



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
CIENCIAS E INGENIERÍA

Tesis:

**Planeación estratégica de conservación de
vialidades urbanas utilizando un vehículo aéreo
no tripulado**

Tesis que presenta:

ESMERALDA ALVAREZ JIMENEZ

Para obtener el Grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS

Director(a) de Tesis:

DR. MARCO ANTONIO MONTOYA ALCARAZ

Co-Director(a) de Tesis:

DR. ALEJANDRO MUNGARAY MOCTEZUMA

Mexicali, Baja California, agosto del 2025.

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Director (a) de Tesis: _____

Dr. Marco Antonio Montoya Alcaraz

Co-director de Tesis: _____

Dr. Alejandro Mungaray Moctezuma

Aprobada por el Jurado Examinador:

1. _____

2. _____

3. _____

4. _____

Esta investigación está dedicada a mis padres y mis hermanas.

“No hay palabras para describir su amor y apoyo
Incondicional han sido la fuerza que me impulsó
a alcanzar este sueño.”

Muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco en especial a Dios y a mis padres Artemio Alvarez y Karla A. Jimenez, por ser mi mayor ejemplo de constancia, trabajo y amor incondicional. Gracias por apoyarme en cada paso de mi vida, por sus sacrificios silenciosos, y por enseñarme a no rendirme aun en los momentos más difíciles. Su apoyo ha sido la base sobre la que he construido cada uno de mis logros.

A mis hermanas, Evelin y Marlene por su compañía, sus palabras de aliento y por ser mi refugio en los días complicados. Gracias por estar siempre ahí, con su cariño inquebrantable y por compartir conmigo no solo los momentos felices, sino también los desafíos. Este logro no habría sido posible sin ustedes. Los amo profundamente.

A la secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado y su contribución en mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma de Baja California en especial a la Facultad de ingeniería Mexicali y al programa Educativo de Ingeniería Civil por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente, en un programa reconocido por su calidad internacional.

A mi director de tesis Dr. Marco Antonio Montoya Alcaraz por su apoyo incondicional en la elaboración y desarrollo de la investigación y en mi formación profesional como mentor. Con gran cariño y respeto agradezco la confianza que tuvo en mi al brindarme esta oportunidad. Y a mí co-director Dr. Alejandro Mungaray Moctezuma agradezco su apoyo en la conformación de este proyecto.

Al Ing. David García Ramírez por ayudarme en la parte técnica de esta investigación, también por prestarme equipo topográfico utilizado en esta investigación.

Agradezco a mis amigos del programa educativo de ingeniero civil que me apoyaron en este proyecto de investigación desde el inicio hasta su culminación, en especial a mis amigas Iztel y Cinthya. De igual manera, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los miembros del comité evaluador, cuyos conocimientos y experiencia fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Sus observaciones y consejos durante las presentaciones de avances semestrales con el fin de enriquecer y mejorar mi investigación.

Resumen

Esta investigación plantea una alternativa moderna para la evaluación y conservación de vialidades urbanas, mediante la integración de vehículos aéreos no tripulados (VANT) y el índice de condición del pavimento (PCI). El trabajo se desarrolló en cinco tramos de vialidades terciarias en Mexicali, una ciudad cuya infraestructura vial enfrenta un deterioro acelerado por factores climáticos severos. Se realizaron inspecciones tanto con métodos tradicionales como con apoyo de VANT, y los resultados mostraron una elevada concordancia entre ambas técnicas, con un coeficiente de correlación promedio de 0.981.

A partir de los datos obtenidos, se implementó un modelo de análisis en el software HDM-4 para proyectar estrategias de conservación técnica y económicamente viables en un horizonte de 15 años. Los tramos estudiados presentaron condiciones de pavimento que van de regular a muy mala, por lo que se establecieron acciones diferenciadas como sellado de grietas, microcarpetas, sobrecarpetas y reconstrucción parcial, según el nivel de daño y las características del tránsito.

Como resultado principal, se propone un procedimiento adaptable que permite evaluar el estado de vialidades con diferentes niveles de deterioro y cargas vehiculares, optimizando la toma de decisiones en contextos urbanos complejos. Esta metodología no sólo agiliza la recopilación de información de campo con mayor precisión y seguridad, sino que también facilita la programación técnica de intervenciones con un enfoque preventivo. El procedimiento desarrollado es replicable en otros entornos urbanos y representa un avance importante en la modernización de la gestión de infraestructura urbana.

Abstract

This research proposes a modern alternative for the assessment and preservation of urban roadways through the integration of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and the Pavement Condition Index (PCI). The study was conducted on five segments of tertiary roads in Mexicali, a city where the road infrastructure experiences accelerated deterioration due to harsh climatic conditions. Inspections were carried out using both traditional methods and UAV-assisted surveys, yielding a high level of agreement between approaches, with an average Pearson correlation coefficient of 0.981.

Based on the collected data, a simulation model was developed using the HDM-4 software to project technically and economically viable maintenance strategies over a 15-year horizon. The evaluated road sections showed pavement conditions ranging from fair to very poor, which led to the proposal of tailored interventions such as crack sealing, micro-surfacing, overlays, and partial reconstructions, according to the degree of damage and traffic characteristics.

As a key outcome, this study presents an adaptable procedure capable of evaluating roads under varying levels of deterioration and vehicular loads, thus improving decision-making processes in complex urban settings. The methodology enhances the accuracy and safety of field data collection, while enabling technically sound and preventive maintenance scheduling. The proposed approach is replicable in other urban environments and contributes significantly to the modernization of roadway infrastructure management.

Índice

1. Introducción	8
1.1 Planteamiento del problema	9
1.2 Objetivo	10
1.2.1 Objetivos específicos	10
1.3 Hipótesis	11
1.4 Justificación	11
1.5 Metodología general	12
1.6 Descripción del caso de estudio	13
2. Revisión de literatura	16
2.1 Importancia de la inspección vial como base para estrategias efectivas de conservación	16
2.2 Evaluación de la condición de pavimentos: De métodos tradicionales a técnicas modernas con aplicación de VANT.	20
2.2.1. Métodos Tradicionales para la Evaluación de la Condición de Pavimentos	20
2.2.2 Técnicas Modernas en la Evaluación de Pavimentos	25
2.3 Implementación de la planeación estratégica para optimizar la conservación de pavimentos.	27
3. Metodología	30
3.1 Caracterización del entorno vial	31
3.2 Método de confiabilidad	34
3.3 Modelo de Conservación	42
4. Resultados	52
4.1 Análisis del entorno vial	52
4.2 Análisis de confiabilidad	55
4.3 Análisis de conservación	72
5. Conclusiones	88
6. Referencias	90

1. Introducción

La infraestructura vial urbana es un elemento fundamental en el crecimiento sostenible de las ciudades, ya que garantiza la movilidad de individuos y mercancías, así como la provisión de servicios y la coherencia entre territorios. Sin embargo, en la mayoría de las ciudades mexicanas, la condición de la red de carreteras ha avanzado demasiado lejos gracias a un régimen nacional de mantenimiento que no funcionó, la falta de planificación técnica y la ausencia de instrumentos adecuados para la evaluación del daño causado. Esto se amplifica por el uso de estrategias de conservación reactivas como la acción hasta que el daño es visible y la presión de la sociedad para que parezca más bien una acción preventiva planificada bajo inspecciones basadas científicamente (Dotto Bueno et al., 2016).

La capital estatal de Baja California, Mexicali, es un ejemplo emblemático del problema. Tiene una red de carreteras de aproximadamente 40,32 km², con un 22,1 % pavimentado (Cambil-Hernández et al., 2017), por lo que presenta una falla estructural avanzada que afecta directamente el rendimiento urbano y la calidad de vida de sus habitantes (Cervera et al., 2014). Deterioro que se atribuye principalmente a factores como el mantenimiento preventivo deficiente, CVHD perpetuo, desajuste con las ciudades y carreteras, y especialmente a las duras condiciones climáticas características de la región (CONAGUA, 2024; Hernández, 2019).

Considerando el contexto anterior, la implementación de tecnologías avanzadas, como plataformas aéreas no tripuladas (UAV), surge como una solución competitiva para mejorar la operación de evaluación del pavimento. Con estas herramientas, se pueden producir ortomosaicos georreferenciados a partir de imágenes aéreas del pavimento con alta resolución de manera segura, rápida y confiable, sin interferir con el tráfico (Ortega Rengifo et al., 2024; De Luis-Ruiz et al., 2021). En particular, su combinación con técnicas establecidas como el Índice de Condición del Pavimento (PCI) permite el potencial de cuantificación de la degradación con criterios uniformes, comparabilidad entre ellos y reproducibilidad (ASTM International, 2023).

El objetivo de la presente tesis es desarrollar una metodología (i) para la evaluación de las condiciones del pavimento urbano con el uso de UAV, (ii) para comparar los resultados con el método tradicional PCI y (iii) para proponer las estrategias de conservación adecuadas

sobre la base de los datos obtenidos. Este enfoque es original, ya que no solo pretende validar la confiabilidad de la técnica UAV, sino también desarrollar un plan de conservación sobre una base técnica y con el apoyo del software HDM-4 para la simulación de escenarios de mantenimiento y estimación del desarrollo del deterioro.

El estudio abordó cinco secciones de carreteras terciarias en el municipio de Mexicali, elegidas porque son secciones de carreteras altamente deterioradas que tienen un significado funcional en las áreas residenciales. De la comparación de ambos resultados para el método convencional frente al método UAV, se mostró una buena relación estadística entre las dos metodologías, validando la precisión de la metodología propuesta. Además, se formularon cronogramas de intervención técnica basados en los daños identificados (severidades) y consideraciones de costo-efectividad, que involucraron medidas como el sellado de grietas, micro-revestimiento, superposición y reconstrucción parcial.

En términos generales, este trabajo pretende proporcionar un apoyo técnico para que las agencias municipales y estatales puedan aplicar la metodología propuesta para planificar y gestionar sus carreteras en un sistema de conservación activo, económico y replicable. El método propuesto no solo abordaría una demanda local urgente, sino que refleja una planificación vial en línea con las mejores prácticas internacionales mediante la aplicación de técnicas no destructivas y métodos de conservación predictiva (AASHTO, 2018; Administración Federal de Carreteras, 2022).

1.1 Planteamiento del problema

En México, gran parte de las ciudades enfrentan serios problemas de deterioro en su infraestructura vial, resultado de estrategias de conservación ineficientes y una fuerte tendencia hacia esquemas de mantenimiento reactivos, es decir, intervenciones que se realizan únicamente cuando las fallas ya son visibles. Este enfoque no solo limita la funcionalidad y calidad de las vialidades, sino que también compromete la seguridad y la transitabilidad vehicular. Además, el levantamiento deficiente de datos sobre el estado de las vías conduce a decisiones erróneas en las acciones de mantenimiento, lo que incrementa los costos en un contexto de recursos financieros limitados (Dotto Bueno et al., 2016).

El caso del municipio de Mexicali ejemplifica esta problemática. Con una superficie total de vialidades de 40.32 km², de las cuales el 77.9% cuenta con algún tipo de pavimentación

principalmente pavimento flexible, aún persiste un 22.1% sin pavimentar (Cervera et al., 2014). A esto se suma el hecho de que, según datos del IMIP, más del 51% de las vialidades primarias y secundarias se encuentran en condiciones de regulares a muy malas, y aproximadamente el 60% de las vialidades terciarias presentan un deterioro significativo.

Este escenario se agrava por el modelo de financiamiento de la infraestructura vial en el país, basado en presupuestos anuales y decisiones sujetas a periodos administrativos gubernamentales, lo que impide una planificación a largo plazo y sostenida. En consecuencia, se vuelve fundamental optimizar el uso de los recursos disponibles mediante herramientas que permitan una evaluación más precisa y ágil del estado del pavimento.

Ante esta problemática, el objetivo de esta investigación es desarrollar un procedimiento que permita obtener, analizar y procesar datos sobre la condición de las vialidades urbanas mediante el uso de un vehículo aéreo no tripulado (VANT). Con ello se busca fortalecer la toma de decisiones en la planeación de estrategias de conservación vial, mejorando la eficiencia del mantenimiento y priorizando intervenciones con base en criterios técnicos y objetivos.

1.2 Objetivo

Desarrollar un procedimiento que permita la obtención, análisis y procesamiento de datos de condición de vialidades, mediante el uso de un VANT con el fin de mejorar la selección de estrategias de conservación en vialidades urbanas.

1.2.1 Objetivos específicos

- Evaluar las áreas afectadas según el tipo de falla en función de su densidad y severidad, empleado el método PCI.
- Determinar el nivel de confiabilidad de los datos obtenidos por el método PCI usando VANT con respecto a los obtenidos mediante el método PCI convencional.
- Plantear estrategias de conservación que aseguren el servicio y funcionalidad del pavimento.

1.3 Hipótesis

El uso del VANT permite optimizar la evaluación superficial de un pavimento, ya que permite generar insumos para mejorar la selección de estrategias de conservación y mantenimiento de vialidades urbanas.

1.4 Justificación

La evaluación del estado del pavimento es un elemento crítico en el proceso de toma de decisiones para el mantenimiento y rehabilitación de carreteras. Una intervención adecuada depende en gran medida de un diagnóstico correcto del estado superficial, estructural y funcional del pavimento. El enfoque internacional validado del Índice de Condición del Pavimento (PCI, por sus siglas en inglés) permite cuantificar las condiciones mediante evaluaciones visuales y clasificación de deterioros. Su aplicación razonada permite establecer prioridades, proyectar estrategias de conservación y racionalizar el uso de recursos públicos (ASTM D6433-23; Dotto Bueno et al., 2016).

