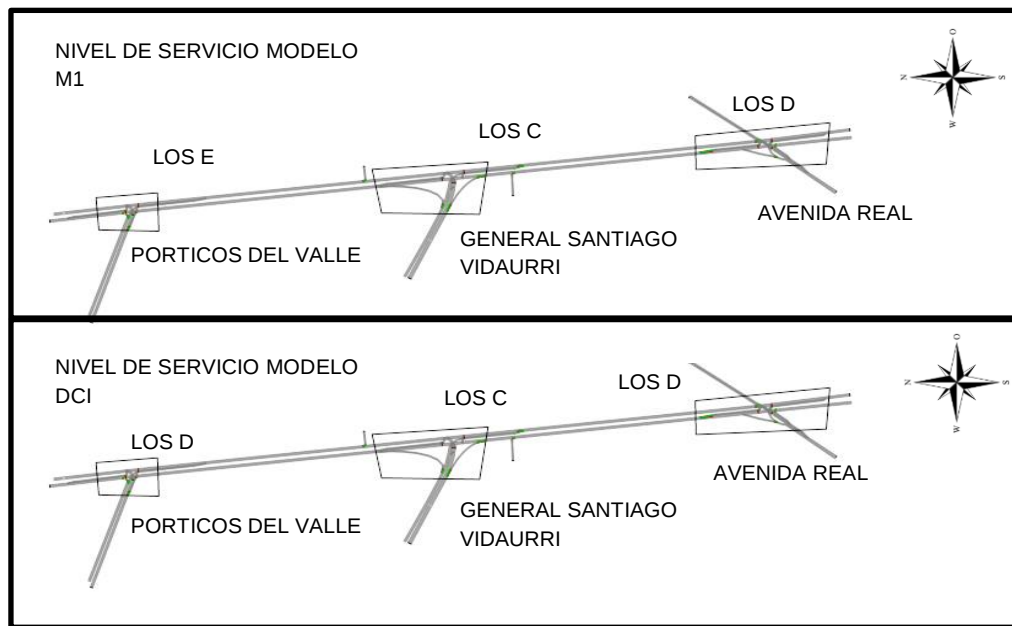


Figura 5.40- Modelado DCI nivel de servicio actual y nuevo del tramo carretero. Fuente: elaboración propia.

5.3.3 Validación modelo PI

Para validar el modelo dentro del mismo software HDM4 se realizó una comparación utilizando los datos obtenidos en el modelo M2 y la propuesta generada a partir del modelo PI, denominando a estas dos alternativas sin mantenimiento y alternativa con mantenimiento respectivamente. Retomando lo establecido en el apartado la interpretación de los resultados obtenidos para este análisis se hará la comparación a través de los parámetros de Índice Internacional de Rugosidad (IRI), porcentaje de área de baches y niveles de fisuración que arroje el programa.

Como inicio de la comparativa se muestra la tabla 5.13 donde se contrastan los conceptos de todos los trabajos a realizar para cada alternativa, considerando para la alternativa sin mantenimiento únicamente medidas de reconstrucción, ya que se busca proyectar cómo sería el estado de la superficie de rodadura si no se contempla ninguna medida de mantenimiento sobre ella.

	ALTERNATIVA CON MANTENIMIENTO	ALTERNATIVA SIN MANTENIMIENTO
Intervenciones en la superficie de rodadura	Bacheo (Anualmente)	Reconstrucción de la superficie de rodadura IRI ≥ 5
	Relleno de grietas (Anualmente)	
	Renivelación (IRI ≥ 4)	
	Reencarpetado (Área dañada ≥ 30% de la superficie)	

Tabla 5.13- Tabla comparativa “Alternativa con mantenimiento” y “Alternativa sin mantenimiento”.
Fuente: elaboración propia.

La figura 5.41, muestra una gráfica comparativa del Índice de Regularidad Internacional (IRI) en color verde se encuentra la alternativa con mantenimiento continuo y la alternativa sin mantenimiento en color amarillo. Para el caso de la primera se observa una disminución significativa del IRI a partir del año 2025, consecuencia de la implementación de acciones de bacheo, relleno de grietas anual y la renivelación al alcanzar un $IRI \geq 4$. Con estas medidas se asegura que el tramo carretero presente un nivel de IRI óptimo durante todo el periodo analizado.

En contraste, la alternativa sin mantenimiento presenta desde el inicio un incremento en el nivel del IRI, alcanzando su punto máximo (superior a 5 m/km) en el año 2027. Esto obliga a realizar una reconstrucción de la superficie de rodadura apenas cuatro años después de iniciado el periodo de análisis. Tras esta intervención, el IRI se reduce drásticamente en 2028, pero vuelve a incrementarse progresivamente en los años siguientes. Este acelerado deterioro se asocia a la ausencia de acciones de mantenimiento preventivo, lo cual conduce a un estado funcional deficiente del pavimento.

Al realizar esta comparación podemos concluir que la reconstrucción puede mejorar momentáneamente las condiciones del tramo carretero, pero su implementación tardía implica largos periodos de bajo nivel de servicio y un alto coste económico, al no realizar medidas de mantenimiento este no se ve aprovechado por que en poco tiempo vuelve a presentar un nivel de servicio insuficiente. En contraste, la estrategia con mantenimiento periódico permite conservar la regularidad del IRI en condiciones óptimas, resultando más eficiente desde el punto de vista funcional y económico.

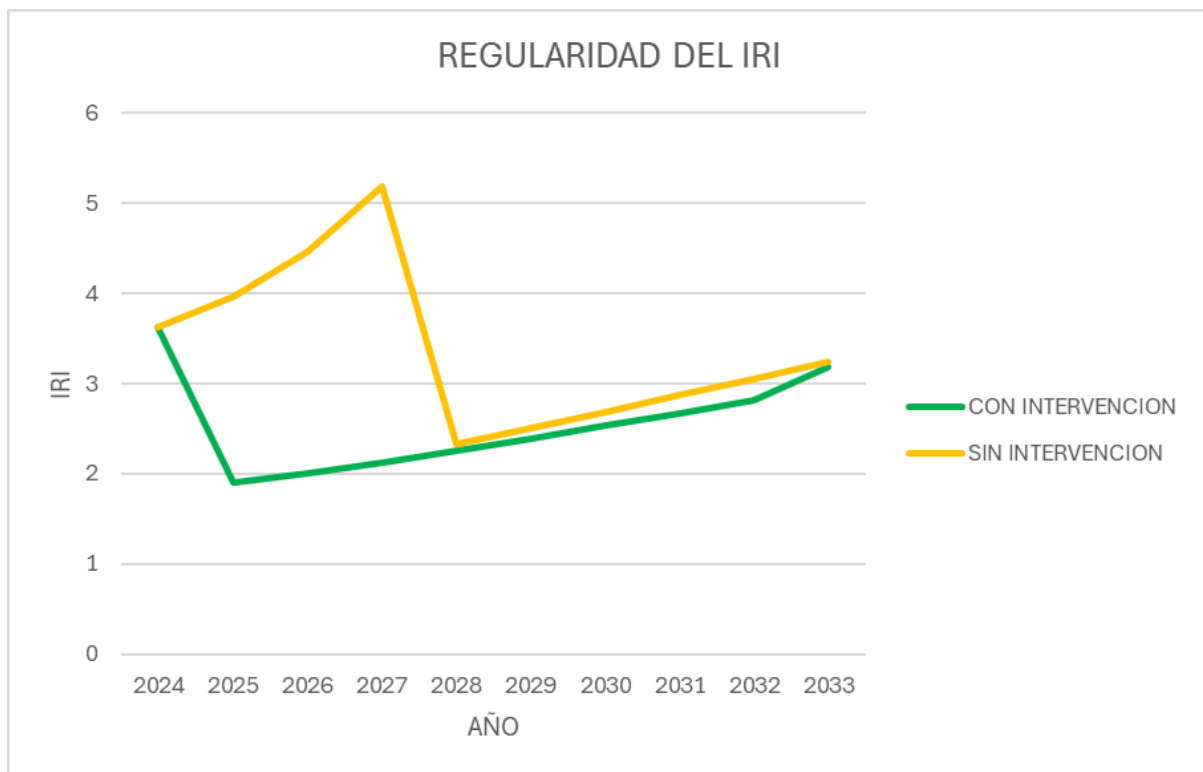


Figura 5.41- Comparación entre el Índice de Regularidad del IRI de ambas alternativas. Fuente: elaboración propia.

Para poder visualizar la comparación entre el porcentaje de área de baches de ambas alternativas se muestra la figura 5.42, dentro de ella se contrasta el desempeño de ambas. La alternativa con intervención presenta un porcentaje de baches prácticamente nulo durante todo el periodo analizado, esto es resultado directo de la aplicación anual del bacheo permitiendo corregir fallas localizadas de manera oportuna.

En caso contrario la alternativa sin ninguna intervención muestra un deterioro progresivo desde el año 2024, alcanzando su punto crítico en el año 2027. Esta tendencia refleja la acumulación incontrolada de daños en ausencia de la aplicación de medidas correctivas, degradando rápidamente las condiciones de la superficie de rodadura. A pesar de que en 2028 esta alternativa fue sometida a una reconstrucción de la misma donde el porcentaje de baches vuelve a cero, sin embargo, al no contemplarse más intervenciones, a partir de 2033 el deterioro ya es igual al de la alternativa con mantenimiento la cual recordemos ya es un pavimento viejo que únicamente ha sido sometido a medidas de mantenimiento.

A través de este análisis queda claro cómo a pesar de que una vialidad sea reconstruida si no se contempla en ella medidas de mantenimiento sufrirá de un desgaste acelerado en tiempo de vida, inclusive pudiendo llegar antes a un fallo total que una vialidad existente la cual si haya recibido medidas de mantenimiento oportuno.

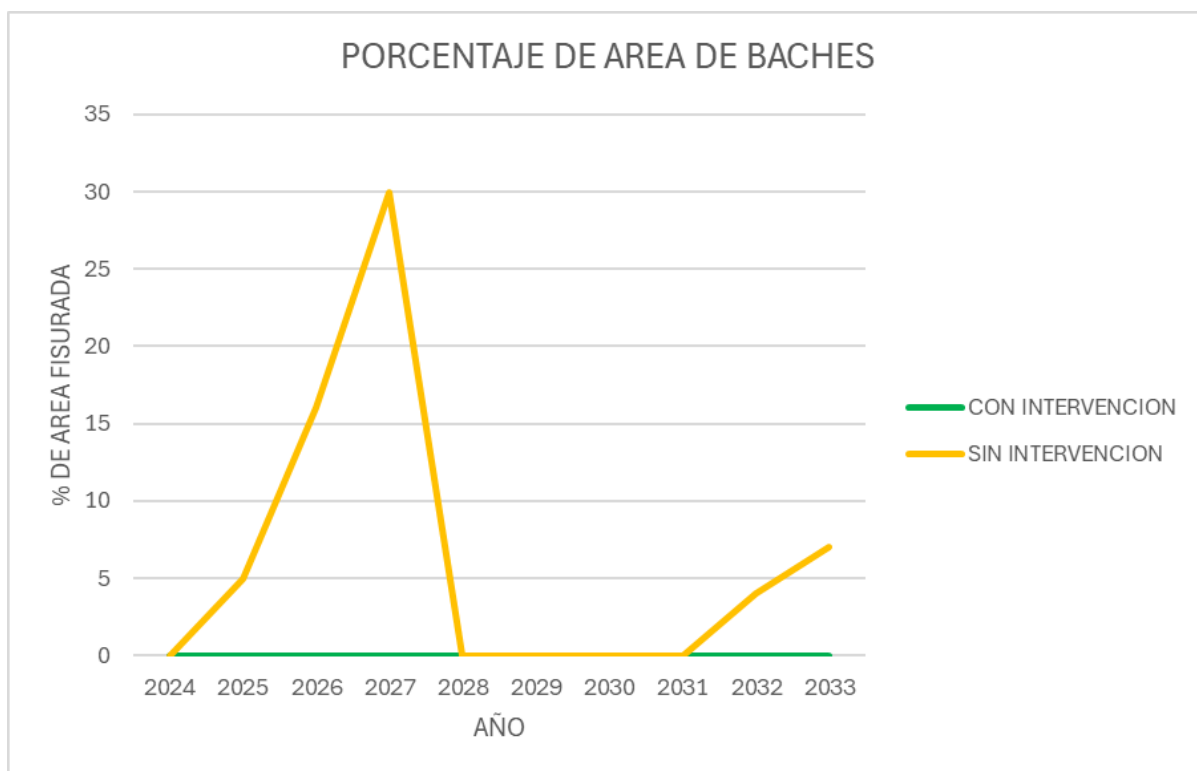


Figura 5.42- Comparación del porcentaje de área de baches entre ambas alternativas. Fuente: elaboración propia.

Por medio de la figura 5.43, podemos apreciar claramente el impacto de las estrategias de conservación en la evolución del deterioro de la superficie de rodaduras de ambas alternativas. Para la propuesta con intervención el porcentaje de área fisurada se reduce drásticamente entre los años 2024 y 2025 gracias a la implementación anual de relleno de grietas, medida que previene la propagación de fisuras y contribuye al control del deterioro prematuro. A pesar de que desde el año 2028 se aprecia un incremento progresivo en el porcentaje de área fisurada, este se mantiene en rangos moderados.

Como es de esperarse, la línea amarilla que representa la alternativa sin mantenimiento presenta un aumento acelerado en la fisuración desde el año 2024, llegando a un punto crítico superior al 35 % en el año 2027. Esto es debido a la ausencia total de acciones preventivas, permitiendo una rápida acumulación y expansión de grietas en la superficie, forzando a que en 2028 la ejecución de la reconstrucción de la superficie de rodadura. Sin embargo, debido a la falta de medidas posteriores a la reconstrucción, rápidamente la fisuración comienza a aparecer pocos años después, evidenciando que una única intervención mayor no es suficiente para garantizar un control sostenible del deterioro.