Sin embargo, la inspección regular es muy limitada: lenta, costosa, subjetiva, debe ser realizada por personal capacitado y, sobre todo, es insegura en carreteras de alto tráfico. Las inspecciones in situ también requieren el cierre parcial de la carretera, lo que afecta el flujo del tráfico y causa incomodidad a los usuarios (Cubas, 2021; Atencio et al., 2022). Estas restricciones impiden una evaluación sistemática y oportuna de vastas redes urbanas, particularmente en contextos de bajo presupuesto, como México.

En este contexto, los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) proporcionan una tecnología útil para capturar imágenes de alta resolución y producir ortomosaicos georreferenciados. Estas herramientas permiten reducir considerablemente el tiempo de levantamiento y procesamiento de información a través de una inspección más rápida, segura, rentable y replicable (Ortega Rengifo et al., 2024; Silva et al., 2023). Además, los datos pueden reutilizarse varias veces sin necesidad de realizar nuevos vuelos, mejorando la trazabilidad y precisión del análisis técnico (Pucha & Zárate, 2020).

Estudios recientes demuestran que el uso de drones para inspección, integrados con herramientas de fotogrametría y análisis digital, no solo simula los resultados de las inspecciones visuales tradicionales, sino que también supera en precisión debido a la

eliminación de errores humanos y la capacidad de procesar grandes cantidades de segmentos de carreteras observadas (Ortega Rengifo et al., 2024; Sourav et al., 2022).

Así, este estudio presenta el desarrollo de una metodología basada en UAV para evaluar las condiciones superficiales de pavimentos urbanos de acuerdo con el PCI, con el objetivo de mejorar la eficiencia en la planificación y ejecución de estrategias de conservación de vialidades. Esta propuesta no solo satisface una necesidad técnica inmediata, sino que también ofrece una oportunidad tangible para innovar con una gestión más inteligente de la infraestructura en entornos urbanos como Mexicali.

1.5 Metodología general

Con base en diversos estudios recientes sobre la evaluación de pavimentos mediante tecnologías emergentes, se propone un modelo metodológico integral orientado a mejorar la planeación de intervenciones de mantenimiento y conservación vial. Este modelo permite sistematizar la obtención, análisis, procesamiento y actualización de datos sobre la condición superficial de las vialidades urbanas, integrando tanto métodos tradicionales de inspección como herramientas modernas basadas en vehículos aéreos no tripulados (VANT).

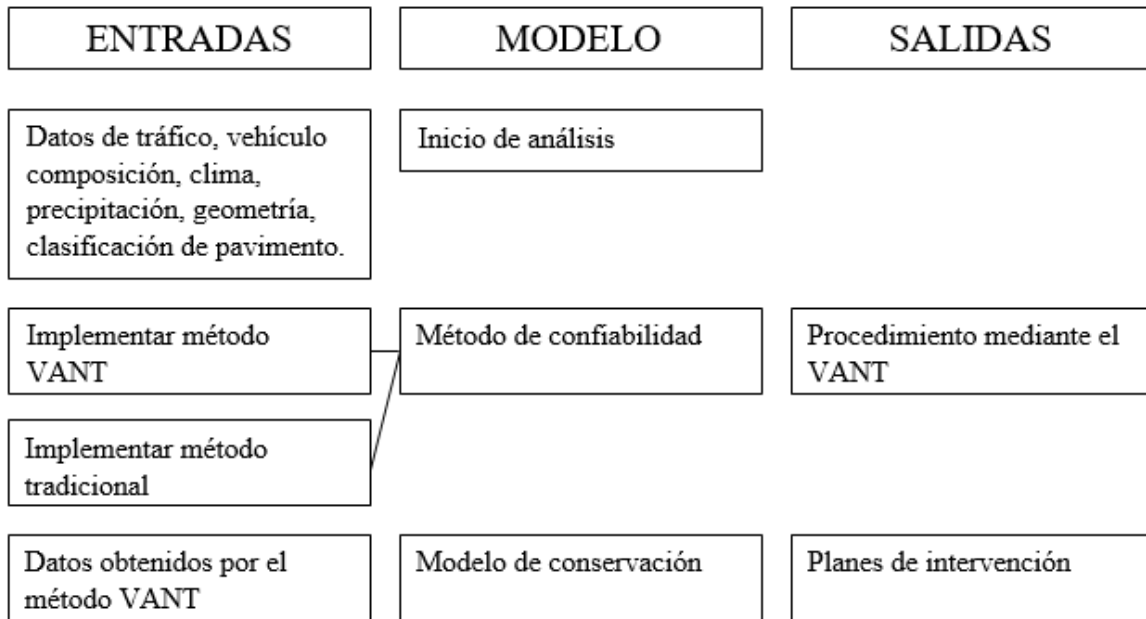
La propuesta metodológica parte de la comparación entre dos fuentes de información: los datos recolectados mediante inspección tradicional (in situ) y aquellos generados a partir de vuelos con VANT. A estos se suman los datos técnicos del tramo vial bajo análisis. La integración de estas fuentes permite alimentar dos componentes clave del modelo:

El modelo de confiabilidad, que compara la precisión y eficiencia de los métodos utilizados, y que permite definir un procedimiento VANT estandarizado para futuras inspecciones.

El modelo de conservación, que utiliza los datos del tramo para generar un plan de intervención técnicamente justificado y alineado con las condiciones reales del pavimento.

La Figura 1 ilustra el esquema general del modelo propuesto, el cual vincula los datos de entrada, los procesos de modelado y los productos finales que apoyan la toma de decisiones en la gestión vial.

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología para la planeación de estrategias de conservación de vialidades.

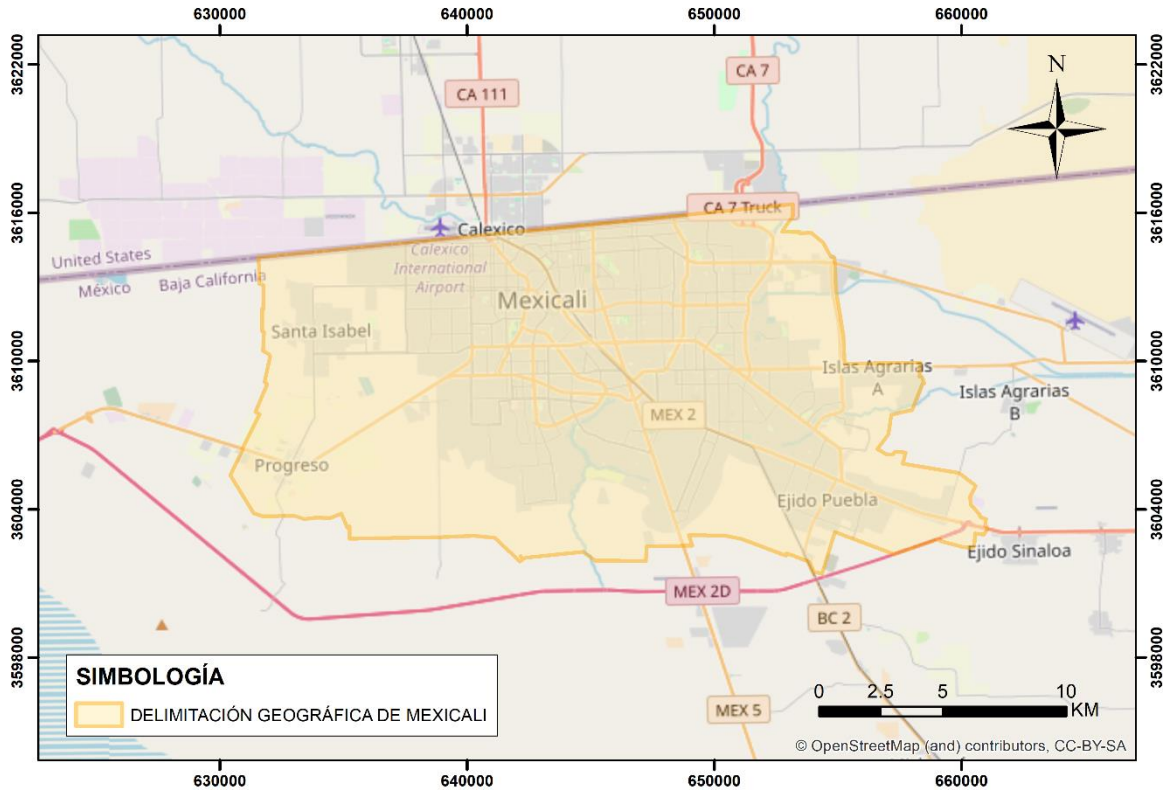


Fuente: Elaboración propia.

1.6 Descripción del caso de estudio

Mexicali es la capital del estado de Baja California, localizada al noroeste de México, en la región fronteriza con Estados Unidos. Se ubica entre las coordenadas 30° 51' y 32° 44' de latitud norte y las coordenadas 114° 43' y 115° 41' de longitud oeste, colindando al norte con el estado de California (E.U.A.), al noreste con los estados de Arizona (E.U.A.) y Sonora; al este con el Mar de Cortés; al sur con el municipio de San Felipe y al oeste con los municipios de Tecate y Ensenada, Baja California. Su posición estratégica la convierte en un nodo clave para el comercio internacional, la industria maquiladora y la movilidad transfronteriza.

Figura 2. Delimitación de la ciudad de Mexicali.



Fuente: Elaboración propia.

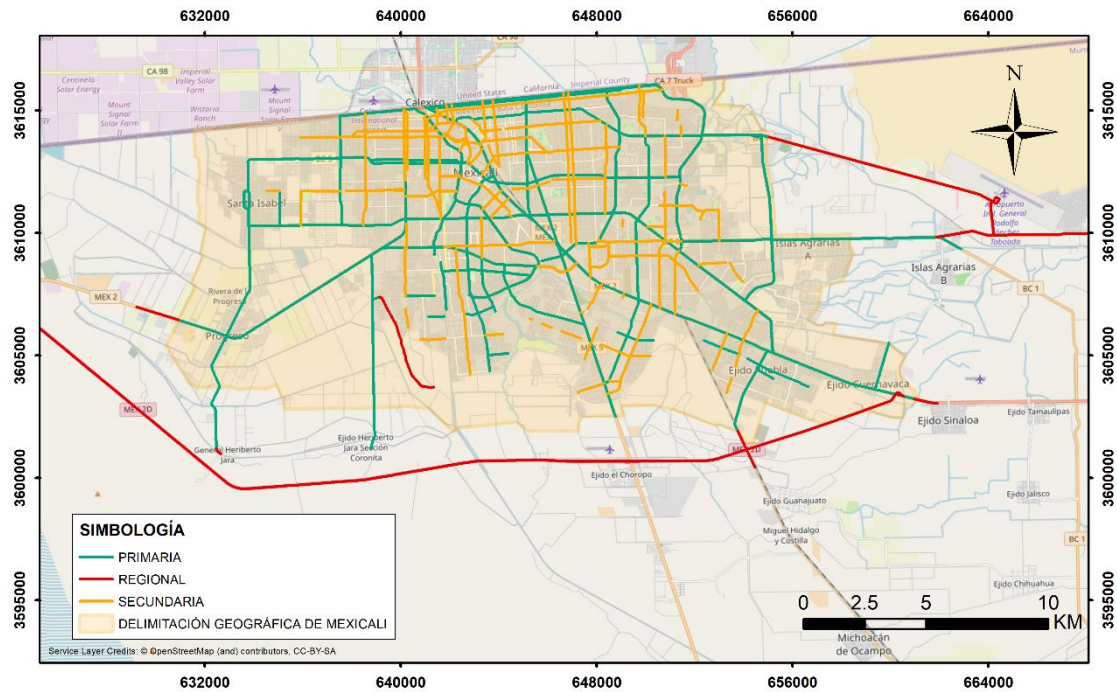
El clima de Mexicali se clasifica como desértico cálido (BWh en la clasificación de Köppen), caracterizado por temperaturas extremas que durante el verano pueden superar los 45 °C, acompañadas de una escasa precipitación anual, generalmente concentrada en cortos periodos de lluvias torrenciales (CONAGUA, 2021). Estas condiciones generan impactos negativos directos sobre la infraestructura vial, acelerando el deterioro de los materiales, especialmente del pavimento flexible, el más común en la ciudad.

Con una población de 1,049,792 habitantes según el Censo 2020 (INEGI, 2020), Mexicali concentra la mayor parte de la población estatal y alberga una creciente demanda de movilidad urbana y logística. Esta situación ha implicado una expansión sostenida de su red vial y un aumento en el parque vehicular.

En cuanto a su infraestructura, Mexicali cuenta con una superficie total de vialidades estimada en 40.32 km², de las cuales 31.41 km² (equivalente al 77.9%) se encuentran

pavimentadas, mientras que el 22.1% restante corresponde a vialidades sin recubrimiento (Cervera et al., 2014).

Figura 3. Red de vialidades en Mexicali.



Fuente: Elaboración propia

A pesar de los esfuerzos de modernización y conservación vial, los diagnósticos más recientes indican que alrededor del 35% de las vialidades presentan algún tipo de deterioro físico significativo, ya sea por grietas, deformaciones, baches u otros tipos de falla (Ayuntamiento de Mexicali, 2020). Este deterioro se atribuye a factores como:

- La falta de mantenimiento preventivo oportuno.
- El tránsito constante de vehículos pesados.
- La acumulación de residuos sólidos y obstrucción de drenajes pluviales.
- El impacto climático y la expansión urbana no planificada (IMIP, 2022).