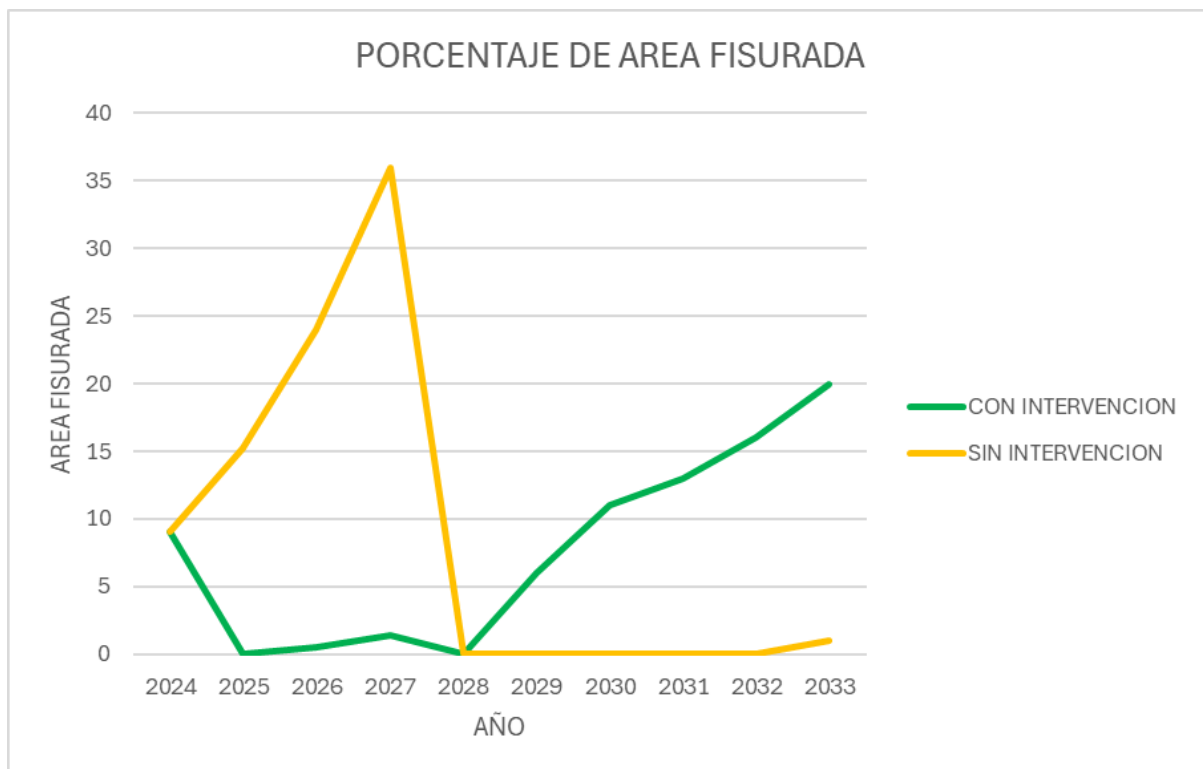


Figura 5.43- Comparación del porcentaje de área fisurada entre ambas alternativas. Fuente: elaboración propia.

A través de esta comparación realizada entre los resultados del modelo M2 y el modelo PI se concluye que la segunda alternativa representa una estrategia más efectiva y sostenible para la conservación del pavimento a lo largo de su ciclo de vida, ya que esta permite mantener bajo control el deterioro superficial, evitando la acumulación progresiva de baches y fisuras mediante acciones correctivas y preventivas como el bacheo y el sellado de grietas, que evitan que IRI alcance valores críticos, garantizando así un nivel de servicio óptimo. En contraste los resultados del modelo M2 presentan un deterioro acelerado obligando a una reconstrucción temprana de la superficie de rodamiento. Considerando esto, el modelo PI mejora la calidad del pavimento, seguridad vial y contribuye a una gestión más eficiente de los recursos, al reducir la frecuencia y magnitud de intervenciones mayores.

5.4 Resultados etapa 4- Combinación de modelos

Una vez validados todos los modelos, es posible entrar a la etapa de combinaciones en donde se pretende encontrar el conjunto de modelos que más aporte al nivel de servicio del tramo carretero. Para lograr esto se realizó el proceso de combinaciones explicado en el apartado cuatro y mostrado en la figura 5.44.

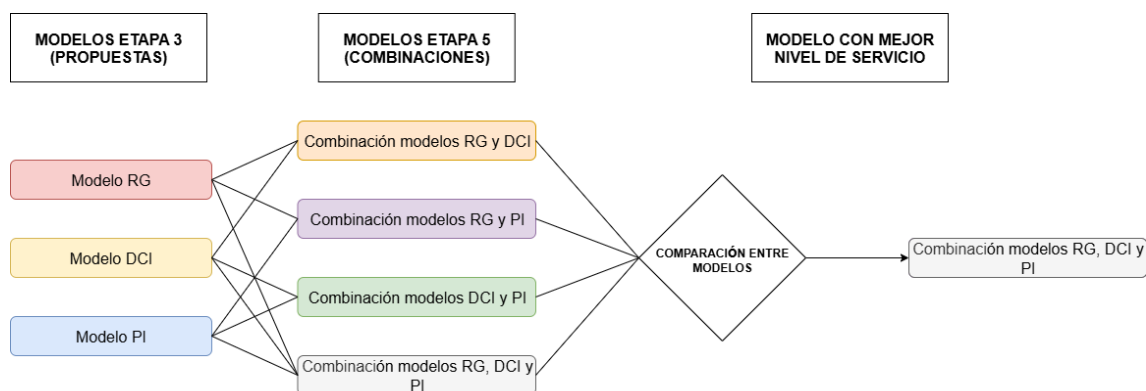


Figura 5.44- Proceso de combinación de propuestas. Fuente: elaboración propia.

Proceso de combinación de modelos

Para poder realizar las combinaciones de propuestas es importante recapitular el aporte que tiene cada modelo de manera individual; el modelo RG se enfoca en el análisis y rediseño geométrico de puntos de conflictos identificados dentro del caso de estudio; el modelo DCI busca proponer un ciclo semafórico óptimo para cada semáforo dentro del tramo carretero el cual permita el mayor desazolve del flujo vehicular; a través el modelo PI se genera un plan de intervención de la superficie de rodadura en busca de prolongar lo más posible la vida útil del pavimento.

Una vez establecidos los aportes de cada propuesta se realizan todas las combinaciones posibles conforme a los mostrados en el segundo paso de la figura 5.44, en la tabla 5.14 se muestra una descripción de todos los cuatro nuevos modelos obtenidos a través de este paso.

NUEVO MODELO	MODELOS QUE LOS CONFORMAN	APORTES DEL NUEVO MODELO
Modelo RG y DCI	- Modelo RG - Modelo DCI	- Rediseño geométrico puntuales - Nuevos ciclos semafóricos para los dispositivos de control de intersecciones
Modelo RG y PI	- Modelo RG - Modelo PI	- Rediseño geométrico puntuales - Plan de intervención en la superficie de rodadura
Modelo DCI y PI	- Modelo DCI - Modelo PI	- Rediseño geométrico puntuales - Plan de intervención en la superficie de rodadura
Modelo RG, DCI y PI	- Modelo RG - Modelo DCI - Modelo PI	- Rediseño geométrico puntuales - Nuevos ciclos semafóricos para los dispositivos de control de intersecciones - Plan de intervención en la superficie de rodadura

Tabla 5.14- Tabla comparativa de los modelos generados a partir de la combinación. Fuente: elaboración propia.

Una vez generados los cuatro modelos dentro del software PTV Vissim, se elaboró un modelo adicional conforme a las características particulares de cada combinación. Para los casos “RG, DCI y PI”, “RG y DCI” y “RG y PI”, se utilizó como base el modelo RG, aplicando ajustes en los ciclos semafóricos o modificando la velocidad límite, según las necesidades del escenario. En el caso del modelo “DCI y PI”, se tomó como base el modelo DCI y se ajustó la velocidad límite del software, igualándola a la velocidad de diseño de la carretera Mexicali–San Felipe. Esta modificación se justifica al considerar que, bajo condiciones óptimas del pavimento, la superficie de rodadura no representa un impedimento para que los vehículos circulen a la velocidad de diseño, tal como se explica en el subapartado correspondiente al análisis de la superficie de rodadura.

MODELO	NIVEL DE SERVICIO EN INTERSECCIONES		
	PORTICOS DEL VALLE	SANTIAGO VIDAURRI	AV. REAL
DCI - PI	LOS E	LOS C	LOS C
RG - DCI	LOS D	LOS C	LOS D
RG - PI	LOS E	LOS C	LOS D
RG - DCI - PI	LOS D	LOS C	LOS D

Tabla 5.16- Tabla comparativa del LOS obtenido para cada modelo. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.15 presenta una comparativa del Nivel de Servicio (LOS, por sus siglas en inglés) obtenido para cada modelo en las tres intersecciones que conforman el caso de estudio: Pórticos del Valle, Santiago Vidaurri y Avenida Real. Como se observa, todos los modelos arrojan niveles de servicio similares en la mayoría de las intersecciones. Sin embargo, se destaca que el modelo “DCI–PI” presenta un LOS de C en la intersección de Avenida Real, en contraste con los demás modelos, que presentan un LOS de D en esa misma ubicación.

La similitud entre los resultados se debe a que el LOS proporcionado por el software corresponde a una evaluación ponderada basada en múltiples factores. Por esta razón, para valorar con mayor precisión los beneficios de cada modelo, resulta necesario analizar de forma individual indicadores específicos como: longitud de cola (QLEN), número de vehículos que atraviesan la intersección (VEHS), tiempo promedio de demora (VEHDELAY), tiempo en detención completa (STOPDELAY), número de detenciones por vehículo (STOPS), emisiones contaminantes (EMISSIONSCO, EMISSIONSNOX, EMISSIONSVOC) y consumo de combustible.

INTERSECCION	PORTICOS DEL VALLE				SANTIAGO VIDAURRI				AV. REAL			
FACTORES	MODELOS											
	DCI-PI	RG-DCI	RG-PI	RG-DCI-PI	DCI-PI	RG-DCI	RG-PI	RG-DCI-PI	DCI-PI	RG-DCI	RG-PI	RG-DCI- PI
QLEN (m)	53	31.03	52.8	34.77	38.58	62.99	59.02	50.19	55.54	45.32	51.4	47.83
VEHS	4076	4096	4061	4145	4155	4203	4224	4273	4214	4154	4146	4219
VEHDELAY (s)	63.84	45.05	65.09	46.77	31.02	34.77	32.58	32.04	38.77	35.42	39.31	35.52
STOPDELAY (s)	46.5	32.35	47.68	33.21	22.45	26.75	24.04	23.45	22.75	22.51	25.48	21.5
STOPS	2.13	1.22	2.17	1.26	0.82	0.91	0.87	0.8	1.4	1.28	1.32	1.25
EMISSIONS CO (g)	12099	7277	12306	8457	5488	5472	5853	5713	8703	7199	8431	8176
EMISSIONS NOX (g)	2354	1415	2394	1645	1067	1064	1138	1111	1693	1400	1640	1590
EMISSIONS VOC (g)	2804	1686	2852	1960	1272	1268	1356	1324	2017	1668	1954	1894
CONSUMO DE COMBUSTIBLE (galón)	173	104	176	120	79	78	84	82	125	103	121	117

Tabla 5.16- Tabla comparativa de factores obtenidos para cada modelo. Fuente: elaboración propia.

En los apartados siguientes se analiza el comportamiento de cada modelo dentro de las tres intersecciones seleccionadas para este caso de estudio, considerando los indicadores de desempeño definidos:

1. Intersección Pórticos del Valle

- Modelo DCI - PI: Este modelo representa una intervención operativa sin rediseño geométrico. Presenta el peor desempeño general, con la mayor QLEN (53 m) y altos niveles de retardo (VEHDELAY: 63.84 s), así como el consumo de combustible más alto (173 gal). También emite las mayores cantidades de CO (12,099 g), NOx (2,354 g) y VOC (2,804 g).
- Modelo RG - DCI: Al incluir rediseño geométrico, se observa una reducción notable en QLEN (31.03 m) y VEHDELAY (45.05 s). Además, se reducen significativamente las emisiones (CO: 7,277 g), y el consumo de combustible cae a 104 gal. El número de vehículos procesados (VEHS) también aumenta a 4,096.
- Modelo RG - PI: Aunque mejora levemente el flujo vehicular (QLEN: 52.8 m, VEHS: 4,061), el retardo por vehículo es el más alto de todos los modelos (65.09 s), lo cual indica que sin una gestión operativa (DCI), las mejoras geométricas y superficiales no son suficientes para optimizar la intersección.
- Modelo RG - DCI - PI: Es el modelo con mejor desempeño global. Presenta una QLEN moderada (34.77 m), pero logra el VEHS más alto (4,145), menor STOPDELAY (33.21 s), bajo consumo (120 gal) y emisiones más equilibradas (CO: 8,457 g, NOx: 1,645 g, VOC: 1,960 g). El equilibrio entre eficiencia operativa, ambiental y capacidad de flujo lo convierte en el modelo más efectivo.

2. Intersección Santiago Vidaurri

- Modelo DCI - PI: Tiene la longitud de cola más alta (62.99 m) y un VEHS de 4,203. Si bien sus emisiones son moderadas, los tiempos de retardo (VEHDELAY: 31.02 s) y paradas (STOPS: 0.82) no destacan. Su consumo de combustible (79 gal) es bajo, pero el modelo no procesa la mayor cantidad de vehículos ni mejora significativamente los niveles de servicio.
- Modelo RG - DCI: Mejora la longitud de cola (59.02 m) y aumenta el VEHS a 4,224. Sin embargo, empeora el VEHDELAY (34.77 s) y el STOPDELAY (26.75 s), por lo que su desempeño es intermedio.
- Modelo RG - PI: Muestra un VEHS competitivo (4,203) y mejor VEHDELAY (32.58 s), además de el menor consumo de combustible (84 gal) y valores razonables de emisiones. No obstante, sus mejoras operativas siguen siendo limitadas.
- Modelo RG - DCI - PI: Es nuevamente el modelo más eficiente. Procesa el mayor volumen vehicular (4,273 VEHS), reduce la QLEN a 50.19 m,

VEHDELAY a 32.04 s, y mantiene bajos niveles de STOPS (0.87). Sus emisiones de CO (5,713 g), NOx (1,111 g) y VOC (1,324 g), junto con un consumo contenido (83 gal), confirman un excelente balance global.

3. Intersección Avenida Real

- Modelo DCI - PI: Procesa 4,214 vehículos, pero presenta una de las mayores longitudes de cola (55.54 m), VEHDELAY elevado (38.77 s), y el mayor consumo de combustible (125 gal). También tiene las emisiones más altas de CO (8,703 g).
- Modelo RG - DCI: Reduce QLEN a 45.32 m y VEHDELAY a 35.42 s, con una mejora en emisiones (CO: 7,199 g), aunque sigue siendo alto el consumo (103 gal).
- Modelo RG - PI: Tiene VEHDELAY de 39.31 s y STOPS de 1.32, pero no presenta ninguna mejora destacada sobre el modelo completo.
- Modelo RG - DCI - PI: Consigue el mayor VEHS (4,219) y el menor STOPDELAY (21.5 s), con una QLEN de 47.83 m. Las emisiones están equilibradas (CO: 8,176 g), y el consumo de combustible (117 gal) es más bajo que en modelos parciales. Aunque otros modelos tienen cifras ligeramente mejores en un factor aislado, el RG - DCI - PI es el único que optimiza todos los factores simultáneamente.

Tras analizar detalladamente las tres intersecciones, considerando todos los factores cuantitativos, el modelo RG - DCI - PI demuestra de forma consistente su superioridad. No solo procesa el mayor número de vehículos (VEHS) en todas las intersecciones, sino que además reduce los tiempos de retardo, las paradas, las emisiones contaminantes y el consumo de combustible. Su capacidad de mantener un equilibrio entre operación y sostenibilidad lo posiciona como el modelo ideal bajo un enfoque BIM integral. En contraste, los modelos parciales, aunque mejoran algunos aspectos, no alcanzan un desempeño homogéneo ni sostenible a largo plazo.

Este análisis confirma que la combinación de rediseño geométrico, dispositivos de control y mejoramiento de la superficie de rodadura es la estrategia más efectiva para la administración inteligente de intersecciones urbanas.

6. Conclusiones

La investigación desarrollada dentro de este trabajo demostró que un enfoque BIM, aplicado de manera integrada la administración de intersecciones urbanas permite estructurar decisiones más eficaces que las intervenciones tradicionales fragmentadas. El caso de estudio compuesto por la carretera Mexicali - San Felipe y las tres intersecciones generadas con las vialidades; Pórticos del Valle, General Santiago Vidaurri y Av. Real, mostró en su condición base, niveles de servicio entre C y E considerado como funcionamiento en el límite y deficiente, evidenciando la necesidad de medidas coordinadas de rediseño en la operación y mantenimiento de la carretera.

El planteamiento metodológico compuesto por cuatro etapas (Diagnóstico, Propuestas de modelos, Validación y Combinación) involucro softwares interoperables (ArcGIS, Civil 3D, Infracore, PTV Vissim, Synchro 11 y HDM-4) para transitar desde la comprensión del problema hasta la comparación de alternativas integradas. Este encadenamiento aseguró trazabilidad de datos (aforos, geometría, control y condición superficial) y uniformidad en todos los modelos generados.

En operación, el modelo DCI ajustó los ciclos semafóricos con Synchro para reasignar tiempos verdes a movimientos con mayor demanda; por ejemplo, en Pórticos del Valle el ciclo pasó de 134 s a 138 s tras optimizar asignaciones por carril. Estas modificaciones, posteriormente verificadas en el entorno de microsimulación, atendieron cuellos de botella específicos sin añadir infraestructura.

El escenario sin mantenimiento (M2) confirmó el deterioro acelerado: proyecciones a 10 años llevaron a condiciones intransitables, con IRI y daño superficial superiores a umbrales recomendados. Este contraste refuerza que la sola reconstrucción, sin un esquema de conservación, no garantiza un desempeño sostenible.

En conservación, el modelo PI estableció un plan a 10 años con acciones rutinarias y periódicas: bacheo y sellado de grietas anuales; renivelación al $IRI \geq 4$; y reencarpetado cuando el área dañada llegue al 30 % de la superficie. Bajo este esquema, se obtuvo una proyección donde el IRI bajó de 3.7 a 1.9 m/km en 2025 y se mantuvo controlado durante la mayor parte del horizonte; la fisuración se redujo prácticamente a cero tras la primera intervención y solo mostró crecimiento gradual hacia el final del periodo.

En diseño geométrico, el modelo RG atendió conflictos de maniobrabilidad y seguridad mediante ajustes puntuales de radios de giro y zonas de retorno, y se validó con recorridos de trayectoria usando Vehicle Tracking sobre el trazado 2D con las adecuaciones desarrolladas en Civil 3D, asegurando que cada propuesta cumpliera su función antes de combinarse con otros modelos.

Finalmente, el análisis de combinaciones concluyó que la fusión RG + DCI + PI es la opción más robusta: integra mejoras geométricas, optimización semafórica y

conservación sistemática, abordando simultáneamente eficiencia operativa y sostenibilidad estructural del tramo.

En conjunto, y frente a la pregunta e hipótesis de investigación si: ¿En qué medida la implementación del enfoque BIM, aplicado al modelado integrado de geometría vial, control semafórico y características de la superficie de rodadura en la operación y mantenimiento de intersecciones urbanas, mejora los niveles de servicio vehicular en comparación con intervenciones tradicionales desarrolladas de forma no integrada?. Los hallazgos respaldan la superioridad del enfoque propuesto, donde la integración de este enfoque presenta beneficios en cada uno de los aspectos evaluados.

6.1 Conclusión sobre la metodología desarrollada

La metodología BIM propuesta puede ser replicable y escalable, ya que: define entradas, herramientas y salidas por etapa, y establece reglas claras de validación antes de combinar alternativas. El flujo de trabajo genera consistencia entre diagnósticos, proyecciones y propuestas. La interoperabilidad entre SIG, CAD/BIM, microsimulación y gestión de pavimentos facilita evaluar el caso de estudio. La etapa de combinación, por su carácter integrador, es clave para cerrar el ciclo de decisión y comparar estrategias multidimensionales bajo un criterio común de desempeño.

Esta metodología no solo estructura de manera efectiva el análisis y la toma de decisiones, sino que también habilita una base técnica sólida para proponer intervenciones específicas. A partir de su aplicación en el caso de estudio, se derivan una serie de recomendaciones prácticas que buscan asegurar la continuidad operativa, la sostenibilidad de las mejoras y la eficiencia en la gestión vial urbana, las cuales se detallan a continuación.

1. Ejecución integrada de medidas. Implementar la combinación RG + DCI + PI como línea base de intervención en el corredor, priorizando ajustes geométricos puntuales que habiliten maniobras seguras, sincronización semafórica optimizada y el plan de conservación definido.
2. Recalibración operativa periódica. Actualizar aforos y ciclos semafóricos y verificarlos en Vissim conforme cambie la demanda, evitando degradaciones del nivel de servicio; el estudio trabajó con un crecimiento del 5 % anual del parque vehicular como supuesto de proyección.
3. Evitar “intervenciones únicas” sin programa de mantenimiento. Se comprobó que reconstruir sin conservación posterior induce un nuevo ciclo de deterioro en pocos años.

Las recomendaciones formuladas no solo buscan consolidar los beneficios observados durante la aplicación de la metodología, sino también abrir camino a nuevas oportunidades de mejora continua. En ese sentido, surgen líneas de

investigación complementarias orientadas a ampliar la aplicabilidad del enfoque, incorporar dimensiones aún no exploradas y fortalecer la capacidad adaptativa del sistema, elementos que permitirían evolucionar hacia una gestión vial urbana más robusta, escalable y sostenible. Las líneas de investigación futura son;

- Integración económico-financiera del plan de conservación y de las combinaciones de modelos. El modelo PI se evaluó “sin considerar el aspecto económico”; incorporar costos, valor presente y restricciones presupuestales permitiría optimizar secuencias de intervención.
- Replicabilidad en contextos urbanos mexicanos. La tesis identifica una brecha nacional de estudios aplicados; evaluar la metodología en otras ciudades y tipologías de intersección fortalecerá su validez externa.
- Gestión adaptativa. Diseñar rutinas de actualización de modelos con datos periódicos de campo (aforos, condición superficial) con el fin de generar automáticamente recalibraciones de ciclos y planes de conservación, en línea con el procedimiento validado.

En síntesis, la tesis valida que BIM como marco integrador, combinando rediseño geométrico, operación semafórica y conservación del pavimento mejora la capacidad de decisión y orienta intervenciones más efectivas y sostenibles que los enfoques no integrados, cumpliendo con el objetivo e hipótesis planteados.

7. BIBLIOGRAFÍA

Alonso Madrid, J. (2015). Nivel de desarrollo LOD. Definiciones, innovaciones y adaptación a España. En Revista Building Smart (pp. 40–56). Atanga.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). A policy on geometric design of highways and streets (7th ed.). AASHTO.

Ataucusi Choquecahua, C. (2019). Microsimulación del flujo vehicular en intersecciones viales empleando modelos BIM [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio institucional.
<https://scholar.google.com/scholar?cluster=16540575279952863302>

Bektursunova, G., Kiyalbayev, A., Yessentay, D., Kiyalbay, S., & Bakirova, D. (2025). Theoretical and experimental methods for determining the allowable speed limits on high-speed highways. *International Journal of GEOMATE*, 29(133), 72–80.

Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971–980.

Bull, A., & CEPAL, N. (2003). Congestión de tránsito: el problema y cómo enfrentarlo. CEPAL.

Campisi, T., Akgün, N., Mistretta, M., & Canale, A. (2020). Cycling master plans in Italy: The I-BIM feasibility tool. *Sustainability*, 12(11), 4723.

Cantisani, G., Correa Panesso, J. D., Del Serrone, G., Di Mascio, P., Gentile, G., Loprencipe, G., & Moretti, L. (2022). Re-design of a road node with 7D BIM: Geometrical, environmental and microsimulation approaches to implement a benefit-cost analysis between alternatives. *Automation in Construction*, 135, 104133.

Castañeda, K., Sánchez, O., Herrera, R. F., Pellicer, E., & Porras, H. (2021). BIM-based traffic analysis and simulation at road intersection design. *Automation in Construction*, 132, 103911.

Castañeda, K., Sánchez, O., Peña, C. A., Herrera, R. F., & Mejía, G. (2025). BIM-lean integration for construction scheduling of road intersections. *Automation in Construction*, 176, 106247.

Coloma Picó, E. (2008). Introducción a la tecnología BIM (1.^a ed.). Departament d'Expressió Gràfica Arquitectònica I, Secció Geometria Descriptiva, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.

Computer Integrated Construction Research Program. (2019). BIM Project Execution Planning Guide (Version 2.2). The Pennsylvania State University.

Dimara, A., Papaioannou, C., & Stogia, M. (2025). Beyond 3D: A multi-dimensional approach to BIM for smart and sustainable buildings. En *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations* (pp. 268–279). Springer.

Farfán, K. Y. C., & Pedemonte, L. R. C. (2020). Factores que influyen en el desgaste del pavimento de la Av. Ramón Castilla en Chulucanas–Piura 2019. *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*.

Forbes. (2023, 7 julio). La producción de vehículos en México sube casi 14% en primer semestre de 2023. *Forbes México*.

Forrester, R. (2020). The invention of the internal combustion engine and the motor car. In *Historical Theory and the Philosophy of History*. Humanities Commons.

Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2015). *Traffic and Highway Engineering* (5th ed.). Cengage Learning.

García, L., & Mungaray-Moctezuma, A. (2019). Impacto de la accesibilidad carretera en la calidad de vida de las localidades urbanas y suburbanas de Baja California, México. *EURE (Santiago)*, 45(134), 99–125.

Gelman, A., & Hill, J. (2007). *Regression and Other Stories*. Cambridge University Press.

González Guzmán, C. A. (2021). Redistribución del uso del espacio viario como gestor eficiente de movilidad. Tesis de máster, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

Hedges Companyany (2023, 24 octubre). How many cars are there in the world in 2023? *Hedges & Company*.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.

INRIX Research. (2024). *INRIX Global Traffic Scorecard 2023*. INRIX, Inc.

Institute of Transportation Engineers. (2010). *Manual of transportation engineering studies* (2nd ed.). Institute of Transportation Engineers.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). *Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental (ENCIG) 2023*. Aguascalientes, México: INEGI.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2025). Vehículos de motor registrados en circulación.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2025, Octubre). Parque vehicular.

International Organization for Standardization. (2018). ISO 19650-1:2018 – Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM): Information management using building information modelling – Part 1: Concepts and principles.

Khan, M.A., Farooq, M.U., Riaz, M.S., Zubair, M.U., Tanoli, W.A., & Qureshi, H.J. (2025). Development of an Integrated BIM and Traffic Simulation-Based Highway Alignment Planning and Optimization Framework. *Sustainability*, 17(4869).

Lewis, D., & Mogridge, M. J. H. (1990). Travel time budgets and the implications for transport policy. London: Department of Transport

LLANES AYALA, J. M. (2014). Estimación del Flujo de Saturación en Intersecciones Semaforizadas Seleccionadas de la Ciudad de México.

Manual para la inspección visual de pavimentos – Método PCI. (2008).

Martínez Lazcano, C. C., Montoya Alcaraz, M. A., Gutiérrez Moreno, J. M., & Álvarez Jiménez, E. (2023). Implementación de un sistema de gestión de pavimentos en contextos urbanos: Caso de estudio en Mexicali, B.C. Universidad Autónoma de Baja California.

Mungaray Moctezuma, A., & García Gómez, L. G. (2015). La influencia de la carretera Mexicali-San Felipe en la calidad de vida de sus inmediaciones. *Estudios Sociales*, 23(46), 190–212. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.

Navarro Vásquez, M. R. (2023). Mejora de intersecciones viales en la red vial urbana usando BIM e Infracore en el distrito de Ventanilla [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN.
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/35616>

OICA. (2024). Production Statistics: 2022 and 2023. International Organization of Motor Vehicle Manufacturers.

Oussouboure, G., & Delgado Victore, R. D. (2017). La asignación de recursos en la gestión de proyectos orientada a la metodología BIM. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 11(1).