Un indicador clave del estado actual del sistema vial es la tasa de motorización. En 2020, Mexicali registró un total de 579,527 vehículos en circulación, lo que representa una tasa aproximada de 552 vehículos por cada 1,000 habitantes (INEGI, 2021). Indica una fuerte dependencia de los vehículos personales para la movilidad, lo que ejerce mucha presión sobre las carreteras, particularmente en las áreas urbanas y con mucho tráfico.

Un escenario que resalta la gran necesidad de establecer mejores instrumentos para el control, valoración y priorización a fin de realizar las acciones de mantenimiento vial de una manera más eficiente, agregando tecnologías que permitan responder a las condiciones locales y al contenido patrimonial del presupuesto institucional del municipio.

2. Revisión de literatura

2.1 Importancia de la inspección vial como base para estrategias efectivas de conservación.

La infraestructura de carreteras es un componente esencial para el desarrollo de economías y sociedades, especialmente en áreas donde hay condiciones ambientales y climáticas significativas, como en Baja California. Los pavimentos flexibles están diseñados y contruidos de manera que están expuestos a cargas dinámicas y condiciones ambientales, y el monitoreo de dichos pavimentos flexibles es altamente esencial para evaluar la funcionalidad y durabilidad de tales estructuras.

Dentro de este marco, la inspección de carreteras es entonces el primer elemento del proceso de conservación, ya que efectivamente permite la detección a tiempo de la degradación del pavimento, y las nociones de deterioro permiten seleccionar los diseños de intervención de mantenimiento en el mejor momento y los fondos de conservación. La combinación de enfoques tradicionales (por ejemplo, PCI) con nuevas tecnologías, incluyendo UAV, incrementa la precisión de la evaluación y mejora el proceso de toma de decisiones (Smith, Johnson, & Thompson, 2020).

El monitoreo regular y sistemático de los pavimentos flexibles es necesario para detectar la aparición de síntomas de daño (grietas, deformaciones o pérdida de superficies) lo más pronto posible. El uso del índice PCI permite asignar un valor numérico a la condición del pavimento, el cual sirve para clasificar secciones con necesidades urgentes en contraposición

a secciones que pueden perdurar hasta alguna intervención programada. Las inspecciones más tradicionales y prácticas, apoyadas por métodos de procesamiento de imágenes, aún son capaces de capturar grietas o defectos pequeños, cuando están en una etapa temprana, con el fin de prevenir en el futuro fallas estructurales mayores (Smith, Johnson, & Thompson, 2020).

Mediante la detección temprana, se evitan las intervenciones de emergencia que implican sustancialmente largos tiempos de ejecución y altos costos, y, como consecuencia, pueden diseñarse estrategias de mantenimiento prematuro, preventivo y predictivo. García y Pérez (2021) afirmaron que los datos oportunos y confiables reducen sustancialmente el desgaste de la infraestructura vial, aumentando su vida útil. Mediante el uso de análisis estadísticos y modelado predictivo, basados en los datos históricos, se pueden establecer tendencias y estimar la futura evolución del desgaste, lo cual tiene otras ventajas importantes para las consideraciones de planificación a largo plazo.

El Estado de Baja California tiene condiciones ambientales particulares que tienen un impacto directo en el rendimiento y durabilidad de los pavimentos flexibles. Las intensas fluctuaciones de temperatura, la radiación solar y el efecto de la proximidad al mar (con potencial daño corrosivo y salino) son algunas de las razones que contribuyen al fallo prematuro de los pavimentos. Según Hernández (2019), un punto crítico en esta área es realizar inspecciones periódicas para evitar el inicio de la fatiga y el desgaste, ya que tal degradación, si no se atiende, conducirá a fallas estructurales severas. El monitoreo constante en condiciones tan adversas permite que los esfuerzos de conservación se adapten a lo que realmente está ocurriendo en el campo. Los sistemas automatizados con UAV permiten obtener datos en condiciones adversas, permitiendo una estimación precisa en etapas críticas. Estos estudios locales contribuyen a la evidencia empírica de que existe una necesidad de implementar métodos especializados en la administración de carreteras para Baja California.

Los recursos financieros y operativos disponibles para los municipios (particularmente en favor de áreas con una alta exposición a un deterioro acelerado) deben ser racionalizados. Se puede lograr una distribución más efectiva de los recursos para el mantenimiento vial utilizando datos reales de inspecciones sistemáticas. López y Martínez (2020) anota la priorización de intervenciones basadas en el riesgo y la condición general del pavimento,

donde la inversión en reparaciones de emergencia se minimiza mientras se concentran los esfuerzos en las zonas críticas.

Además, la capacidad de agregar datos en GIS a través de herramientas y la capacidad de interactuar con datos de condición del pavimento puede impulsar la creación de planos de conservación integrados. Lo anterior es indispensable para municipios como los de Baja California, ya que la penetración de carreteras en el estado es amplia, cubriendo incluso regiones desoladas. La cantidad y variedad de la red vial impulsan hacia soluciones que se adaptan a las condiciones que se exigen a corto plazo y que se extrapolen a medio y largo plazo (Ruíz & Sánchez, 2021).

Los datos obtenidos de las inspecciones viales no solo son de interés técnico, sino que también desempeñan un papel central en la elaboración de políticas públicas. Más aún, respecto a Baja California, donde la infraestructura vial puede impactar la conectividad y el desarrollo regional, contar con un diagnóstico preciso y actualizado permite a las autoridades formular políticas de mantenimiento sostenible de acuerdo a las necesidades específicas del territorio.

Según Ruíz y Sánchez (2021), a partir de la centralización de la recolección de datos de inspecciones en una plataforma de análisis integrada, se favorece la definición de estrategias preventivas y correctivas, maximizando las inversiones y permitiendo una rápida respuesta a situaciones de deterioro crítico. La participación pública en la transparencia de las condiciones viales, el aseguramiento de la calidad y el monitoreo del rendimiento pueden llevar al desarrollo de indicadores de monitoreo que puedan incorporarse a la evaluación de la gestión y la rendición de cuentas a los ciudadanos.

La inspección periódica del pavimento flexible es una medicina preventiva a través de la cual el médico oficial puede detectar nuevas lesiones antes de que se desarrollen en enfermedades sistémicas. La alerta temprana significa intervenciones de menor costo y evitar grandes intervenciones y extender la vida útil del activo. Este modo de intervención no solo mejora la seguridad vial, sino que también minimiza el costo económico para la respuesta de emergencia, lo cual es de suma importancia en entornos con recursos limitados (Smith, Johnson, & Thompson, 2020).

Los modelos de predicción, que combinan datos históricos con datos actuales mediante la inspección visual, permiten estimar el ciclo de vida del pavimento. Estos modelos pueden alimentarse con información procedente de inspecciones manuales y de vehículos aéreos no tripulados (UAV), lo que permite la creación de escenarios de daño y optimiza el calendario de las actividades de intervención. La predictiva conduce a la planificación preventiva que maximiza el presupuesto y minimiza la perturbación del tráfico de los servicios viales.

Especialmente, una de las contribuciones importantes de la inspección de carreteras es que puede otorgar la priorización de intervenciones de manera confiable. La articulación de datos en un sistema integrado y el uso de indicadores como el PCI brinda la oportunidad de identificar localidades que exigen acción inmediata, de modo que la acción se asigna de la forma más inteligente entre las organizaciones. García y Pérez (2021) enfatizan que, además de una forma más eficiente de gestionar las carreteras, este método también evita gastos innecesarios en secciones que ya cumplen las condiciones requeridas.

El uso de herramientas geoespaciales como GIS en la inspección de activos añade otro grado de precisión en la identificación de ubicaciones de deterioro. Esta visualización de datos permite detectar patrones y agrupaciones de fallas más altas, clave para mapear rutas de intervención y la introducción de un calendario de mantenimiento que minimice las interrupciones del servicio y que tenga el máximo efecto beneficioso sobre la infraestructura.

En resumen, la evaluación del estado de las carreteras es una parte importante del desarrollo de marcos de conservación sólidos para pavimentos flexibles. El reconocimiento temprano del deterioro mediante el uso de enfoques estandarizados y el uso de nuevas tecnologías, como los UAV, contribuye a hacer la evaluación de la condición de las infraestructuras atractivas y confiables. Cuando se incorporan modelos predictivos y sistemas de gestión del mantenimiento, esta información puede utilizarse para priorizar intervenciones, asignar recursos de manera óptima, maximizar la eficiencia de la inversión y prolongar la vida útil del pavimento.

Para Baja California y sus condiciones, es necesario que se desarrollen y apliquen nuevas metodologías de inspección y recolección que nos permitan cumplir con estos nuevos requisitos de orden ambiental y presupuestario. Las experiencias locales apuntan a la necesidad de adaptar los procedimientos de evaluación en función del clima, la exposición a

la agresividad y la topografía. La aplicación de un sistema integrado de inspección, de inspecciones tradicionales y basado en tecnología, contribuye al diagnóstico del estado de la carretera en el campo, así como a la toma de decisiones en políticas públicas de mantenimiento vial y en la gestión operativa (Ruiz y Sánchez, 2021).

Desde un punto de vista prospectivo, el futuro podría ver una mejora adicional en la adopción de tecnologías de monitoreo, con un empleo más extenso de dispositivos de inteligencia artificial y procesamiento en tiempo real, permitiendo la evolución hacia una gestión vial predictiva y proactiva. Este enfoque se materializa en beneficios inmediatos de seguridad, económicos y de calidad del servicio de infraestructura vial, que apoyan un paradigma de conservación inspirado en la innovación y la práctica basada en evidencia.

2.2 Evaluación de la condición de pavimentos: De métodos tradicionales a técnicas modernas con aplicación de VANT.

Los estudios y la conservación relacionados con el pavimento son esenciales desde el punto de vista de la seguridad, la funcionalidad y la larga vida útil de los sistemas de pavimentos de carreteras. La evaluación de la condición de los pavimentos se basa en encuestas manuales y una serie de procedimientos estandarizados que proporcionan medidas del deterioro y una calificación del estado de la superficie.

No obstante, el progreso tecnológico está proporcionando mejoras sustanciales para nuevas herramientas, incluyendo técnicas de procesamiento de imágenes digitales, así como modelado predictivo y el despliegue de VANT (vehículos aéreos no tripulados), en forma de herramientas complementarias para la evaluación de pavimentos. En esta sección, discutimos en detalle las técnicas convencionales utilizadas, su ejecución práctica y limitaciones. Están relacionados con tecnologías innovadoras que muestran el impacto de los VANT en la vigilancia y el mantenimiento de rutina.

2.2.1. Métodos Tradicionales para la Evaluación de la Condición de Pavimentos.

Las técnicas tradicionales forman la base de la ingeniería de carreteras y han permitido determinar factores cuantitativos y cualitativos para la toma de decisiones en el mantenimiento. Entre los métodos más conocidos se encuentran el IRI (International

Roughness Index), el RD (Rut Depth), el SFC (Skid Friction Coeficient) y el PCI (Pavement Condition Index).

International Roughness Index (IRI)

Según Badilla (2009), el IRI es un índice estándar para la rugosidad de una carretera y es un indicador clave del estado de la superficie de la carretera en cuanto a comodidad y rendimiento operativo. Clásicamente, es la reacción vertical simulada de un vehículo en particular (típicamente un modelo de un cuarto de automóvil) al cruzar el perfil longitudinal. Se especifica en metros por kilómetro (m/km) o en pulgadas por milla y está relacionado con la percepción del usuario.

El procedimiento de medición para los autores Smith, Johnson y Thompson (2020) consistieron en:

- El perfil longitudinal de la carretera se mide mediante un acelerómetro y un sistema GPS en un vehículo.
- Se aplican algoritmos al perfil que imitan el comportamiento de un sistema de suspensión estándar.
- Los datos se combinan para calcular el IRI, que está relacionado con la experiencia de vibración y comodidad del usuario.

Ventajas y Limitaciones de acuerdo a los autores Badilla (2009) y Smith et al., (2020):

- Ventajas: Proporciona una medida objetiva de la rugosidad; es ampliamente aceptado a nivel internacional.
- Limitaciones: La precisión depende de la calibración y condiciones de ensayo (por ejemplo, velocidad constante y condiciones ambientales); se centra en la evaluación superficial.

Índice de Profundidad de Roderas (Rut Depth, RD)

La Profundidad de rodera (o "Huella", PH) es la pérdida de textura en la superficie del camino en forma de depresiones o ranuras, que está relacionada con el flujo del tráfico. Este índice es necesario para la evaluación e identificación de problemas de drenaje y seguridad, ya que

las huellas cóncavas pueden disminuir el agarre y aumentar el riesgo de accidentes (García y Pérez, 2021).

Los valores están en mm. Sin embargo, para rutas de peaje, pueden aplicarse valores críticos de 8-10 mm (valores que difieren de un país a otro, según las regulaciones locales y la investigación) (Walker, Entine y Kummer, 2002).

Proceso de Evaluación:

- Medición manual: Se utilizan dispositivos como calibradores o mediciones ópticas/láser realizadas por vehículos de inspección para medir la profundidad de las ranuras.
- Registro y trazado: Se utiliza para preparar mapas que identificarán sitios riesgosos y metodologías de programación para intervenciones.

Ventajas y Limitaciones:

Ventajas: Permite determinar deformaciones que afectan la capacidad de drenaje y la seguridad del tráfico.

Limitaciones: Las medidas manuales son propensas a errores de juicio humano e imprecisiones; las circunstancias ambientales pueden afectar la precisión (Bogus, Shrier, & Tenenbaum, 2010).