Pérez, S. M., Reátegui, J. S., & Mendoza, A. S. (2021). Contaminación ambiental producida por el tránsito vehicular y sus efectos en la salud humana: Revisión de literatura. *Inventum*, 16(31), 102–112.

Salomón, D. (2009). Conservación de pavimentos: Metodología y estrategias. *Pavement Preservation Systems*, L.L.C.

Santos Casanova, J. (2021). Aplicación de la metodología Building Information Modeling (BIM) para el rediseño de la intersección localizada en el PK 3+477 de la carretera TF-652 en la provincia de Santa Cruz de Tenerife [Trabajo de Fin de Máster, Universidad de La Laguna]. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Universidad de La Laguna.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2017). NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017: Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. *Diario Oficial de la Federación*.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2018). Manual del proyecto geométrico de carreteras. Dirección General de Servicios Técnicos.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2011). NOM-034-SCT2-2011: Señalamiento horizontal y vertical en carreteras y vialidades urbanas. *Diario Oficial de la Federación Urbanas*.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2016). NOM-036-SCT2-2016: Condición física de pavimentos mediante inspección visual. *Diario Oficial de la Federación*.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2016). Guía para la conservación de caminos: Manual de procedimientos. Dirección General de Servicios Técnicos.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2017). NOM-012-SCT-2-2017: Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. *Diario Oficial de la Federación*.

Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). (2019). Manual de calles: diseño vial para ciudades mexicanas (1ª ed.). México: Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). (2016). Manual para obtener los volúmenes de tránsito en carreteras. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). (2022). Manual de dispositivos para el control del tránsito en calles y carreteras. Gobierno de México.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). (2020). Manual de diseño de pavimentos. Dirección General de Servicios Técnicos, SICT.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). (2013). Manual de conservación de pavimentos. Dirección General de Conservación de Carreteras, SICT.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). (2023). Datos Viales 2020.

SICT (2014-2024) Datos viales

Sistema de Seguimiento y Georreferenciación de la Inversión Pública Municipal. (2025).

Sohaib, M., Najeeb, A., Umair, M., Khan, M. A., Zubair, M. U., Jehan, Z., & Khattak, A. (2024). Improving urban road infrastructure analysis and design using an integrated BIM-GIS and traffic microsimulation framework. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(285).

Timm, D. H., Cheetham, G. C., & Dawood, D. R. (1995). Effects of pavement distress on roughness. *Transportation Research Record*, 1505, 49–55. Transportation Research Board.

Transportation Research Board. (2016). *Highway Capacity Manual* (6th ed.). Washington, D.C.: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.

Valdés, J. A. R., & Gómez, R. S. (2021). España: Peaje de Congestión para la Ciudad de Barcelona. Maastricht University.

Vásquez Varela, L. R. (2002). *Manual PCI: Índice de condición del pavimento para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Wen, Q.-J., Ren, Z.-J., Lu, H., & Wu, J.-F. (2021). The progress and trend of BIM research: A bibliometrics-based visualization analysis. *Automation in Construction*, 124, 103558.

Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of Pavement Design* (2nd ed.). Wiley.

Zhao, X. (2017). A scientometric review of global BIM research: Analysis and visualization. *Automation in Construction*, 80, 37–47.

ANEXO 1: RESULTADOS DEL SOFTWARE HDM4

Todos los costes se expresan en: US Dólar.

Alternativa con Mantenimiento

<u>Alternativa con mantenimiento</u>						
Año	Tramo	Descripción de trabajos	Código	Coste Económico	Coste Financiero	Cantidad de trabajo
2024	Tramo 1 Carretera Me	Overlay 50mm at 3 IRI	OVL50	104,218.5	125,062.2	6,947.90 sq. m
		Prep. Rep. Bordes		1,240.6	1,054.5	88.61 sq. m
	Tramo 2 Carretera Me	Overlay 50mm at 3 IRI	OVL50	105,000.0	126,000.0	7,000.00 sq. m
		Prep. Rep. Bordes		580.2	493.2	41.45 sq. m
		Coste total anual:			211,039.3	252,609.9
2025	Tramo 1 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	0.0	0.0	0.00 sq. m
	Tramo 2 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Coste total anual:			0.0	0.0
2026	Tramo 1 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	0.0	0.0	0.00 sq. m
	Tramo 2 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Coste total anual:			0.0	0.0
2027	Tramo 1 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	0.0	0.0	0.00 sq. m
	Tramo 2 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Coste total anual:			0.0	0.0
2028	Tramo 1 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	0.0	0.0	0.00 sq. m
	Tramo 2 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Coste total anual:			0.0	0.0
2029	Tramo 1 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	0.0	0.0	0.00 sq. m
	Tramo 2 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Coste total anual:			0.0	0.0

HDM-4 Calendario de actuaciones (por año)

2030	Tramo 1 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	3,618.4	4,824.5	241.23 sq. m
	Tramo 2 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	0.0	0.0	0.00 sq. m
Coste total anual:				3,618.4	4,824.5	

2031	Tramo 1 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	3,618.1	4,824.2	241.21 sq. m
	Tramo 2 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	0.0	0.0	0.00 sq. m
Coste total anual:				3,618.1	4,824.2	

2032	Tramo 1 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	3,617.9	4,823.9	241.19 sq. m
	Tramo 2 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	3,747.7	4,997.0	249.85 sq. m
Coste total anual:				7,365.6	9,820.8	

2033	Tramo 1 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	3,617.6	4,823.5	241.17 sq. m
	Tramo 2 Carretera Me	Pothole patching	POTPAT	0.0	0.0	0.00 sq. m
		Crack Sealing	CRKSL	3,747.6	4,996.9	249.84 sq. m
Coste total anual:				7,365.3	9,820.4	

Costes totales para la Alternativa: 233,006.7 281,899.8

Alternativa sin Mantenimiento

Año	Tramo	Descripción de trabajos	Código	Coste Económico	Coste Financiero	Cantidad de trabajo
2026	Tramo 2 Carretera Me	Recon at IRI 5	RECON	280,000.0	336,000.0	0.00 sq. m
Coste total anual:				280,000.0	336,000.0	

2027	Tramo 1 Carretera Me	Recon at IRI 5	RECON	277,916.0	333,499.2	0.00 sq. m
Coste total anual:				277,916.0	333,499.2	

Costes totales para la Alternativa: 557,916.0 669,499.2

Resumen de Costes Económicos Totales Anuales

	tiva con Mantenimiento	tiva sin Mantenimiento
2024	211,039.31	0.00
2025	0.00	0.00
2026	0.00	280,000.00
2027	0.00	277,915.97
2028	0.00	0.00

H D M - 4 Calendario de actuaciones (por año)

	tiva con Mantenimiento	ativa sin Mantenimiento
2029	0.00	0.00
2030	3,618.39	0.00
2031	3,618.14	0.00
2032	7,365.62	0.00
2033	7,365.26	0.00
Total	233,006.72	557,915.97

Nombre del estudio: **Proyecto 1**
 Fecha de ejecución: **19-07-2025**

Detalles tramo:

ID: T1 Descripción: Tramo 1 Carretera Mexicali - San Felipe Clase de carretera: Primary or Trunk
 Longitud: 1.04km Ancho: 6.70m Rampa + Pendiente: 1.00m/km Curvatura: 3.00 %/km

Alternativa/Alternativa con Mantenimiento

					Firme Bituminoso													
					Estado a final de año													
Año	TM	ESAL (millones/km ² año) YE4		Tipo de firme	Número Estructura medio SNPK	Regularidad IRI (m/km) RI	Área Fisurada (%)				Área Pavada ARV	Baches		Área de rotura de borde (m ² /km) AEB	Profundidad media de la rodera (mm) RDM	Desv. Est. d la rodera RDS	Textura (mm) TD	Resistencia al deslizamiento SFC50
							Total estructural ACA	Ancha estructural ACW	Transversal Temica ACT	Fisuración total ACRA		Número por km NPT	Área (%) APOT					
2024	13482	0.79	Antes trabajos	AMGB	2.46	3.63	9.10	0.00	0.00	9.10	34.95	0	0.00	88.61	11.67	5.06	0.50	0.40
			Después trabajos	AMAP	2.46	1.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1.75	1.45	0.70	0.40
2025	13488	0.79	Antes trabajos	AMAP	3.25	1.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	52.81	2.06	1.68	0.68	0.40
			Después trabajos	AMAP	3.25	1.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	52.81	2.06	1.68	0.68	0.40
2026	13495	0.79	Antes trabajos	AMAP	3.25	2.01	0.50	0.00	0.00	0.50	0.00	0	0.00	105.35	2.37	1.91	0.67	0.40
			Después trabajos	AMAP	3.25	2.01	0.50	0.00	0.00	0.50	0.00	0	0.00	105.35	2.37	1.91	0.67	0.40
2027	13502	0.79	Antes trabajos	AMAP	3.25	2.13	1.36	0.00	0.00	1.36	0.00	0	0.00	157.96	2.68	2.12	0.67	0.40
			Después trabajos	AMAP	3.25	2.13	1.36	0.00	0.00	1.36	0.00	0	0.00	157.96	2.68	2.12	0.67	0.40
2028	13509	0.79	Antes trabajos	AMAP	3.24	2.26	3.08	0.00	0.00	3.08	0.00	0	0.00	210.65	2.98	2.33	0.67	0.40
			Después trabajos	AMAP	3.24	2.26	3.08	0.00	0.00	3.08	0.00	0	0.00	210.65	2.98	2.33	0.67	0.40
2029	13515	0.79	Antes trabajos	AMAP	3.24	2.39	6.08	0.00	0.00	6.08	0.00	0	0.00	263.40	3.29	2.53	0.67	0.40
			Después trabajos	AMAP	3.24	2.39	6.08	0.00	0.00	6.08	0.00	0	0.00	263.40	3.29	2.53	0.67	0.40
2030	13522	0.79	Antes trabajos	AMAP	3.23	2.54	10.84	3.47	0.00	10.84	0.00	0	0.00	316.23	3.60	2.72	0.67	0.40
			Después trabajos	AMAP	3.23	2.52	7.37	0.00	0.00	7.37	0.00	0	0.00	316.23	3.60	2.72	0.67	0.40
2031	13529	0.79	Antes trabajos	AMAP	3.23	2.67	12.80	3.47	0.00	12.80	0.00	0	0.00	369.15	3.91	2.91	0.67	0.40
			Después trabajos	AMAP	3.23	2.65	9.33	0.00	0.00	9.33	0.00	0	0.00	369.15	3.91	2.91	0.67	0.40
2032	13536	0.79	Antes trabajos	AMAP	3.22	2.81	15.71	3.47	0.00	15.71	0.00	0	0.00	422.14	4.22	3.09	0.67	0.40
			Después trabajos	AMAP	3.22	2.79	12.24	0.00	0.00	12.24	0.00	0	0.00	422.14	4.22	3.09	0.67	0.40

H D M - 4 Estado anual de la carretera (rodadura bituminosa)

2033	13543	0.79	Antes trabajos	AMAP	3.19	2.96	19.91	3.47	0.00	19.91	0.00	0	0.00	475.22	4.53	3.26	0.67	0.40
			Después trabajos	AMAP	3.19	2.94	16.44	0.00	0.00	16.44	0.00	0	0.00	475.22	4.53	3.26	0.67	0.40

HDM-4 Estado anual de la carretera (rodadura bituminosa)
Detalles tramo:

ID: T1 Descripción: Tramo 1 Carretera Mexicali - San Felipe Clase de carretera: Primary or Trunk
 Longitud: 1.04km Ancho: 6.70m Rampa + Pendiente: 1.00m/km Curvatura: 3.00 %/km
 Alternativa: Alternativa sin Mantenimiento

				Firme Bituminoso														
				Estado a final de año														
Año	TM	ESAL		Tipo de	Numero	Regularidad	Area Fisurada (%)				Area	Baches		Area de	Roderas		Textura	Resistencia
	IMD	(millones de		firme	Estructura	IRI	Total	Ancha	Transversal	Fisuración	Número	Area	Profundidad	Desv. Est. d	(mm)	TD	deslizamiento	
		arril)	YE4		medio	(m/km)	estructural	estructural	Temica	total	por km	(%)	media de la	la rodadura			SFC50	
					SNPK	RI	ACA	ACW	ACT	ACRA	NPT	APOT	RDM	RDS				
2024	13482	0.79	Antes trabajos	AMGB	2.46	3.63	9.10	0.00	0.00	9.10	34.95	0	0.00	88.61	11.67	5.06	0.50	0.40
			Después trabajos	AMGB	2.46	3.63	9.10	0.00	0.00	9.10	34.95	0	0.00	88.61	11.67	5.06	0.50	0.40
2025	13488	0.79	Antes trabajos	AMGB	2.43	3.97	15.21	0.00	0.00	15.21	72.62	31	0.05	194.24	12.09	5.03	0.50	0.40
			Después trabajos	AMGB	2.43	3.97	15.21	0.00	0.00	15.21	72.62	31	0.05	194.24	12.09	5.03	0.50	0.40
2026	13495	0.79	Antes trabajos	AMGB	2.39	4.47	23.96	0.00	0.00	23.96	71.40	105	0.16	300.54	12.51	5.00	0.50	0.40
			Después trabajos	AMGB	2.39	4.47	23.96	0.00	0.00	23.96	71.40	105	0.16	300.54	12.51	5.00	0.50	0.40
2027	13502	0.79	Antes trabajos	AMGB	2.32	5.18	35.95	1.96	0.00	35.95	57.67	201	0.30	407.75	12.93	4.95	0.50	0.40
			Después trabajos	AMGB	2.32	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.40
2028	13509	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.74	2.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	109.33	4.82	3.41	0.68	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.74	2.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	109.33	4.82	3.41	0.68	0.40
2029	13515	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.74	2.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	214.83	6.91	4.31	0.67	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.74	2.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	214.83	6.91	4.31	0.67	0.40
2030	13522	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.74	2.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	320.53	9.01	4.86	0.67	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.74	2.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	320.53	9.01	4.86	0.67	0.40
2031	13529	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.74	2.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	426.41	11.11	5.06	0.67	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.74	2.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	426.41	11.11	5.06	0.67	0.40
2032	13536	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.74	3.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	532.49	13.21	4.91	0.67	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.74	3.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	532.49	13.21	4.91	0.67	0.40
2033	13543	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.74	3.24	0.82	0.00	0.00	0.82	0.00	0	0.00	638.78	15.32	4.60	0.67	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.74	3.24	0.82	0.00	0.00	0.82	0.00	0	0.00	638.78	15.32	4.60	0.67	0.40