Nivel de Servicio

El Nivel de Servicio (LOS, por sus siglas en inglés) es un índice compuesto basado en el IRI y otros parámetros técnicos del pavimento combinados con valores de confort y tiempos de viaje estimados. Es una medida de la 'calidad' general de la infraestructura vial, que tiene en cuenta tanto el desempeño técnico como el nivel de servicio a los usuarios.

El LOS se presenta como A, B o C, así como indicadores numéricos bajo los niveles determinados por las autoridades. Las definiciones pueden cambiar con el tiempo, pero A-B significa un alto nivel de servicio y C-F indica que la carretera está empeorando progresivamente (MoDOT, 2017).

Proceso de Evaluación:

- Medidas Objetivas y Subjetivas: El confort, el tiempo de viaje y el estado del pavimento son medidos y combinados con encuestas.

Ventajas y Limitaciones:

- Ventajas: Fomenta un análisis holístico, combinando lo técnico con la percepción del usuario; ayuda a priorizar las inversiones de mantenimiento.
- Limitaciones: La combinación de análisis cualitativos y cuantitativos puede añadir cierta incertidumbre; se necesitan estudios de campo y encuestas que pueden ser costosos y difíciles de estandarizar para llevar a la práctica.

Resistencia a la Fricción

Autores como Freitas, Freitas, & Braga, (2014). Este valor se utiliza para determinar si la superficie resistirá el deslizamiento entre los neumáticos y el pavimento. Esto es esencial para el rendimiento de frenado, especialmente en carreteras de alta velocidad o en condiciones climáticas adversas. El coeficiente de fricción se da en números numéricos entre 0 y 1; los valores altos indican un excelente rendimiento de adhesión, mientras que los valores inferiores a 0,35–0,40 son preocupantes para la seguridad vial (Freitas et al., 2014).

Proceso de Evaluación:

- Pruebas In Situ: Se realizan pruebas con un equipo portátil (por ejemplo, remolque deslizante) para determinar el coeficiente de fricción en la realidad.
- Ensayos Complementarios: Los ensayos también pueden realizarse en el laboratorio con muestras de pavimento para medir la fricción (deslizamiento de rueda bloqueada durante 5 segundos o deslizamiento fijo de rueda durante 1 segundo) en un entorno controlado.

Ventajas y Limitaciones:

- Ventajas: Es un indicador directo de la seguridad vial, el valor fundamental para la evaluación del rendimiento de frenado.
- Limitaciones: Este método puede verse influenciado por las condiciones ambientales (humedad, contaminación) y el uso de equipos ajustados para proporcionar mediciones similares (Freitas et al., 2014).

Pavement Condition Index (PCI)

El Pavement Condition Index (PCI) es un índice estandarizado para cuantificar la condición general del pavimento mediante la evaluación de múltiples tipos de deterioro. Se expresa en una escala de 0 a 100, donde 100 indica un pavimento en condiciones óptimas y 0 uno en estado crítico. El PCI integra la severidad y extensión de defectos como fisuras, baches, desprendimientos, deformaciones y otros, permitiendo una visión consolidada del estado del pavimento (ASTM, 2012; Smith, Johnson, & Thompson, 2020).

Proceso de Medición:

- Selección de Unidades de Muestreo (UM): Se divide la red vial en unidades homogéneas (longitud fija o basada en condiciones) para inspeccionar (ASTM, 2012).
- Inspección Visual Sistemática: En cada UM, se recorren y documentan todos los deterioros utilizando un catálogo de fallas con descripciones y códigos estandarizados (Walker, Entine, & Kummer, 2002).
- Cuantificación de Defectos: Cada tipo de daño se mide en términos de área o longitud y se clasifica según severidad (Baja, Media, Alta).
- Asignación de Deduct Values (DV): A cada manifestación de deterioro se le asigna un valor de penalización (DV) dependiendo de su tipo, severidad y extensión (ASTM, 2012).
- Cálculo del PCI: Se suman todos los DVs de una UM; esa suma se resta de 100 para obtener el PCI de la UM (American Society for Testing and Materials, 2012).
- Reporte y Mapas de Condición: Se elaboran tablas y mapas que muestran el PCI por tramos, facilitando la priorización de intervenciones.

Ventajas:

- Proporciona un indicador único y fácilmente interpretable de la condición del pavimento.
- Está ampliamente aceptado y estandarizado, facilitando la comparación entre redes viales (ASTM, 2012).
- Permite priorizar intervenciones y optimizar recursos de mantenimiento.

Limitaciones:

- Depende de la subjetividad del inspector en la identificación y clasificación de los defectos, aunque la capacitación y los catálogos estandarizados reducen esta variabilidad (Bianchini, Bandini, & Smith, 2010).
- Es intensivo en mano de obra y tiempo, especialmente en redes extensas.
- No captura directamente la condición estructural interna del pavimento, centrándose principalmente en la superficie.

2.2.2 Técnicas Modernas en la Evaluación de Pavimentos

La rápida evolución de la informática y los sistemas de percepción ha permitido desarrollar métodos que superan las restricciones de cobertura, precisión y tiempo propias de los enfoques convencionales.

Procesamiento Digital de Imágenes y Reconocimiento Automático

El empleo de cámaras de alta resolución (RGB y multiespectrales) junto con algoritmos de visión por computador permite automatizar la detección de defectos. Tras un preprocesamiento que corrige iluminación y elimina ruido, redes neuronales profundas como CrackNet, ARD-UNet o variantes de YOLOv5 identifican fisuras, baches y desprendimientos con precisión superior al 92 % (Huang & Kong, 2022). Este sistema genera “mapas de calor” de deterioro en aproximadamente un 30 % del tiempo que tomaría una inspección manual, reduciendo la variabilidad interinspector (Freitas, Freitas, & Braga, 2014).

Modelos Predictivos y Simulación

Los modelos predictivos integran datos históricos de tráfico, mantenimiento y clima con observaciones recientes para estimar la vida remanente y la probabilidad de falla. Aplicando métodos estadísticos (regresión logística, análisis de supervivencia) y machine learning (bosques aleatorios, redes neuronales recurrentes), se construyen simulaciones que anticipan escenarios de deterioro (Madanat, Karlaftis, & McCarthy, 1997). Un estudio en carreteras de Indiana demostró un aumento del 18 % en la precisión de predicción al incluir variables meteorológicas frente a modelos basados solo en IRI (INLTAP, 2016; López & Martínez,

2020). Estas simulaciones facilitan la programación “what-if” de intervenciones y la optimización de recursos a mediano y largo plazo (Bianchini, 2014).

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los SIG reúnen datos georreferenciados de condición (PCI, IRI, rutting), variables ambientales (uso de suelo, drenaje) y flujos de tráfico en mapas interactivos. Con plataformas como ArcGIS o QGIS se generan dashboards que señalizan “puntos calientes” de deterioro y priorizan automáticamente los tramos críticos según criterios de riesgo y demanda (Ruíz & Sánchez, 2021). Gracias a esta integración, las rutas de inspección y los cronogramas de mantenimiento pueden planificarse un 30 % más rápido, optimizando la asignación presupuestal (Cambridge Systematics, 2006; Tan & Cheng, 2014).

Aplicación de VANT en la Evaluación de Pavimentos

El empleo de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) añade una capa aérea de alta resolución y cobertura continua.

Cobertura y Accesibilidad: Un único vuelo de VANT puede inspeccionar hasta 10 km de carretera —incluyendo puentes y túneles— sin interrumpir el tráfico (Radopoulou & Brilakis, 2016). La planificación de misión con solapamientos de imagen garantiza un Ground Sample Distance (GSD) < 2 cm/píxel, imprescindible para la detección temprana de fisuras de primer orden (Huang & Kong, 2022).

Captura Multisensorial: Equipados con cámaras RGB, multispectrales y LiDAR, los VANT capturan texturas, humedad superficial y topografía en nubes de puntos 3D. Estos datasets diferencian microfisuras de grietas abiertas y cuantifican baches con precisión submétrica (< 5 mm) (Aleadelat & Ksaibati, 2017; Wang, 2000).

Integración con Procesamiento Automatizado: Tras el vuelo, los datos se suben a la nube donde pipelines de machine learning ejecutan detección y clasificación de daños, generando automáticamente índices tradicionales (PCI, IRI, rutting) en horas en lugar de semanas (Smith, Johnson, & Thompson, 2020).

Optimización de Recursos y Toma de Decisiones: La sinergia de VANT, SIG y modelos predictivos conforma un sistema de gestión integral que prioriza tramos críticos, estima

costos de intervención y asigna recursos dinámicamente. En carreteras de cuota de Baja California esto ha permitido reducir en un 22 % el presupuesto anual de mantenimiento, manteniendo o mejorando los niveles de servicio (López & Martínez, 2020; Ruíz & Sánchez, 2021).

2.3 Implementación de la planeación estratégica para optimizar la conservación de pavimentos.

La conservación estratégica de pavimentos flexibles requiere de un enfoque multinivel que combine datos de campo, modelado predictivo y priorización basada en evidencia. A continuación, se revisan las prácticas y brechas en cada escala, contrastando con estándares de potencias mundiales.

Los países de primera potencia han consolidado Pavement Management Systems (PMS) maduros que combinan observaciones automatizadas (LiDAR, deflectómetros), series históricas de tráfico y clima, y algoritmos de machine learning para pronosticar la vida útil del pavimento y optimizar las inversiones (AASHTO, 2018).

La FHWA (2013, 2022) publicó guías para asegurar la calidad de los datos de condición (PCI, IRI) y establecer ciclos continuos de retroalimentación, logrando precisiones predictivas superiores al 85 % y reducciones de costos de ciclo de vida de hasta 20 %. La PIARC (s. f.) promueve mediciones no destructivas para evaluar parámetros estructurales y funcionales, recomendando la adopción de estándares internacionales que aún carecen muchos países en desarrollo.

Sin embargo, aun hay carencias en la falta de inventarios consolidados, en la escases de inversión en tecnologías de captura automática y la limitada cultura de gestión de activos en países con economía media o baja (World Bank, 2013).

A nivel nacional la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2017) emitió el Manual de Proyectos de Pavimentos Flexibles, que define procedimientos estandarizados para inspección de PCI, IRI y rutting, análisis de costos de ciclo de vida y criterios para priorizar obras. No obstante, solo el 40 % de las entidades federativas dispone de sistemas digitales de gestión vial; el resto basa sus decisiones en inspecciones manuales y correcciones

reactivas, lo que incrementa un 15 % los costos operativos comparado con un enfoque preventivo (García & Pérez, 2021; World Highways, 2023).

El proyecto NCHRP 20-123 (TRB, 2023) propone una actualización digital de la guía AASHTO para entornos de habla hispana, pero su adopción está en fase de desarrollo por falta de recursos y capacitación institucional.

A pesar de ello la falta de bases de datos fragmentadas, la escasez de personal técnico capacitado y la dependencia de consultorías externas, son limitantes que impiden tener un mejor desarrollo en el área.

Con respecto a la planeación de conservación a nivel regional noroeste (Considerando a Baja California, Sonora y Sinaloa). Para empezar con Baja California, Hernández (2019) evidenció que el clima árido y las altas cargas de tráfico aceleran el envejecimiento del asfalto; pilotos con UAV mejoraron la detección de fisuras en 18 %, pero la falta de renovación de equipamiento y de formación técnica limita la periodicidad de inspecciones. Un estudio en MDPI Sustainability (2022) recomendó ajustar la formulación de ligantes según temperaturas regionales, proyectando ahorros de mantenimiento del 15 %. En Sonora, Calderón, Palafox y Ramírez (2020) desarrollaron modelos de regresión múltiple que incorporan temperatura y humedad para predecir rutting, mejorando la precisión predictiva en 12 %, pero la falta de datos de tráfico pesados impide una calibración completa. El Arizona–Sonora Environmental Strategic Plan (ADEQ, 2023) promueve la coordinación binacional de datos ambientales y viales, aunque su aplicación práctica aún está en sus primeras etapas dado que es nuevo. Y por último en Sinaloa, Torres y Flores (2021) documentaron la implementación del Manual PASER en municipios costeros de Sinaloa, logrando un ahorro logístico del 12 % al agrupar intervenciones similares; sin embargo, la persistencia de prácticas opacas en la asignación de contratos distorsiona las prioridades técnicas. Sin embargo, las carencias en la escases de infraestructura de monitoreo climático, la débil transparencia en contrataciones y ausencia de PMS regionales integrados, son causantes de no contar con una planeación continua para la mejora de toma de decisiones.

En cuanto a nivel local el diseño vial de Mexicali se basa en un sistema reticular jerarquizado, compuesto por vialidades primarias, secundarias y terciarias. No obstante, el crecimiento urbano acelerado ha sobrecargado varias de estas rutas, provocando deterioros que limitan la

funcionalidad del sistema y afectan directamente a la calidad del transporte urbano (Ayuntamiento de Mexicali, 2020; IMIP, 2022). El Plan Municipal de Desarrollo Urbano 2020 de Mexicali estableció metas para reducir el rezago de pavimentación del 33 % al 20 % en cinco años, basándose en muestreos de PCI e IRI con equipos portátiles homologados (Ayuntamiento de Mexicali, 2020). Un diagnóstico del North American Development Bank (2011) reveló que las colonias con PCI < 60 concentraban el 60 % de las fallas; el programa municipal priorizó esas áreas, mejorando el nivel de servicio vial en 25 % en el primer año de intervención. Sin embargo, la limitada continuidad presupuestal que interrumpe los ciclos preventivos, la capacidad técnica municipal reducida para análisis SIG y modelado predictivo, la dependencia de consultoras externas y falta de indicadores sociales y de equidad en la priorización.

Podemos concluir que la planeación estratégica en la conservación de pavimentos flexibles evidencia una marcada brecha entre los países de primera potencia y las naciones en desarrollo. A nivel global, la adopción de Pavement Management Systems maduros respaldados por la AASHTO (2018) y la FHWA (2013, 2022) permite integrar datos automatizados de condición, tráfico y clima en modelos predictivos con alta precisión y una significativa reducción de costos de ciclo de vida. Sin embargo, en muchos países en desarrollo persisten limitaciones en infraestructura de datos y cultura de gestión de activos, que derivan en intervenciones reactivas y menos eficientes (World Bank, 2013).

En México, la normatividad de la SCT (2017) ha establecido protocolos claros para medir PCI, IRI y ahuellamientos, han iniciado la digitalización de sus procesos mediante la guía NCHRP 20-123 (TRB, 2023). No obstante, la heterogeneidad en la adopción de sistemas digitales solo 40 % de las entidades federativas cuenta con PMS y la dependencia de correcciones de emergencia encarecen el mantenimiento y reducen su efectividad (García & Pérez, 2021; World Highways, 2023). Regionalmente, las condiciones climáticas y de tráfico de Baja California, Sonora y Sinaloa requieren modelos adaptados: Baja California ha logrado mejorar en 18 % la detección de fisuras con UAV, pero enfrenta limitaciones de equipamiento y formación (Hernández, 2019) ; Sonora avanza en la incorporación de variables térmicas en los modelos de ahuellamiento (Calderón et al., 2020) ; y Sinaloa ha

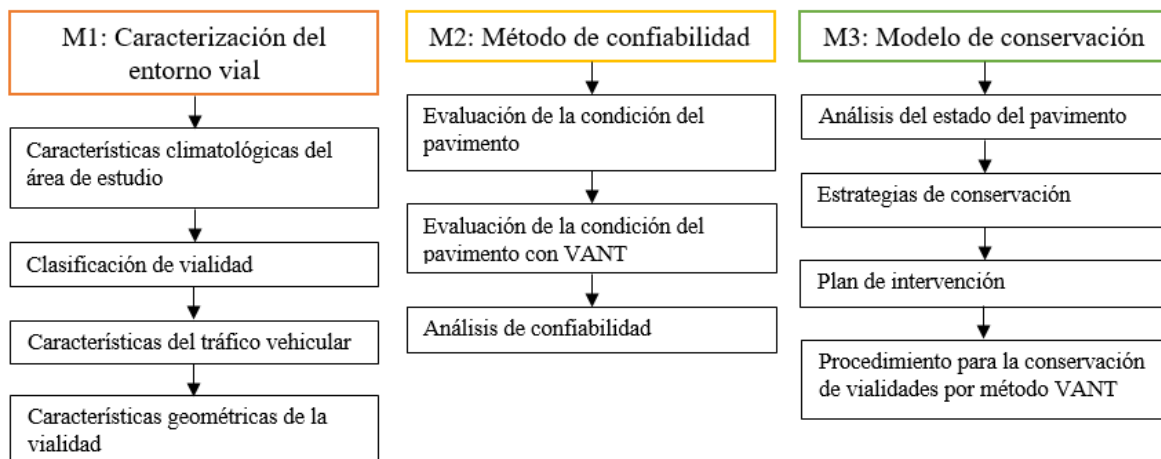
optimizado la agrupación de intervenciones con PASER, aunque enfrenta desafíos de transparencia en licitaciones (Torres & Flores, 2021) .

A nivel local, el Ayuntamiento de Mexicali ha fijado metas claras para reducir el rezago vial mediante mediciones homologadas de PCI e IRI, logrando mejorar el nivel de servicio en un 25 % en áreas prioritarias (Ayuntamiento de Mexicali, 2020; NADB, 2011). Sin embargo, la continuidad presupuestal y la limitada capacidad técnica municipal para integrar SIG y modelos predictivos siguen siendo barreras que ponen en riesgo la sostenibilidad de las intervenciones preventivas. En resumen, cerrar la brecha con los estándares internacionales de conservación estratégica de pavimentos flexibles requiere inversión sostenida en infraestructura de datos, capacitación técnica, fortalecimiento institucional y un compromiso real con el mantenimiento preventivo, desde la escala global hasta la local. Solo así será posible transitar de un modelo reactivo a uno verdaderamente proactivo y eficiente.

3. Metodología

El desarrollo metodológico de esta investigación se caracteriza por una metodología sistemática desarrollada para lograr un tratamiento integral de este tema y un procedimiento completo para la conservación de vialidades urbanas a través de la tecnología VANT. Por lo tanto, este capítulo presenta las acciones que se realizaron para obtener, procesar y estructurar esta información.

Figura 4. Metodología de análisis específico.



Fuente: Elaboración propia.

3.1 Caracterización del entorno vial.

3.1.1 Características climatológicas del área de estudio

La primera fase del método incluyó la recopilación de datos básicos que fueron analizados para una evaluación adecuada del estado de las vialidades urbanas en el área de estudio. Este proceso fue diseñado para recopilar información relevante para sentar una base sólida para las fases siguientes del análisis.

Se obtuvieron datos sobre las condiciones climáticas actuales, ya que la precipitación y la temperatura se han determinado históricamente como influyentes considerables en la vida útil y el desempeño de los pavimentos. Los datos climáticos fueron obtenidos de bases de datos oficiales de instituciones meteorológicas regionales, como CONAGUA (CONAGUA, 2024).

3.1.2 Clasificación de vialidad

La clasificación vial representa un componente esencial en la caracterización del entorno urbano, ya que permite establecer jerarquías funcionales entre las diferentes vialidades que conforman la red de transporte. Esta clasificación considera el uso final de cada calle dentro de la red, la capacidad de servicio y el nivel de conexión. También considera el uso que hacen de estas vías los usuarios viales: peatones, ciclistas, transporte público, vehículos de emergencia, transporte personal y de carga, dependiendo del espacio aceptado para cada uno de ellos. La clasificación propuesta para las vías por el “Manual de Calles: Diseño Vial para Ciudades Mexicanas” (SEDATU, 2019) fue seguida en la investigación, dividiéndolas en primarias, secundarias y terciarias. Esta categorización no solo facilita la planificación de intervenciones de conservación más eficientes y orientadas a las necesidades reales de movilidad, sino que también permite armonizar el diseño y uso del espacio vial con criterios de habitabilidad, accesibilidad y seguridad para todos los usuarios.

De acuerdo a la NOM-034-SCT2/SEDATU-2022, la clasificación de vialidades se define como:

- **Vialidades primarias:** Estas vialidades están diseñadas para permitir el desplazamiento eficiente de vehículos entre diferentes zonas de una ciudad. Estas vías pueden operar con flujo continuo o regulado mediante semáforos, y están preparadas para incorporar carriles










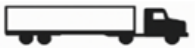


exclusivos destinados al transporte público o vehículos de emergencia. Dentro de esta categoría se incluyen tanto las arterias principales como las de circulación continua.

- **Vialidades secundarias:** Este tipo de vialidades tiene como propósito conectar las calles de carácter local con la red primaria, funcionando como canales intermedios de tránsito. Pueden incluir elementos como franjas separadoras de flujo y zonas destinadas al estacionamiento en vía pública, lo cual responde a su carácter mixto entre movilidad y accesibilidad.
- **Vialidades terciarias:** Corresponden a calles de uso principalmente residencial o comunitario, cuya prioridad radica en facilitar el acceso a propiedades privadas o espacios interiores de los barrios. Son las vialidades con menor capacidad operativa dentro del sistema urbano, y frecuentemente están orientadas al tránsito peatonal, de bicicletas u otros medios no motorizados. En general, no cuentan con semáforos y presentan bajos volúmenes de tráfico y velocidad. Sus TDPA van de 500 a 1,500 vehículos.

3.1.3 Características del tráfico vehicular

El análisis del tráfico vehicular constituye un elemento clave en la caracterización del entorno vial, ya que permite comprender la dinámica de circulación que influye directamente en el estado y deterioro del pavimento. Esta etapa contempla la identificación de variables como la intensidad promedio diaria del tránsito y la clasificación vehicular por tipo. Evaluar estas características son necesarias para establecer correlaciones entre la demanda vehicular y el desempeño estructural de la infraestructura, y así definir estrategias de conservación acordes al nivel de exigencia al que están sometidas las vías urbanas.

Figura 5. Clasificación de algunos vehículos en México de acuerdo a la NOM-012-SCT 2017.

Tipo de Vehículo	Nomenclatura	Perfil	Número de Ejes
Automóviles	AP		2
Camperos	AP		2
Camionetas	AC		2
Autobús	B2		2
Autobús	B3		3
Camión	C2		2
Camión	C3		3
Camión de 2 ejes con un Remolque de 2 ejes	C2-R2		4
Tracto Camión de 2 ejes con un Semiremolque con 1 eje	T2-S1		3
Tracto Camión de 2 ejes más un Semiremolque con 2 ejes	T2-S2		4
Tracto Camión con 2 ejes, mas un Semiremolque con 1 eje y con Remolque con 2 ejes	T2-S1-R2		5
Tracto Camión de 3, con un Semi de 2 ejes mas un Remolque de 3 ejes	T3-S2-R3		8

Fuente: Elaboración propia (SCT, 2017).

3.1.4 Características geométricas de la vialidad

El análisis de las características geométricas de las vialidades resulta fundamental para comprender el comportamiento estructural del pavimento y su interacción con el entorno urbano. Estas características influyen directamente en la funcionalidad, seguridad y durabilidad de la infraestructura vial, por lo que su evaluación es una etapa clave dentro de la caracterización del entorno. En este apartado se consideran elementos de la sección transversal como el ancho de calzada, ancho de corona, ancho de carril, ancho de acotamientos, número y sentido de carriles y velocidad. Estos parámetros permiten identificar restricciones físicas, condiciones operativas y posibles focos de deterioro, sirviendo como insumo técnico para el diseño de estrategias de conservación acordes a las condiciones específicas de cada tramo vial.

Descripción de Componentes Geométricos de la Sección Vial, basadas en el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras (SCT,2018).

Ancho de corona: Corresponde a la suma del ancho de la calzada más los acotamientos. Esta medida representa el total de la superficie útil para el tránsito vehicular y maniobras de emergencia dentro de una sección vial.

Ancho de calzada: Es la dimensión transversal de la vía que comprende exclusivamente los carriles destinados a la circulación de vehículos. Su magnitud depende del número de carriles, y no incluye acotamientos ni elementos adicionales.

Ancho de carril: Es la medida transversal asignada a cada carril de circulación. De acuerdo con los lineamientos del manual, el valor estándar para carreteras federales es de 3.5 metros, aunque puede ajustarse en vías de menor jerarquía o condiciones particulares.

Ancho de acotamiento: Se refiere a las franjas laterales contiguas a la calzada, destinadas a la detención ocasional de vehículos, circulación de emergencia y protección estructural del pavimento. Su ancho varía generalmente entre 2.0 y 3.0 metros según el tipo de vía y clase de carretera.

Velocidad: Es la velocidad máxima segura que se considera para diseñar los elementos geométricos de la vía.

Número de carriles: Indica la cantidad de franjas longitudinales disponibles para la circulación en cada sentido. Su determinación depende de factores como el volumen de tránsito esperado, la clasificación funcional de la carretera y las condiciones del terreno.

Sentido de carriles: Hace referencia a la dirección en la que se permite la circulación vehicular dentro de cada carril de una calzada.

3.2 Método de confiabilidad

El análisis de confiabilidad constituye una herramienta estadística fundamental para validar la precisión y consistencia entre diferentes métodos de evaluación de pavimentos. En este estudio, el Método de Confiabilidad se implementa con el propósito de comparar cuantitativamente los resultados obtenidos mediante inspección tradicional y del método VANT.

3.2.1 Evaluación de la condición del pavimento

Se llevaron a cabo inspecciones visuales en campo siguiendo los lineamientos del método tradicional del Índice de Condición del Pavimento (PCI) utilizando la herramienta para la determinación de las condiciones actuales de los pavimentos flexibles (Anexo 1). Esta técnica se basa en la identificación directa de tipos de falla, su severidad y extensión dentro de unidades de muestreo definidas previamente, lo que permite asignar un valor cuantitativo a la condición de la superficie analizada.

Tabla 1. Escala PCI

PCI			
100-85	Excelente	Preservación	Intervenciones menores de mantenimiento preventivo
85-70	Muy bueno		
70-55	Bueno	Rehabilitación	Requiere mantenimiento rutinario y reparaciones puntuales
55-40	Regular		Intervenciones correctivas extensas
40-25	Malo	Reconstrucción	Rehabilitación o reconstrucción inminente
25-10	Muy malo		
10-0	Fallado		

Fuente: Elaboración propia basada en ASTM, 2012; Smith et al., 2020

3.2.2 Evaluación de la condición del pavimento con VANT

Este procedimiento establece de manera sistemática los pasos técnicos necesarios para realizar la inspección del estado superficial del pavimento urbano utilizando un vehículo aéreo no tripulado (VANT), a fin de que faciliten la identificación de fallas superficiales. Una de las normativas consultadas para este procedimiento fueron: la NOM-107-SCT3-2019, que establece condiciones y requisitos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano y la ASTM D 6433, norma estándar para la inspección del PCI.

A continuación, se describen los componentes utilizados para elaborar en un plan de vuelo:

GCP: Los puntos de control terrestre (GCP, por sus siglas en inglés) corresponden a ubicaciones específicas que pueden ser reconocidas con claridad en las imágenes capturadas durante un levantamiento. Estos puntos se marcan físicamente con señales visibles como blancos fotogramétricos y sus coordenadas se determinan utilizando técnicas topográficas precisas, dentro del sistema de referencia previamente establecido. Se distribuyen de forma estratégica y homogénea en el área de estudio para facilitar la correcta georreferenciación, orientación espacial y escalado del modelo generado (De Luis-Ruiz et al., 2021).