HDM-4 Estado anual de la carretera (rodadura bituminosa)
Detalles tramo:

ID: T2 Descripción: Tramo 2 Carretera Mexicali - San Felipe Clase de carretera: Primary or Trunk
 Longitud: 1.00km Ancho: 7.00m Rampa + Pendiente: 1.00m/km Curvatura: 3.00 %/km
 Alternativa: Alternativa con Mantenimiento

					Firme Bituminoso														
					Estado a final de año														
Año	TM IMD	ESAL (millones/año) YE4		Tipo de firme	Numero Estructura medio SNPK	Regularidad IRI (m/km) RI	Area Fisurada (%)				Área Peladuras (%) ARV	Baches	Área de rotura de borde (m²/km) AEB	Roderas		Textura (mm) TD	Resistencia al deslizamiento SFC50		
							Total estructural ACA	Ancha estructural ACW	Transversal Termica ACT	Fisuración total ACRA		Número por km NPT	Area (%) APOT		Profundidad media de la rodadura (mm) RDM	Desv. Est. de la rodadura RDS			
2024	13482	0.79	Antes trabajos	AMGB	3.48	4.37	9.24	0.00	0.00	0.00	9.24	35.08	0	0.00	41.45	9.00	4.86	0.50	0.40
			Después trabajos	AMAP	3.48	2.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1.35	1.14	0.70
2025	13488	0.79	Antes trabajos	AMAP	4.27	2.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	21.34	1.58	1.32	0.68	0.40
			Después trabajos	AMAP	4.27	2.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	21.34	1.58	1.32	0.68
2026	13495	0.79	Antes trabajos	AMAP	4.27	2.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	42.31	1.80	1.49	0.67	0.40
			Después trabajos	AMAP	4.27	2.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	42.31	1.80	1.49	0.67
2027	13502	0.79	Antes trabajos	AMAP	4.27	2.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	63.31	2.03	1.66	0.67	0.40
			Después trabajos	AMAP	4.27	2.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	63.31	2.03	1.66	0.67
2028	13509	0.79	Antes trabajos	AMAP	4.27	2.23	0.50	0.00	0.00	0.50	0.00	0	0.00	84.34	2.25	1.82	0.67	0.40	
			Después trabajos	AMAP	4.27	2.23	0.50	0.00	0.00	0.50	0.00	0	0.00	84.34	2.25	1.82	0.67	0.40	
2029	13515	0.79	Antes trabajos	AMAP	4.27	2.29	1.45	0.00	0.00	1.45	0.00	0	0.00	105.39	2.48	1.99	0.67	0.40	
			Después trabajos	AMAP	4.27	2.29	1.45	0.00	0.00	1.45	0.00	0	0.00	105.39	2.48	1.99	0.67	0.40	
2030	13522	0.79	Antes trabajos	AMAP	4.26	2.36	3.35	0.00	0.00	3.35	0.00	0	0.00	126.47	2.70	2.14	0.67	0.40	
			Después trabajos	AMAP	4.26	2.36	3.35	0.00	0.00	3.35	0.00	0	0.00	126.47	2.70	2.14	0.67	0.40	
2031	13529	0.79	Antes trabajos	AMAP	4.26	2.44	6.63	0.00	0.00	6.63	0.00	0	0.00	147.57	2.93	2.29	0.67	0.40	
			Después trabajos	AMAP	4.26	2.44	6.63	0.00	0.00	6.63	0.00	0	0.00	147.57	2.93	2.29	0.67	0.40	
2032	13536	0.79	Antes trabajos	AMAP	4.25	2.53	11.79	3.57	0.00	11.79	0.00	0	0.00	168.71	3.16	2.44	0.67	0.40	
			Después trabajos	AMAP	4.25	2.51	8.22	0.00	0.00	8.22	0.00	0	0.00	168.71	3.16	2.44	0.67	0.40	
2033	13543	0.79	Antes trabajos	AMAP	4.25	2.61	14.16	3.57	0.00	14.16	0.00	0	0.00	189.86	3.38	2.59	0.67	0.40	
			Después trabajos	AMAP	4.25	2.58	10.59	0.00	0.00	10.59	0.00	0	0.00	189.86	3.38	2.59	0.67	0.40	

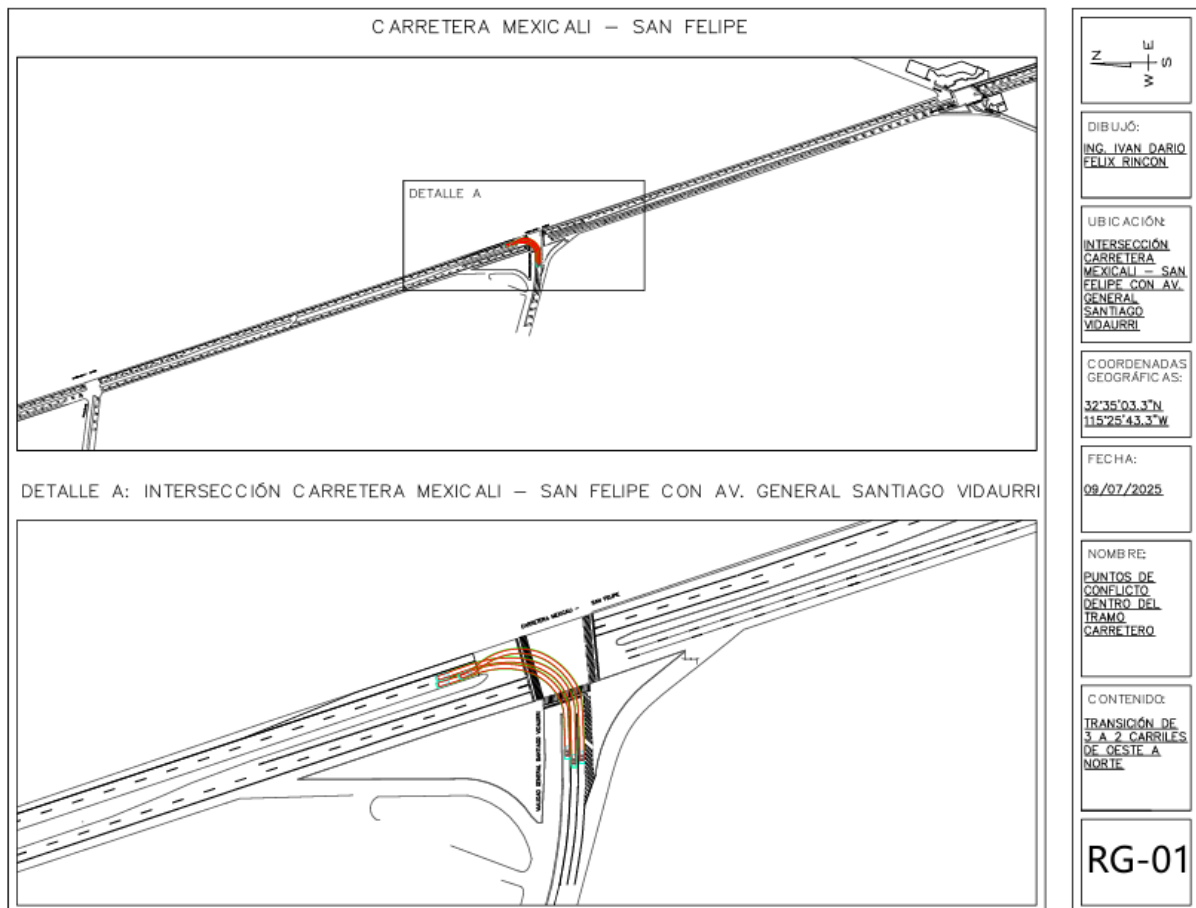
HDM-4 Estado anual de la carretera (rodadura bituminosa)

Detalles tramo:

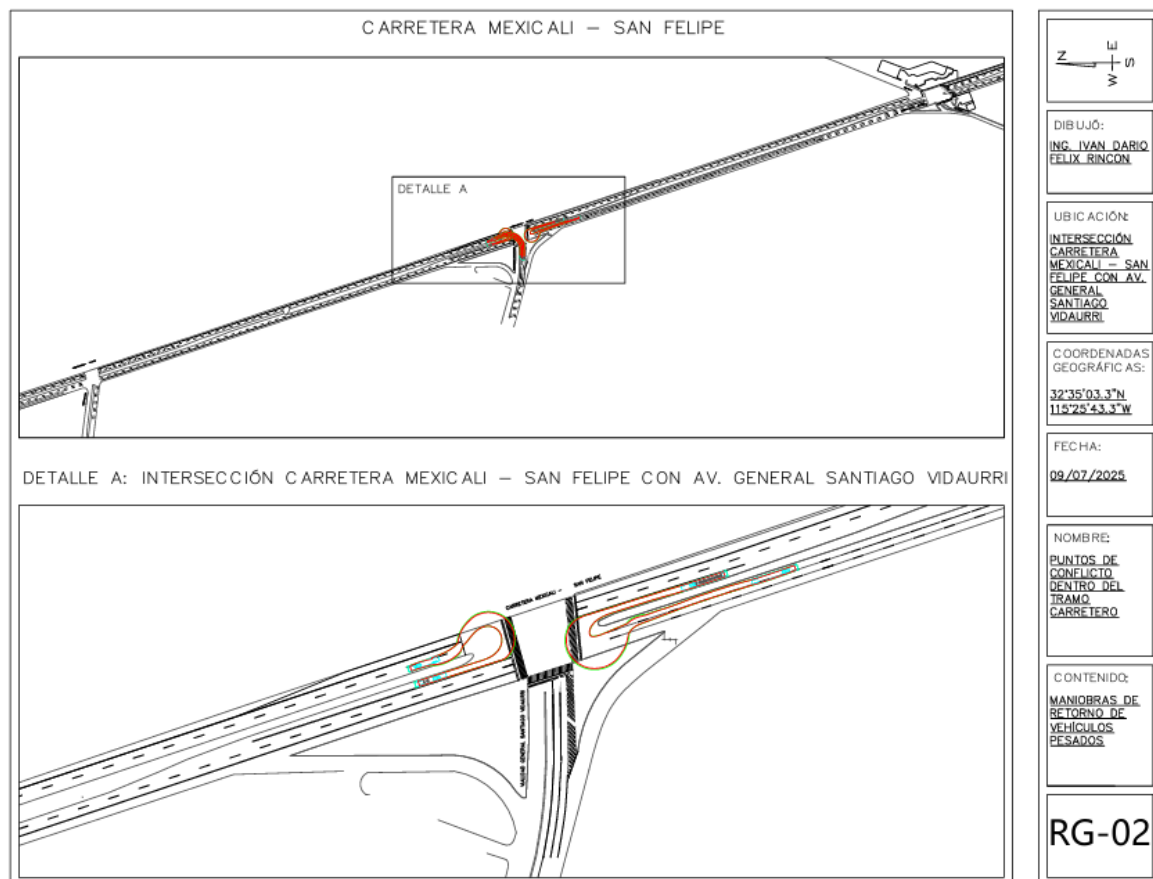
ID: T2 Descripción: Tramo 2 Carretera Mexicali - San Felipe Clase de carretera: Primary or Trunk
 Longitud: 1.00km Ancho: 7.00m Rampa + Pendiente: 1.00m/km Curvatura: 3.00 %/km
 Alternativa: Alternativa sin Mantenimiento

				Firme Bituminoso														
				Estado a final de año														
Año	TM IMD	ESAL (millones de arril) YE4		Tipo de firme	Numero Estructura medio SNPK	Regularidad IRI (m/km) RI	Area Fisurada (%)			Fisuración total ACRA	Area Peladuras (%) ARV	Baches Número por km NPT	Area (%) APOT	Area de rotura de borde (m²/km) AEB	Roderas Profundidad media de la rodera (mm RDM	Desv. Est. d la rodera RDS	Textura (mm) TD	Resistencia al deslizamiento SFC50
2024	13482	0.79	Antes trabajos	AMGB	3.48	4.37	9.24	0.00	0.00	9.24	35.08	0	0.00	41.45	9.00	4.86	0.50	0.40
			Después trabajos	AMGB	3.48	4.37	9.24	0.00	0.00	9.24	35.08	0	0.00	41.45	9.00	4.86	0.50	0.40
2025	13488	0.79	Antes trabajos	AMGB	3.47	4.61	15.62	0.00	0.00	15.62	72.83	81	0.12	84.12	9.29	4.91	0.50	0.40
			Después trabajos	AMGB	3.47	4.61	15.62	0.00	0.00	15.62	72.83	81	0.12	84.12	9.29	4.91	0.50	0.40
2026	13495	0.79	Antes trabajos	AMGB	3.45	5.56	24.72	0.00	0.00	24.72	73.02	314	0.45	127.17	9.57	4.95	0.50	0.40
			Después trabajos	AMGB	3.45	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.40
2027	13502	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.74	2.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	44.12	4.83	3.41	0.68	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.74	2.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	44.12	4.83	3.41	0.68	0.40
2028	13509	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.74	2.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	86.18	6.91	4.31	0.67	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.74	2.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	86.18	6.91	4.31	0.67	0.40
2029	13515	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.74	2.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	128.31	9.01	4.86	0.67	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.74	2.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	128.31	9.01	4.86	0.67	0.40
2030	13522	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.74	2.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	170.52	11.10	5.06	0.67	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.74	2.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	170.52	11.10	5.06	0.67	0.40
2031	13529	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.74	3.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	212.81	13.19	4.91	0.67	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.74	3.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	212.81	13.19	4.91	0.67	0.40
2032	13536	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.74	3.24	0.82	0.00	0.00	0.82	0.00	0	0.00	255.18	15.29	4.59	0.67	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.74	3.24	0.82	0.00	0.00	0.82	0.00	0	0.00	255.18	15.29	4.59	0.67	0.40
2033	13543	0.79	Antes trabajos	AMGB	4.73	3.44	2.99	0.00	0.00	2.99	0.00	0	0.00	297.64	17.39	5.22	0.67	0.40
			Después trabajos	AMGB	4.73	3.44	2.99	0.00	0.00	2.99	0.00	0	0.00	297.64	17.39	5.22	0.67	0.40