Altura de vuelo: La altura de vuelo se refiere a la distancia vertical entre el dron y la superficie terrestre, y desempeña un papel clave en la calidad de las imágenes captadas. Esta calidad se mide a través del parámetro conocido como Distancia de Muestra del Suelo (GSD), el cual disminuye al reducir la altitud, lo que se traduce en una mayor resolución espacial (De Luis-Ruiz et al., 2021).

La relación entre estos factores se puede calcular utilizando la fórmula: $f / H = a / D$

Donde:

H: representa la altura de vuelo.

F: la distancia focal del sensor.

a: el tamaño del sensor.

D: el ancho de la superficie a capturar

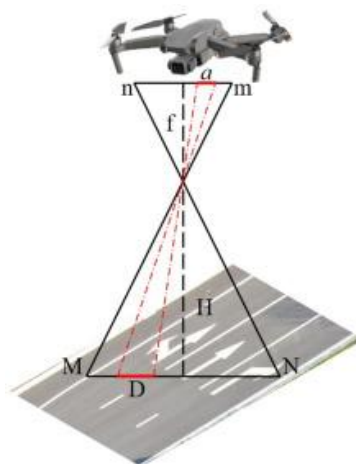


Figura 6. Altura de vuelo (Zhu, et al. 2022).

Ángulo de cámara: El ángulo de inclinación se define como la desviación angular entre la dirección vertical desde el punto nadir y el eje óptico de la cámara. En condiciones estándar de fotogrametría, dicho eje suele mantenerse vertical gracias al uso de estabilizadores tipo cardán, los cuales aseguran que la cámara permanezca perpendicular al plano de referencia. No obstante, ajustar deliberadamente este ángulo puede ser beneficioso para obtener datos altimétricos complementarios, especialmente en estructuras elevadas como edificaciones. Las tomas pueden realizarse en orientación vertical, oblicua o una combinación de ambas, dependiendo del propósito del levantamiento (Ewertowski et al., 2019).

Velocidad de vuelo: La velocidad de vuelo de un VANT durante su recorrido aéreo influye directamente en diversos parámetros del levantamiento, como la duración total del vuelo, la frecuencia de captura de imágenes y la configuración de la velocidad de obturación de la cámara. Un aumento o disminución en esta velocidad afecta tanto la superposición entre fotografías como la calidad de los datos recolectados (De Luis-Ruiz et al., 2021).

Superposición: Este parámetro describe el grado de coincidencia entre imágenes consecutivas dentro de una misma trayectoria de vuelo (superposición frontal), así como entre diferentes trayectorias paralelas (superposición lateral). Se expresa como un porcentaje del área común capturada entre fotogramas. Este solapamiento es fundamental para lograr reconstrucciones tridimensionales precisas y generar ortofotografías de alta calidad. (De Luis-Ruiz et al., 2021).

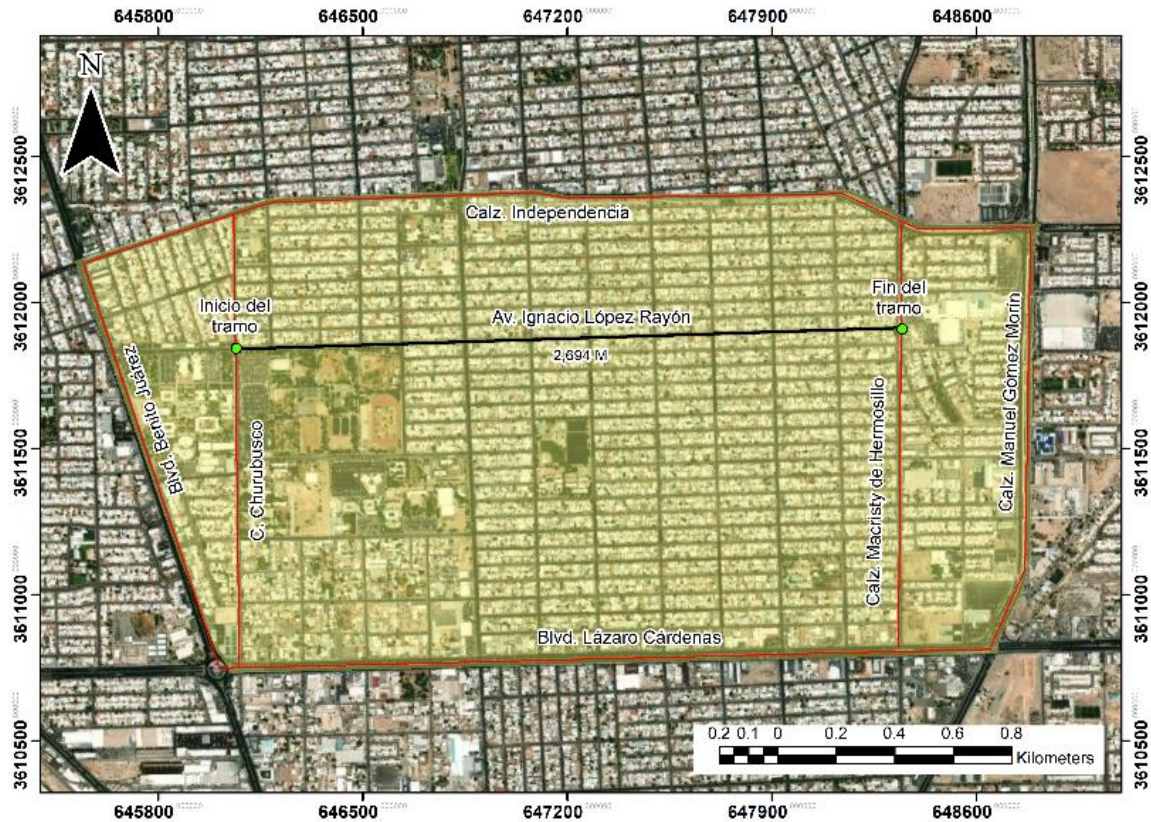
Los materiales y equipos utilizados para este procedimiento son:

- Dron (para este estudio se utilizó el DJI 4 Mini Pro, sin sensores adicionales).
- Control remoto con aplicación de planificación de vuelo (se utilizó el DJI RC 2 y se planearon los vuelos en WaypointMap).
- Receptores GNSS RTK para georreferenciación.
- Software de procesamientos: Pix4Dmapper y/o Metashape.
- Software de análisis: AutoCAD.
- Formatos de registro de vuelo y fichas técnicas de tramos.
- Pintura en aerosol o blancos fotogramétricos.

A continuación, se describen los pasos a realizar para la obtención del PCI:

Paso 1: Determinar vialidad a inspeccionar, identificando ubicación y longitud del tramo a inspeccionar.

Figura 7. Ejemplo de la identificación del tramo



Fuente: Elaboración propia

Paso 2: Elaborar el plan de vuelo con parámetros definidos: altura, velocidad, ángulo de la cámara y superposición frontal y lateral. con ayuda de una aplicación de planificación de vuelo (para este estudio se utilizó WaypointMap debido a que el control remoto y el dron utilizado no eran compatibles con aplicaciones de planeación de vuelos como, por ejemplo: Pix4D Capture, DJI FlightPlanner, Dronelink, etc.).

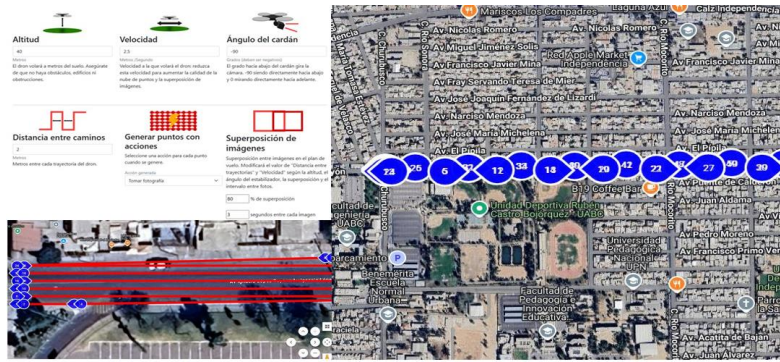


Figura 8. Configuración del plan del vuelo, parámetros de vuelo. Fuente: Elaboración propia.

Paso 3: Establecer GCPs con levantamiento RTK en campo para garantizar precisión espacial del modelo generado. Estos puntos deberán estar distribuidos de forma estratégica y homogénea en el área de estudio para facilitar la correcta georreferenciación, orientación espacial y escalado del modelo generado. Se pueden utilizar marcas con aerosol o bien utilizar elementos fijos que se encuentran en la vialidad.



Figura 9. Equipo topográfico para levantar puntos GCP. Fuente: Elaboración propia.

Paso 4: Establecer horario que se encuentre en óptimas condiciones de luz para evitar exceso de sombras. En el caso de Mexicali se llegó a la conclusión de utilizar el horario de 11:00 am a 14:00 pm tomando en cuenta que el horario del punto más alto del sol siempre es a las 12:00 pm en todas las estaciones del año.

Paso 5: Ejecución y operación de vuelo

Encontrar una zona de despegue, puede ser dentro o fuera del área a inspeccionar donde no se encuentren obstáculos que puedan interrumpir el despegue del VANT. Además de verificar que se encuentre en una superficie plana y despejada, el porcentaje de la batería optima tanto de la aeronave como del control remoto y establecer conexión entre ambos, tener una recepción de señal GPS de al menos 15 satélites y verificar que la tarjeta de memoria este colocada correctamente. Una vez en el aire estar verificando el porcentaje de batería, que no se pierda la conexión entre control remoto y el VANT, además verificar que el plan de vuelo se esté ejecutando de manera correcta.

Paso 6: Descargar las imágenes capturadas y procesarlas con Pix4Dmapper o Metashape.

Se ingresan las imágenes obtenidas en el vuelo y se empieza a ejecutar el proceso fotogramétrico, en donde se generarán los ortomosaicos, modelos de elevación digital (DEM) y reconstrucciones dimensionales y tridimensionales del pavimento. Además, de validar la precisión del modelo comparando puntos generados con los GCPs levantados.

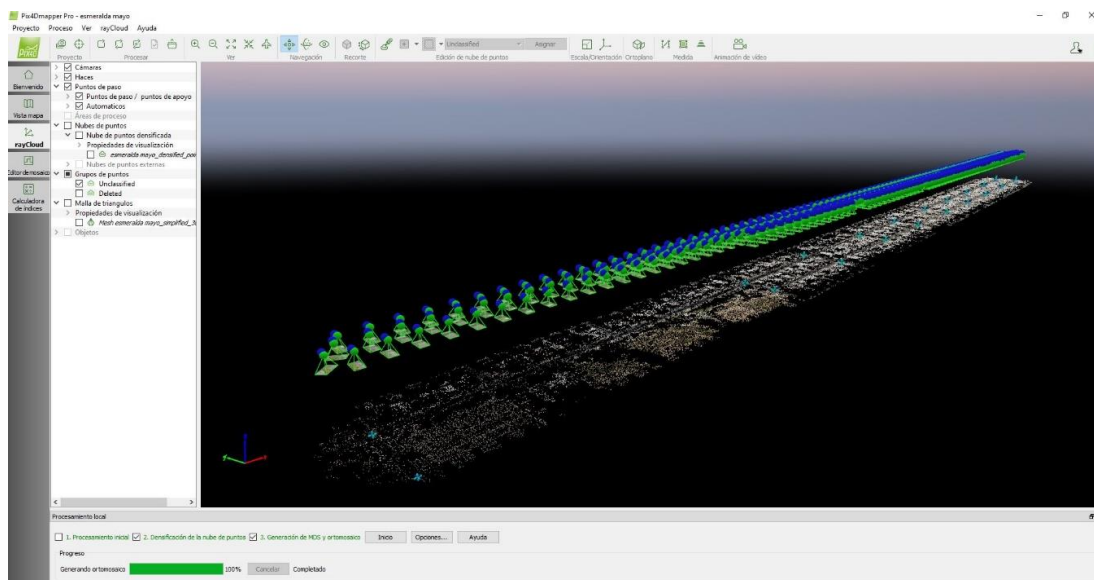


Figura 10. Nube de puntos del levantamiento. Fuente: Elaboración propia.

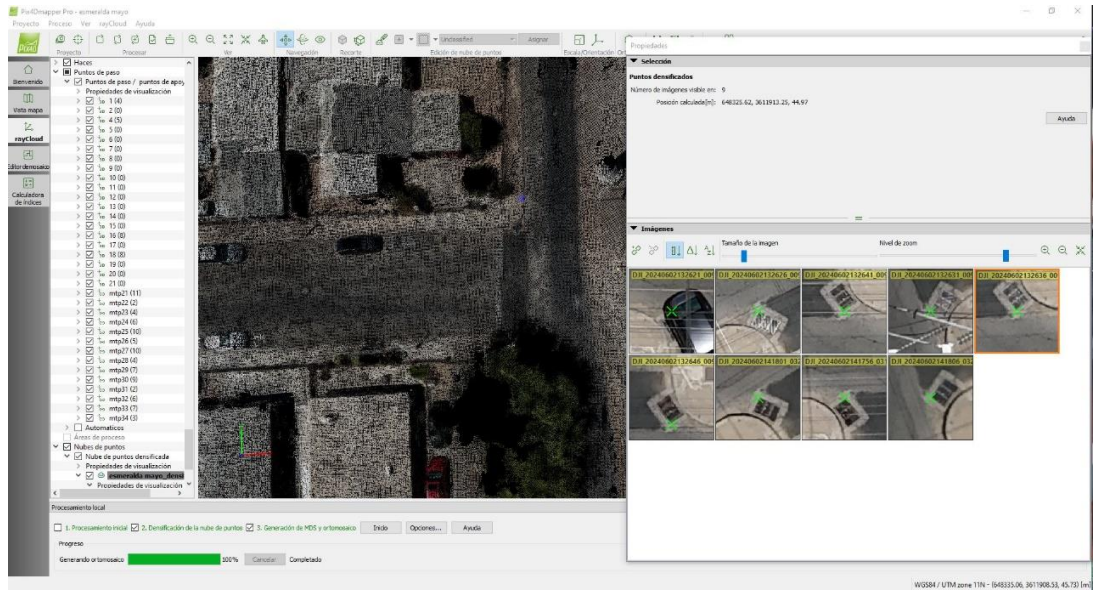


Figura 11. Reubicación correcta de puntos GPCs. Fuente: Elaboración propia.

Paso 7: Detectar y clasificar fallas superficiales (grietas, baches, parches, deformaciones) sobre la ortofoto mediante AutoCAD.

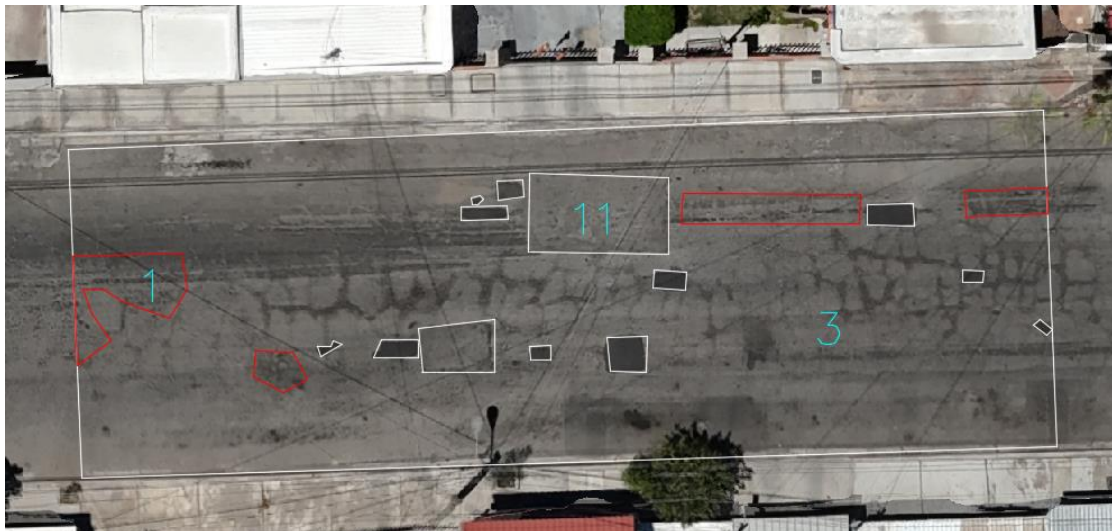


Figura 12. Inspección de unidad de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

Este procedimiento obtiene una representación georreferenciada precisa del estado del pavimento.

Paso 8: Este paso es seguir con el llenado de formatos por unidad de muestreo que se muestra en el Anexo 1 como se hace habitualmente con el método descrito anteriormente y determinar el PCI del tramo.

3.2.3 Análisis de confiabilidad

Una vez obtenidos los resultados mediante los dos métodos de inspección (VANT y PCI tradicional), se procede a realizar un análisis de confiabilidad con el objetivo de comparar el nivel de correspondencia entre ambas metodologías.

Este análisis se lleva a cabo utilizando el software estadístico Minitab, versión 15. Aplicación del gráfico de evaluación para analizar la relación de los valores derivados de ambas técnicas. En este gráfico, se reportaron los valores PCI con el proceso convencional frente a los obtenidos con el procesamiento VANT. Este gráfico facilita la visualización de la presencia de relaciones lineales entre las dos variables y permite calcular el coeficiente de valoración, R, como una medida estadística de la fuerza de la relación.

Se han utilizado análisis gráficos y estadísticos para ser empleados como una forma objetiva de verificar cuán preciso es el método VANT en comparación con el método convencional, aportando evidencia cuantitativa de su eficacia y confiabilidad en el contexto de inspección y conservación de pavimentos urbanos.

3.3 Modelo de Conservación

Después de demostrar la confiabilidad del método asistido por VANT, sus datos se incorporan a un modelo de preservación de vialidades urbanas. El propósito principal de este modelo era definir criterios técnicos para asignar intervenciones y mantenimiento según la prioridad, teniendo en cuenta la condición real de la evaluación de los deterioros del pavimento. Para analizar y proyectar el rendimiento del pavimento siguiendo diferentes estrategias de intervención, utilizamos el software HDM-4 (Modelo de Desarrollo y Gestión de Carreteras), que es un software reconocido internacionalmente para la planificación y evaluación económica de programas de mantenimiento de vialidades urbanas.

3.3.1 Análisis del estado del pavimento.

Las vialidades elegidas en el presente estudio tienen diferentes estados de conservación, con predominancia de deterioro funcional en la mayoría de los tramos evaluados. Generalmente, los defectos superficiales incluyen fisuras longitudinales y transversales, parches mal adheridos y fisuras en bloque o relacionados. Estas circunstancias revelan un deterioro gradual del pavimento y una reducción de la capacidad estructural del mismo, lo cual está significativamente influenciado por la ausencia de mantenimiento preventivo y las duras condiciones climáticas de la zona.

En cuanto al registro de mantenimiento, se identificó que algunos tramos han recibido intervenciones aisladas en años anteriores, especialmente parcheo superficial. Sin embargo, estos estudios no involucraron un plan de rehabilitación completo, lo que resultó en un rápido fracaso. Además, no se encontraron registros de aplicación sistemática de metodologías como el PCI ni de programas de conservación planificada basados en criterios técnicos en estas vialidades tomadas para el estudio.

Respecto al sistema de drenaje, se observó que en varios segmentos existe una infraestructura para la evacuación del agua pluvial. Sin embargo, se desconoce si están en funcionamiento o si cuentan con un mantenimiento. En muchos casos, las pendientes transversales son insuficientes o mal dirigidas, lo que genera encharcamientos y filtraciones que aceleran el deterioro del pavimento favoreciendo el desarrollo de fallas como el desprendimiento de agregados y la formación de baches.

En función del estado actual de las vialidades descrito previamente, se hace necesario establecer un sistema estructurado de evaluación que permita clasificar el nivel de deterioro observado en cada tramo. Para ello, se empleará como base el PCI, el cual será calculado para cada segmento analizado. Esta herramienta facilita la organización de los resultados mediante una escala que permite jerarquizar las intervenciones requeridas, promoviendo una planificación técnica más efectiva en materia de mantenimiento y conservación vial.

La clasificación se expresará mediante una escala alfabética de seis niveles, en la cual la letra “A” representa tramos con pavimento en excelente estado, donde las necesidades de intervención son prácticamente nulas. En el otro extremo, la categoría “F” se asigna a

vialidades con un deterioro crítico que afecta directamente la funcionalidad y seguridad de la vía, y que requieren acciones correctivas inmediatas y de alto impacto. Entre estos dos extremos se encuentran los niveles “B”, “C”, “D” y “E”, que reflejan distintos grados de desgaste progresivo como se muestra en la tabla xx.

Tabla 2. Clasificación del pavimento según del PCI

Clasificación del categorías según el PCI		
Categoría		PCI
A	Excelente	100-85
B	Bueno	84-70
C	Regular	69-55
D	Malo	54-40
E	Muy malo	39-25
F	Fallado	24-0

Fuente: Elaboración propia.

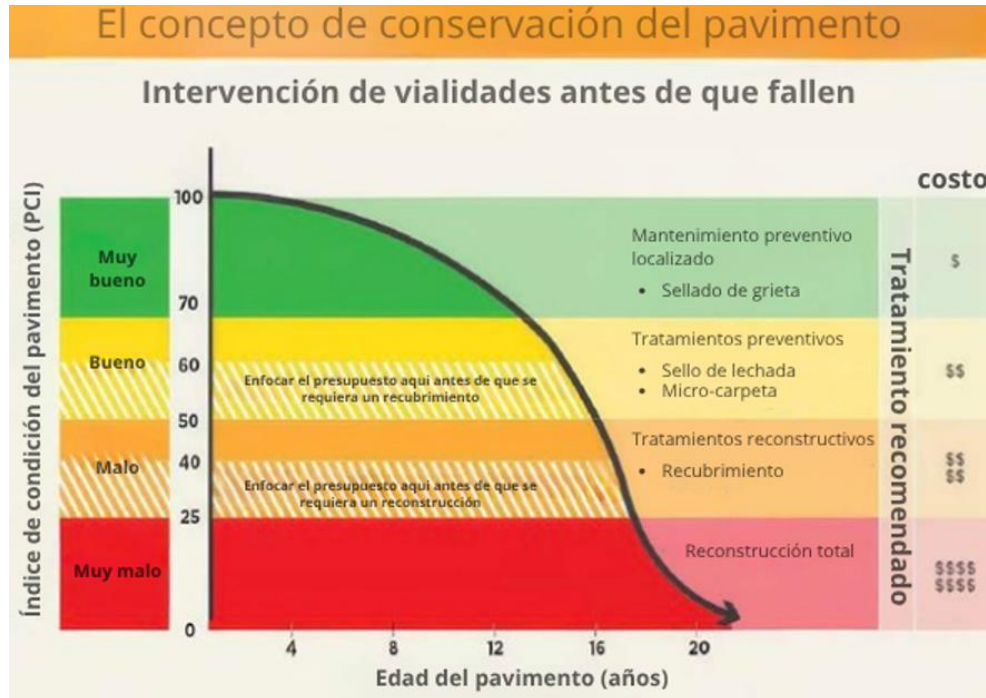
Este sistema de clasificación no solo es una definición sencilla del estado físico de las superficies estudiadas, sino que también puede servir como una poderosa herramienta para la toma de decisiones directas. A cada categoría le corresponden lineamientos específicos de intervención, que van desde tareas de mantenimiento preventivo hasta proyectos de rehabilitación mayor, según el nivel de afectación detectado. Esto permite una utilización más eficiente de los medios técnicos y del presupuesto, enfocando la toma de decisiones en función del grado de daño actual.

3.3.2 Estrategias de conservación.

Las directrices operativas definen las actividades específicas orientadas a la conservación y mejora de los tramos viales, con el propósito de mantenerlos dentro de los parámetros exigidos por las autoridades responsables de la infraestructura. Estas directrices permiten estructurar distintas opciones de tratamiento que pueden ser comparadas con una alternativa base o mínima, facilitando así el análisis de la eficiencia en términos de costo-beneficio. Para seleccionar la estrategia más adecuada de mantenimiento o rehabilitación, en función del estado actual del pavimento, se tomó como referencia un modelo gráfico (Figura xx), el cual

ha sido ampliamente empleado en ciudades de Estados Unidos como herramienta para determinar el tipo de intervención más apropiado en contextos urbanos.

Figura 13. Umbrales de conservación con propuestas de intervención conforme en el PCI.



Fuente: Elaboración propia basada en Concordma.gov

3.3.3 Plan de intervención.

Para el desarrollo del plan de intervenciones se definen las vialidades a utilizar para el estudio de la ciudad de Mexicali, considerando principalmente el estado del pavimento y la intensidad del tránsito vehicular.

Para la definición del plan de intervenciones se utilizará el programa Highway Development and Management Model versión 4 (HDM-4) es una herramienta desarrollada por el Banco Mundial y promovida por la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC) para apoyar la toma de decisiones en la planeación, evaluación y gestión de redes viales. Este modelo permite analizar el comportamiento de los pavimentos a lo largo del tiempo, considerando variables técnicas como el tipo de estructura vial, las condiciones climáticas, el tráfico y las estrategias de conservación aplicadas (World Road Association, 2002). A través de simulaciones, HDM-4 estima el deterioro del pavimento, los costos de mantenimiento, los

costos de operación vehicular y los beneficios socioeconómicos asociados, facilitando así la priorización de inversiones y la selección de estrategias óptimas para la conservación vial. Su enfoque integral permite evaluar políticas a nivel de red, proyectos individuales y alternativas de intervención en términos técnicos y económicos, por lo que se ha consolidado como una herramienta estándar en países en desarrollo para la gestión sostenible de infraestructura vial (World Road Association, 2002).

Para el programa HDM 4 se requiere que se especifiquen una cantidad de características como: clase de superficie, tipo pavimento, longitud, IRI, % agrietamiento, baches, tipo (vel/cap), modelo de tránsito y el tipo de carretera.

Descripciones de las principales características obtenidas de cada vialidad analizada.

Identificación: En esta etapa se recopilan datos clave de cada segmento de carretera, como su nombre, código, sección y algunos datos relacionados. También se incorporan elementos necesarios para su configuración en el entorno HDM-4, incluyendo la categoría funcional de la carretera, la clasificación climática del área, entre otros valores.

Geometría: Esto corresponde a las propiedades que caracterizan la disposición física de la sección, incluidas las características estructurales geométricas clásicas. También se tienen en cuenta las posibles tolerancias de velocidad operativa, como el tráfico no motorizado que proporciona fricción lateral.

Pavimento: Este componente toma en cuenta los factores de orientación del pavimento, como el tipo estructural, la profundidad de las capas y su capacidad para soportar cargas. También hay registros de acciones de mantenimiento previas con el año de emisión de las mismas.