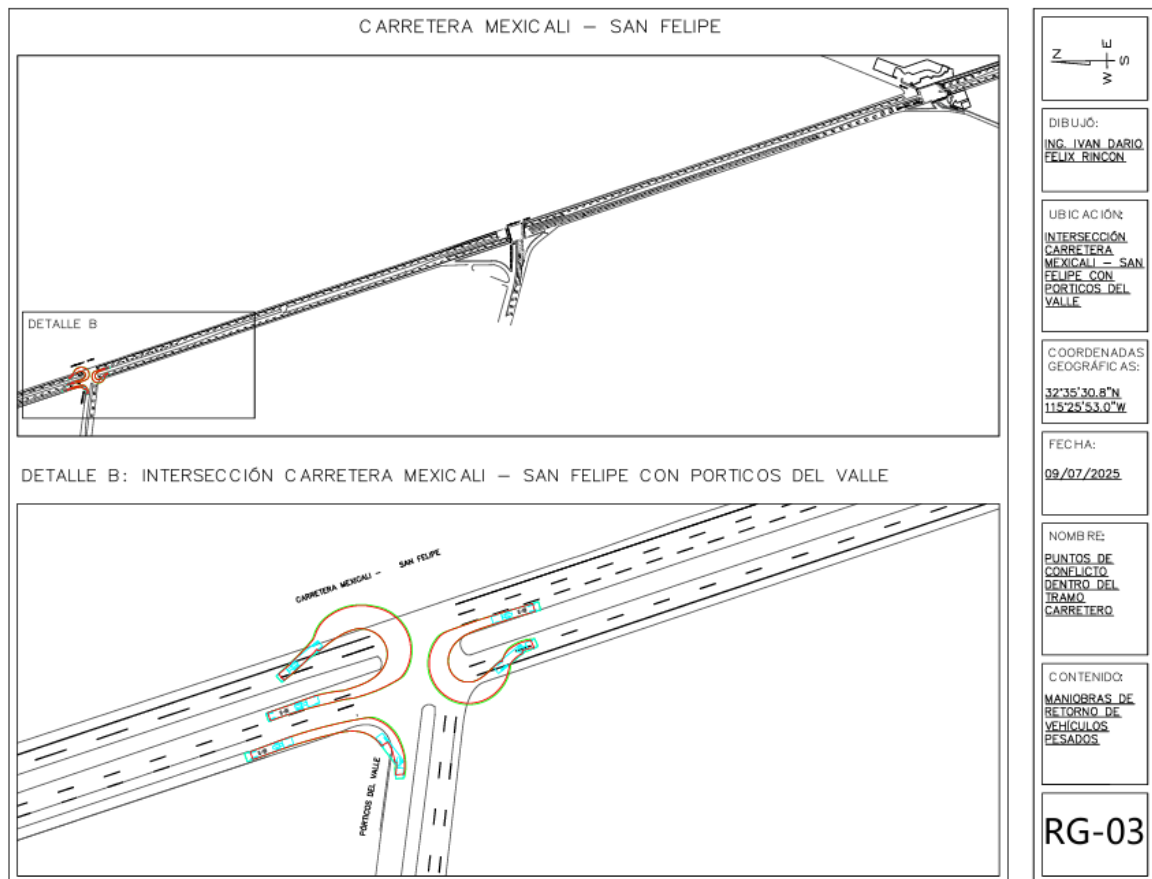
ANEXO 2: PLANOS DEL MODELO RG



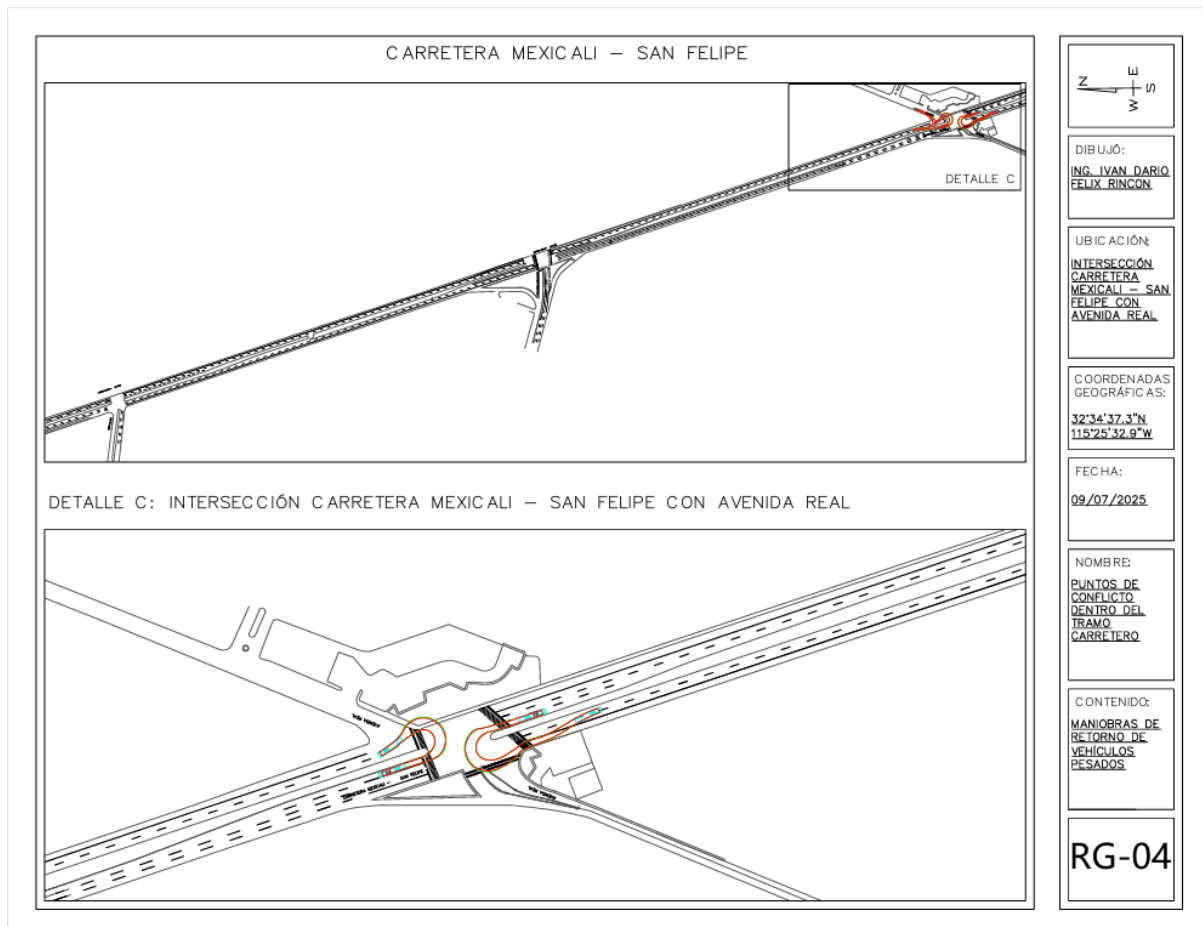
RG-01.- Recorrido de vehículos de oeste a norte sobre Intersección entre Carretera Mexicali - San Felipe y General Santiago Vidaurri. Fuente: elaboración propia.



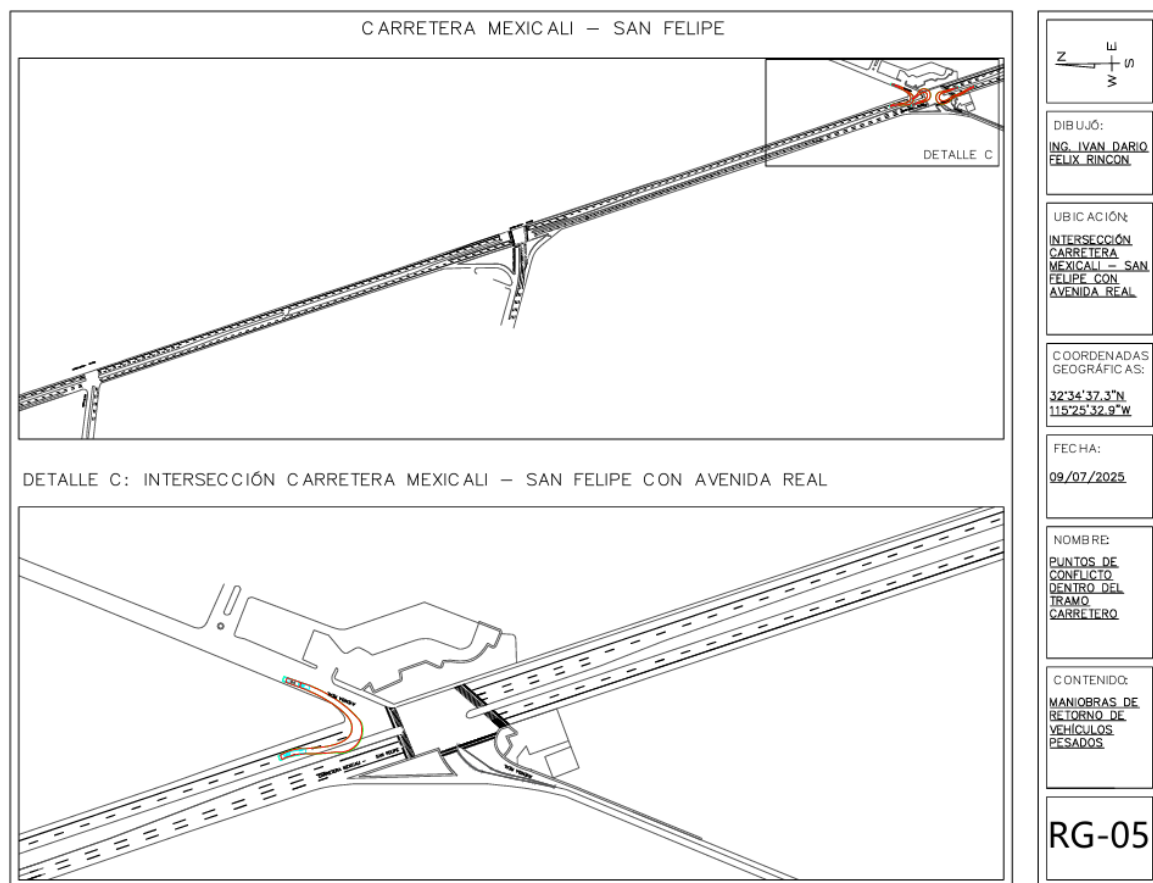
RG-02.- Recorrido de vehículos pesados al realizar maniobras de retorno sobre *Intersección entre Carretera Mexicali - San Felipe y General Santiago Vidaurri*. Fuente: elaboración propia.



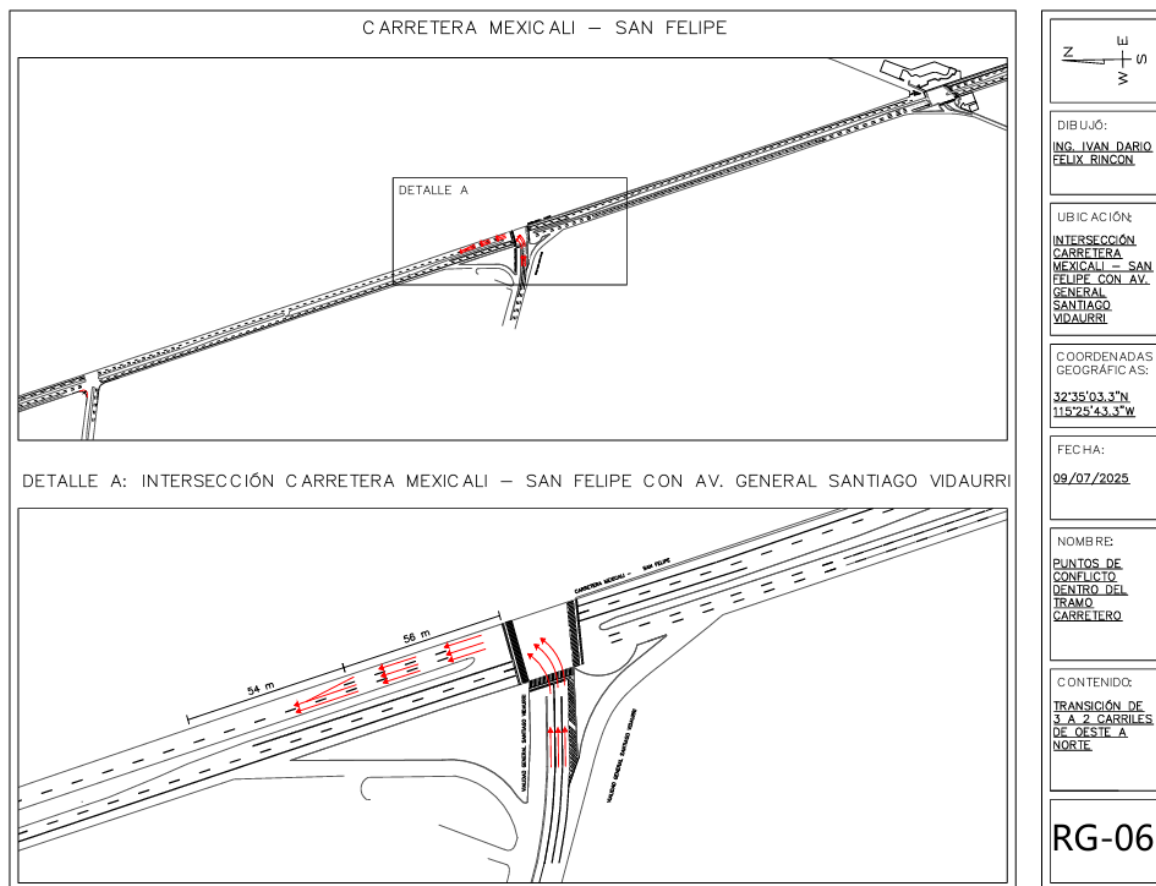
RG-03.- Movimientos conflictivos dentro de la Intersección entre Carretera Mexicali - San Felipe y Pórticos del valle. Fuente: elaboración propia.



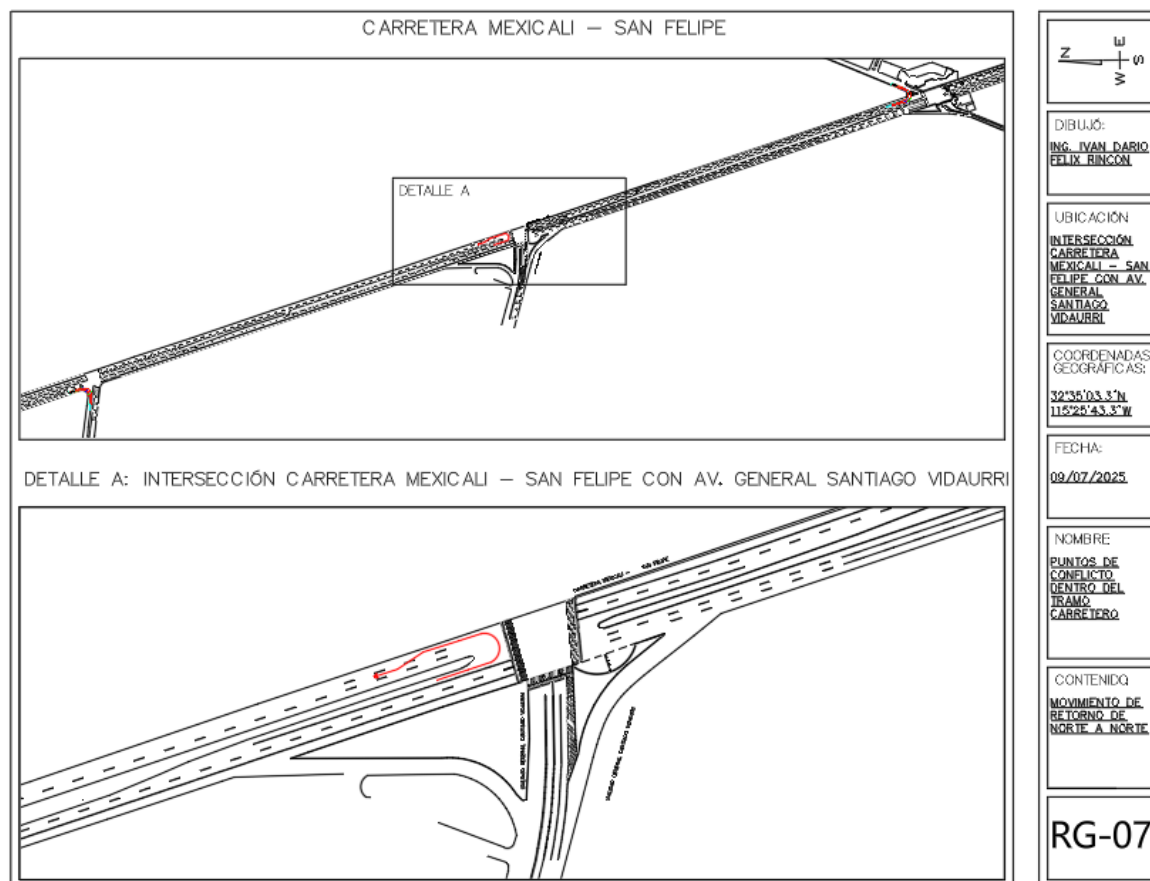
RG-04.- Movimientos de retorno conflictivos Carretera Mexicali - San Felipe y Avenida Real. Fuente: Elaboración propia.



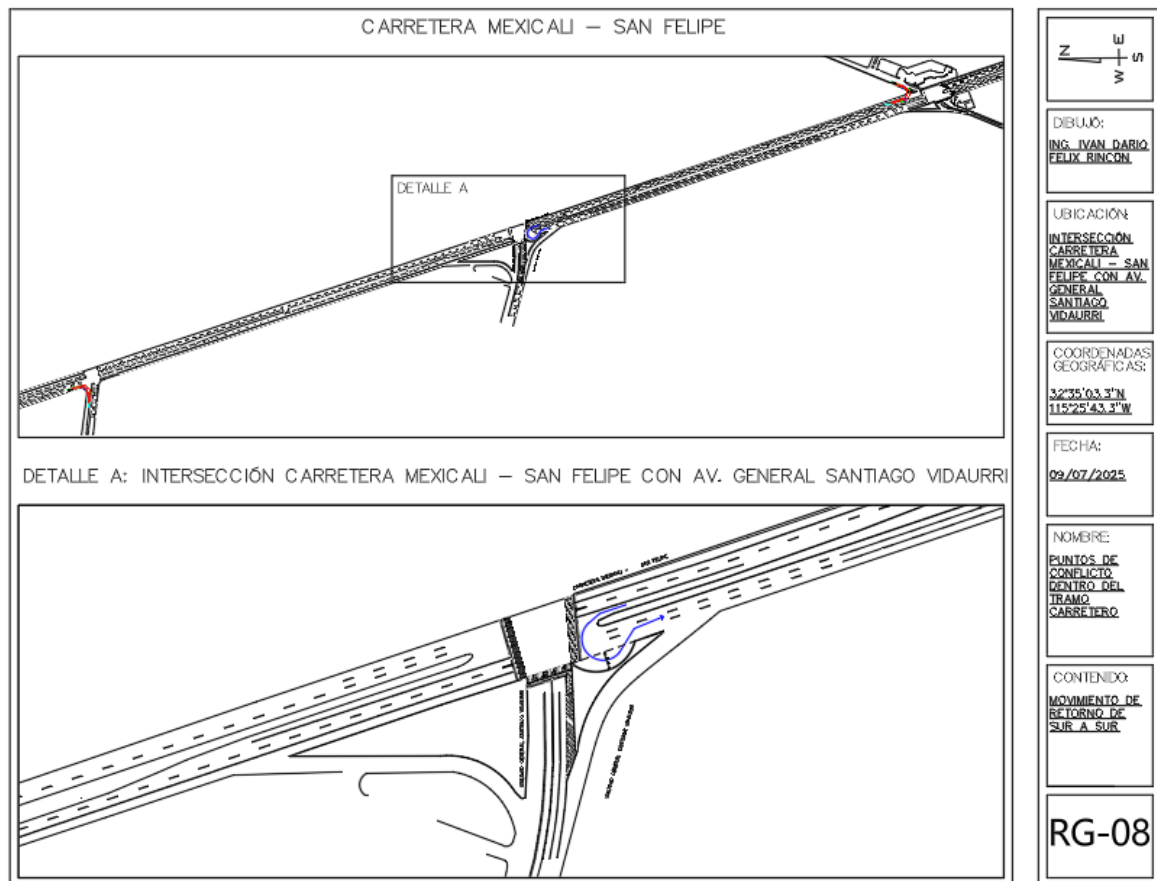
RG-05.- Movimientos de ceda el paso conflictivos Carretera Mexicali - San Felipe y Avenida Real.
Fuente: Elaboración propia.



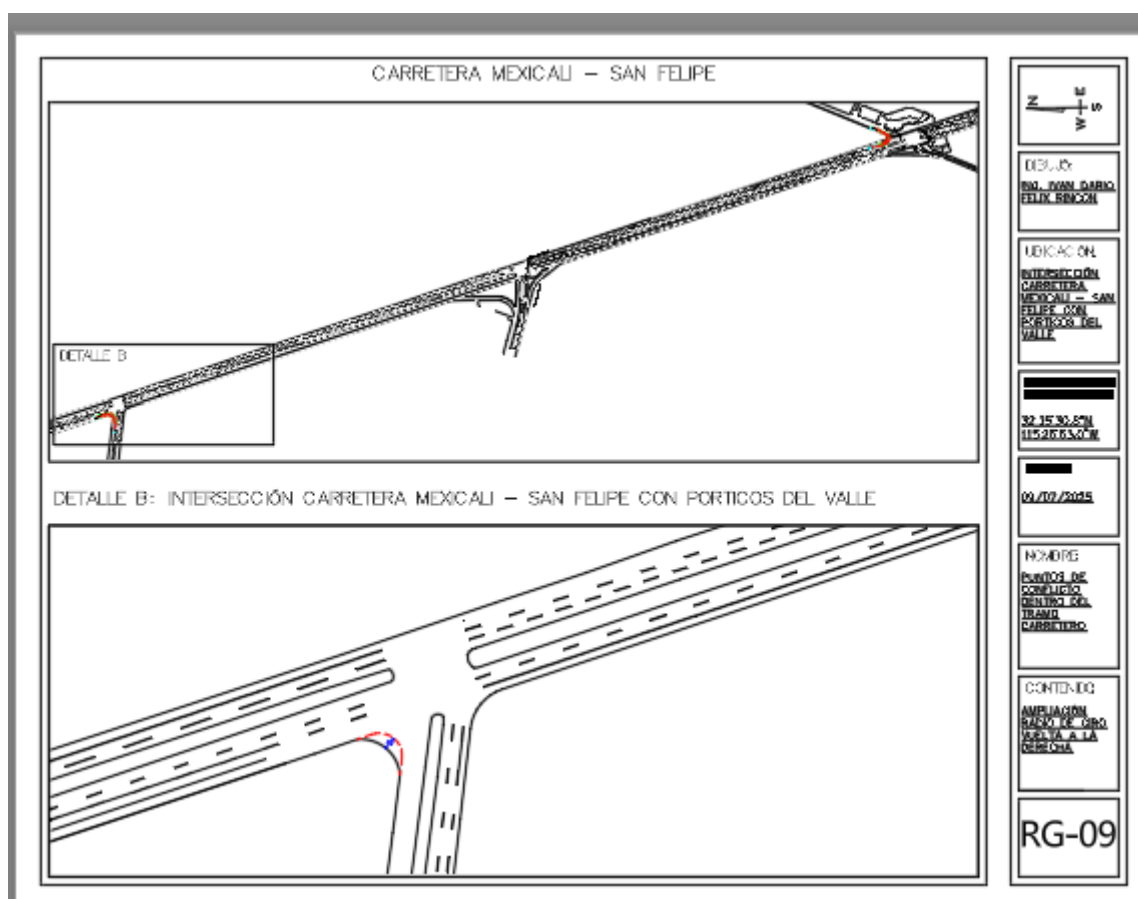
RG-06.- Transición de 3 a 2 carriles de Oeste a Norte intersección Carretera Mexicali - San Felipe y General Santiago Vidaurri. Fuente: Elaboración propia.



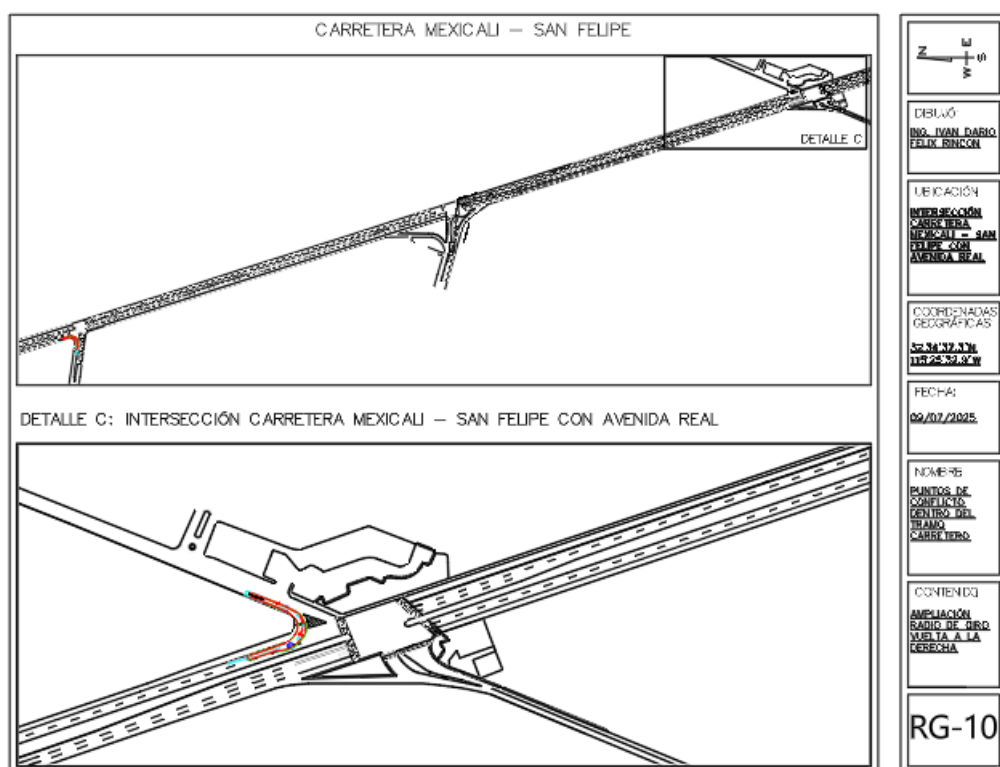
RG-07.- Ampliación de la zona de giro de Norte a Norte intersección Carretera Mexicali - San Felipe y General Santiago Vidaurri. Fuente: Elaboración propia.



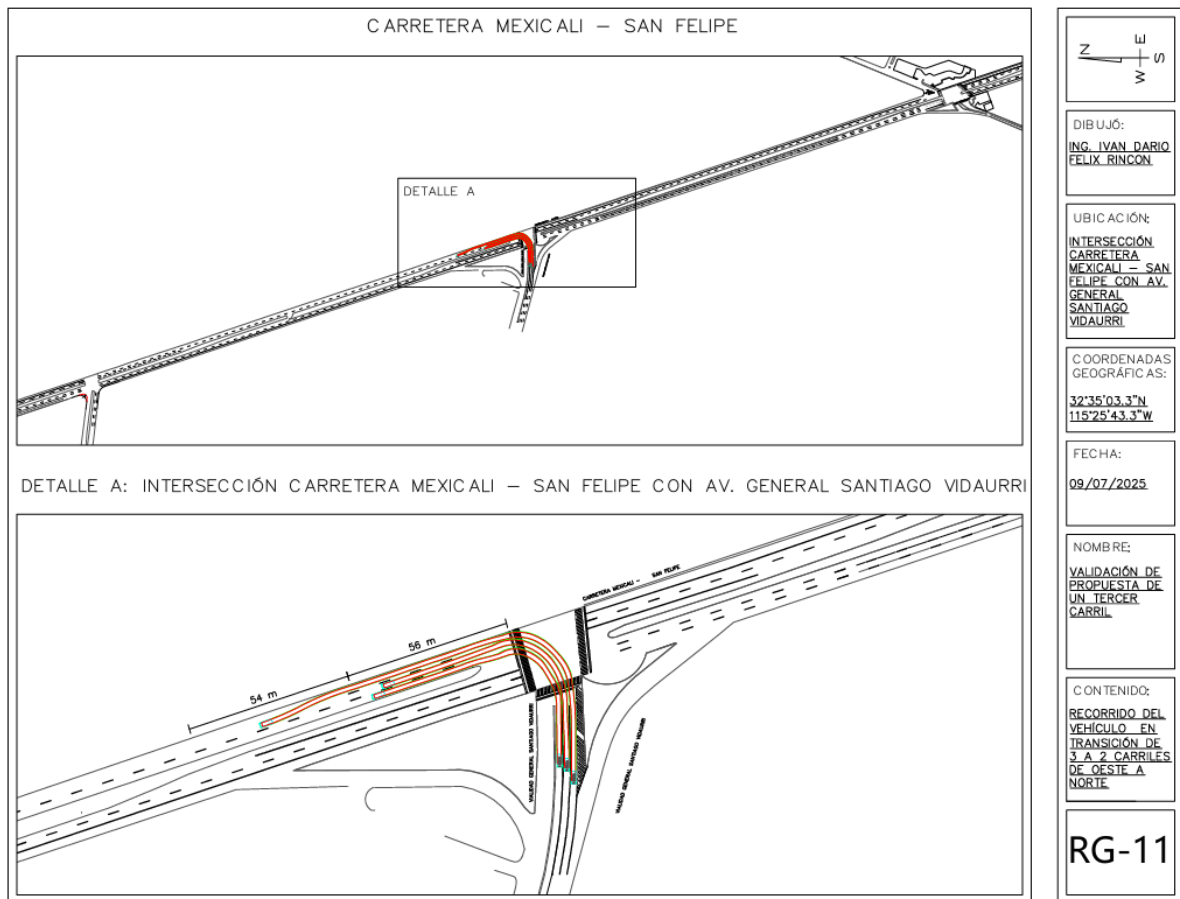
RG-08.- Ampliación de la zona de giro de Sur a Sur intersección Carretera Mexicali - San Felipe y General Santiago Vidaurri. Fuente: Elaboración propia.



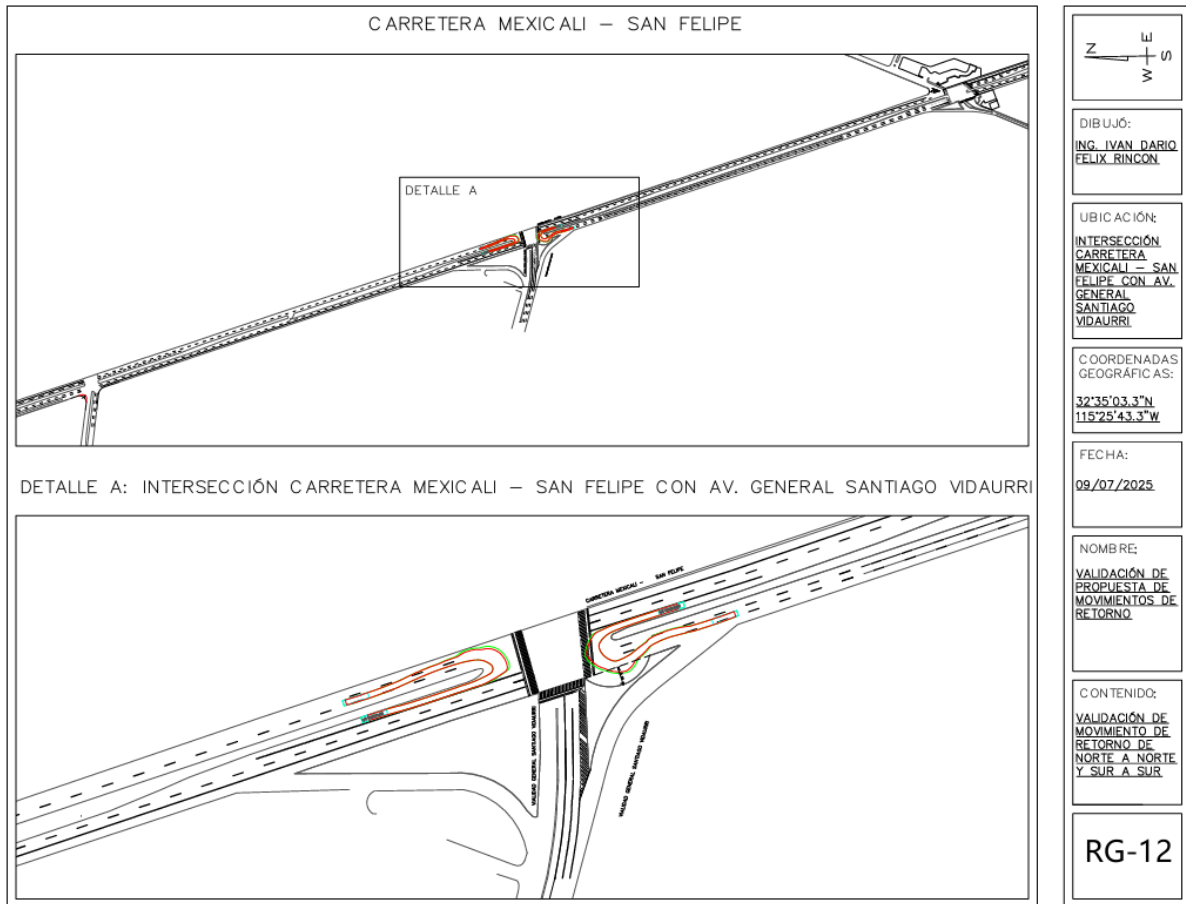
RG-09.- Ampliación de radio de giro, intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del Valle. Fuente: elaboración propia.



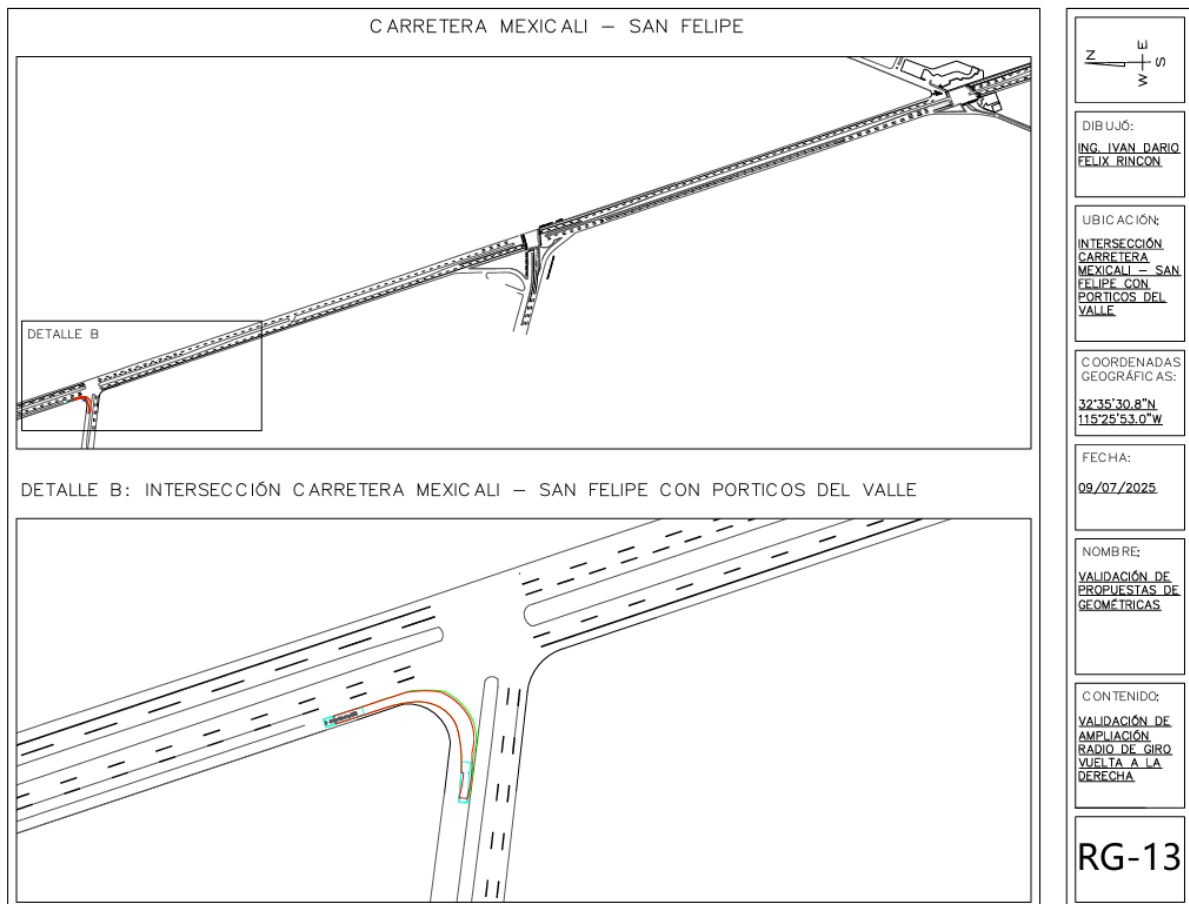
RG-10.- Ampliación de radio de giro, intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Avenida Real.
Fuente: elaboración propia.



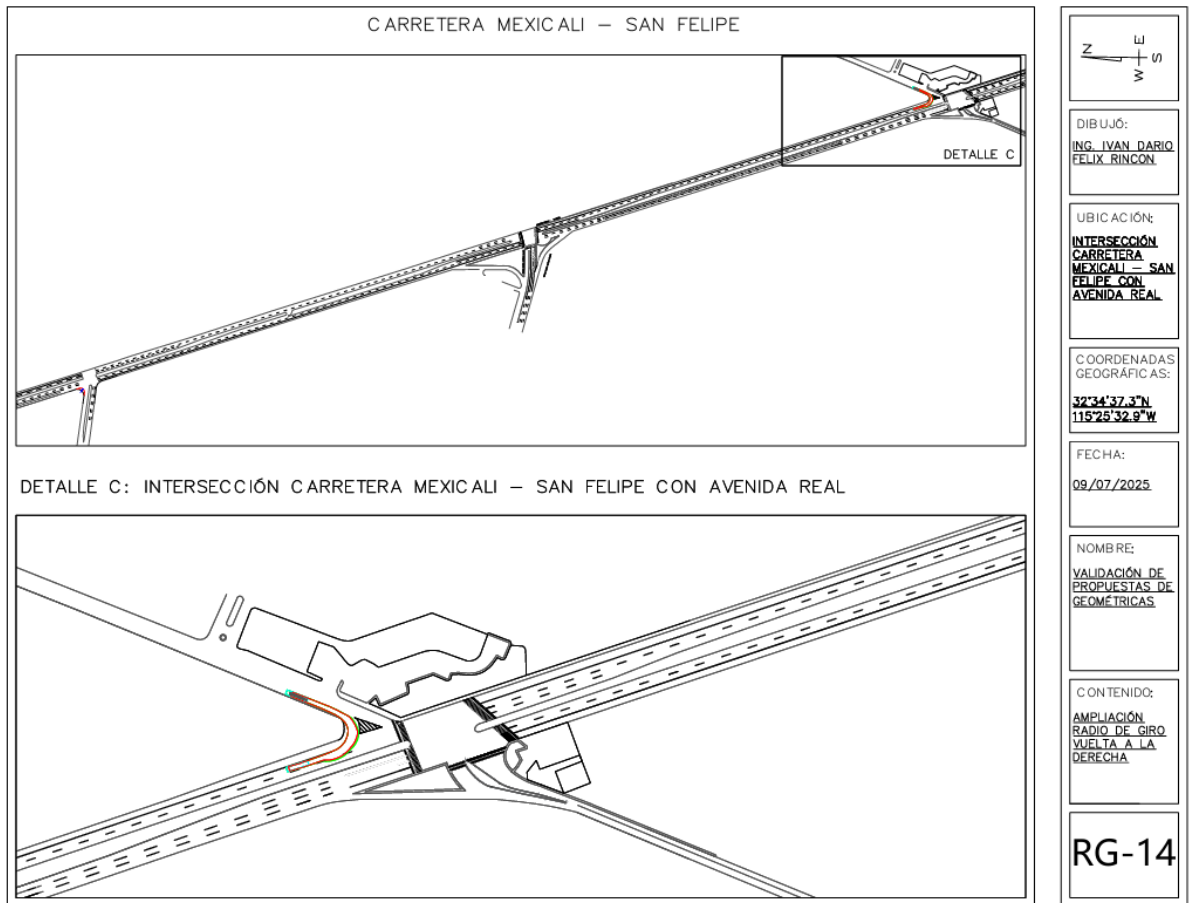
RG-11.- Validación del recorrido de vehículos de oeste a norte sobre Intersección entre Carretera Mexicali - San Felipe y General Santiago Vidaurri. Fuente: elaboración propia.



RG-12.- Validación de ampliación de la zona de giro de Norte a Norte y Sur a Sur, intersección Carretera Mexicali - San Felipe y General Santiago Vidaurri. Fuente: Elaboración propia.



RG-13.- Validación de ampliación de radio de giro, intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Pórticos del Valle. Fuente: elaboración propia.



RG-14.- Validación ampliación de radio de giro, intersección Carretera Mexicali - San Felipe con Avenida Real. Fuente: elaboración propia.