Condición: Esto abarca parámetros medibles para evaluar el rendimiento operativo de la sección, como el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), número de grietas y baches por km.

Otros: Solo utilizable en pavimento de asfalto, esta parte puede registrar datos más detallados, tales como el tipo de drenaje existente, la calidad de compactación, la condición de la subbase y el número efectivo de carriles en cada calzada.

Tránsito motorizado: Se incluyen los datos iniciales correspondientes al Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) del año 2023. También se reporta la distribución del parque vehicular por tipo y el año en que se llevó a cabo el aforo correspondiente.

Tabla 3. Clasificación vehicular para tramos a analizar.

Nombre	Clase	Tipo base
Vehículo ligero	Coche de pasajero	Coche grande

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se muestra la clasificación vehicular que se utilizara para este proyecto, con referencia a vehículos motorizados.

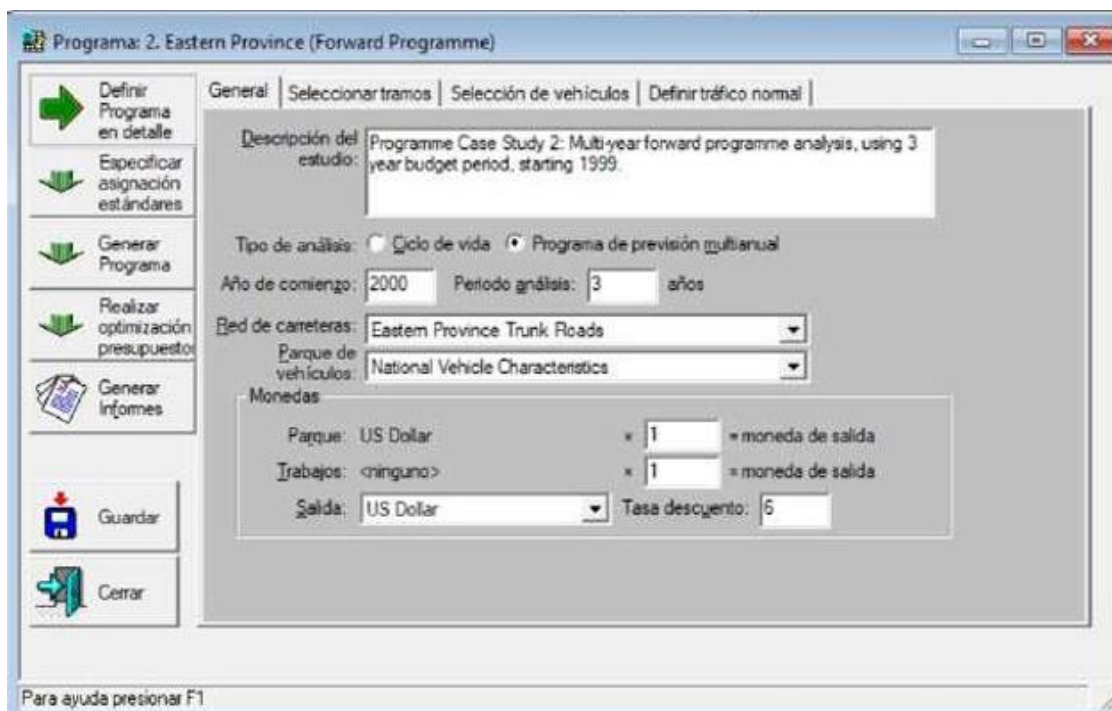
Procedimiento para clasificación de tipo de vialidad según su TDPA

El Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) constituye un indicador fundamental en los procesos de planeación, diseño y administración de las redes viales. Este valor refleja la media diaria de vehículos que transitan por una vía a lo largo de un año, incorporando las variaciones propias de estaciones, días hábiles y fines de semana.

El uso del TDPA permite caracterizar la demanda vehicular de cada tramo, lo cual es esencial para orientar de manera técnica la asignación de recursos en proyectos de construcción, conservación y operación de infraestructura. Asimismo, este dato es clave para definir criterios de seguridad, funcionalidad y eficiencia en el sistema de transporte.

Para fines de análisis y clasificación, el tránsito se agrupa en tres categorías principales: ligero, medio y pesado, en función del tipo y proporción de vehículos que circulan. Esta clasificación se relaciona directamente con la jerarquía funcional de la vialidad diferenciando entre vías primarias, secundarias y terciarias.

Figura 14. Formulación del análisis del programa de actividades previstas.



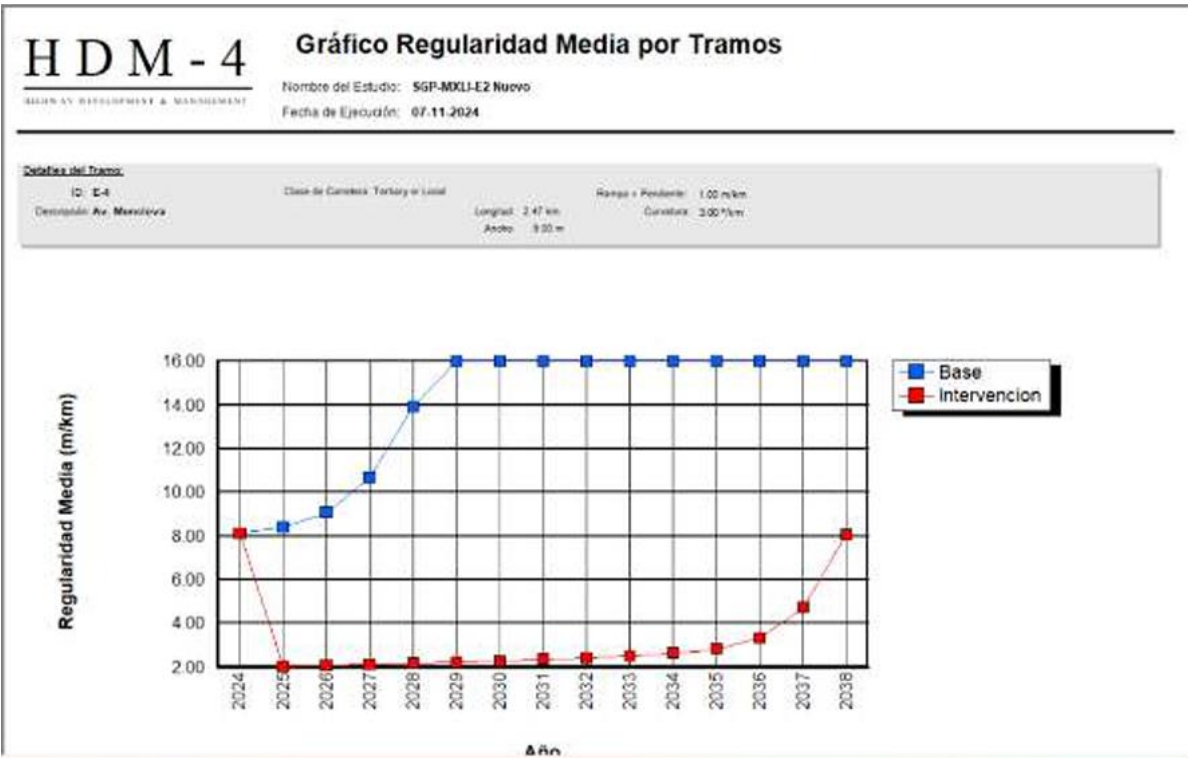
Fuente: Programa HDM-4

Procedimiento para establecer las acciones de intervención

Una vez que esté en ejecución el programa, se elaboran gráficos que representan la regularidad promedio del pavimento. Estos permiten visualizar cómo varía el desempeño funcional de la vialidad a lo largo de un periodo determinado. La comparación entre la curva base y la correspondiente al escenario con intervenciones evidencia el impacto de las acciones aplicadas sobre la vida útil del tramo evaluado.

Observando la gráfica en la figura xx, se puede observar que la línea roja ilustra el desempeño del pavimento bajo un esquema de mantenimiento conforme a los estándares de conservación previamente establecidos.

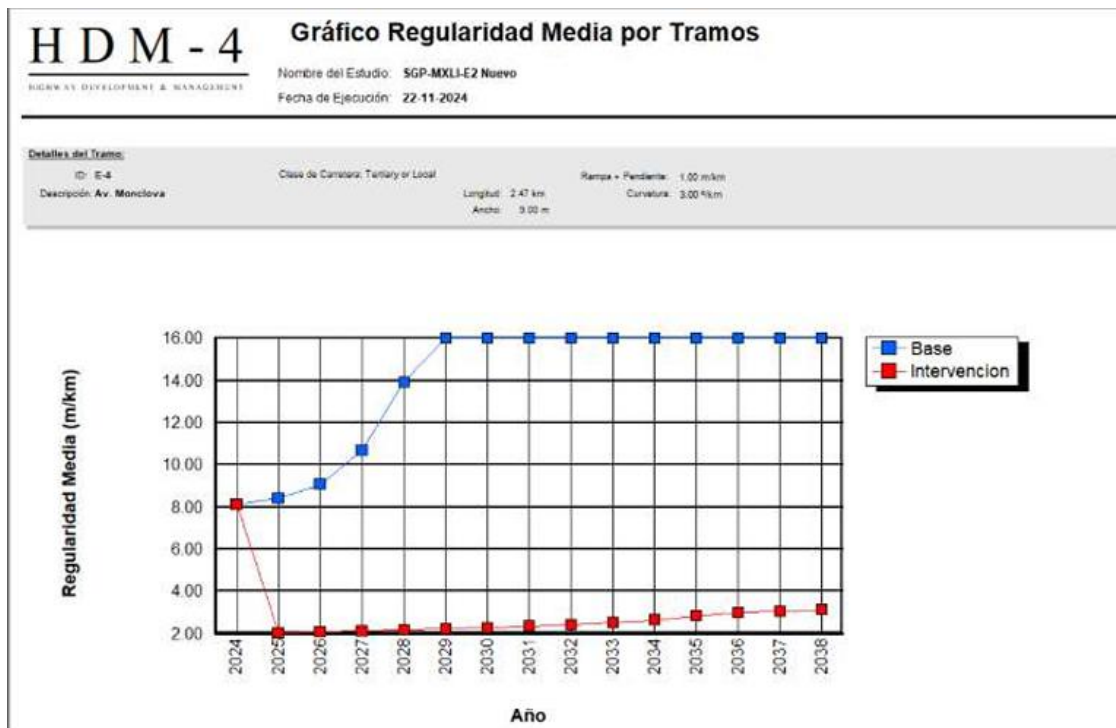
Figura 15. Gráfica generada por el programa HDM-4, analizando dos tipos de mantenimientos.



Fuente: Elaboración propia, extraída del programa HDM-4.

En contraste, la línea azul refleja el deterioro progresivo del tramo en un escenario donde no se aplican intervenciones. Es fundamental ajustar las acciones de conservación en función del comportamiento registrado en la regularidad de la vía. Por ejemplo, hacia el año 2036 se presenta una variación significativa en la tendencia, lo cual indica la necesidad de incorporar una intervención programada que permita mitigar el deterioro. Esta medida contribuiría a extender la vida útil del tramo, tal como se muestra en la figura xx.

Figura 16. Gráfica generada por el programa HDM-4, analizando dos tipos de mantenimientos y agregando una intervención programada en el año 2035.



Fuente: Elaboración propia, extraída del programa HDM-4.

Una vez seleccionada la estrategia de intervención más adecuada, se procede a la elaboración del calendario de actividades, en el cual se detallan las acciones a ejecutar, los periodos programados para su implementación, así como una estimación de los costos asociados a cada intervención.

Figura 17. Cronograma de intervenciones obtenido mediante el modelo HDM-4, el cual incluye los mantenimientos previamente definidos y contempla una acción programada adicional prevista para el año 2035.

Todos los costes se expresan en : US Dollar.

Nota: sólo se muestran tramos que tienen actuaciones activadas.

Alternativa: Intervencion		Clase de carretera: Tertiary or Local			
Tramo: Av. Monclova		Ancho: 9.00 m			
Tipo rodadura: Bituminosa					
Longitud: 2.47 km					
Año	Descripción	Código	Coste económico	Coste financiero	Cantidad de trabajo
2024	Fresado y reencarpetao	FR	19,759,802.0	20,148,160.0	22,230.00 sq. m
2035	Microcarpeta	Mc	3,106,642.5	3,168,664.0	22,230.00 sq. m
	Prep. Bacheo		0.0	0.0	188.88 sq. m
	Prep. sellado fis.		0.0	0.0	110.20 sq. m
Coste total para el tramo:			22,866,444.5	23,316,824.0	

Fuente: Elaboración propia, extraída del programa HDM-4.

Este procedimiento fue aplicado a cada categoría y nivel de intensidad de tránsito, con el propósito de generar un modelo representativo del comportamiento y las intervenciones requeridas bajo distintas condiciones de operación en entornos urbanos.

3.3.4 Procedimiento para la conservación de vialidades por método VANT.

Como parte final de la metodología, se establece un procedimiento integral orientado a la conservación de vialidades mediante el uso del VANT. Este enfoque permite vincular los resultados del análisis de condición superficial con la planificación estratégica de mantenimiento. A través de este procedimiento, se proponen tipos de intervención en función del deterioro observado y se estructura una programación técnica de actividades. La aplicación del método VANT no solo mejora la precisión en la detección de fallas, sino que también optimiza la toma de decisiones al integrar datos visuales, espaciales y cuantitativos en un solo proceso, favoreciendo así una gestión vial más eficiente y sustentable.

4. Resultados

4.1 Análisis del entorno vial

4.1.1 Condiciones climáticas del área de estudio

Mexicali, capital del estado de Baja California, se localiza en una de las regiones más cálidas y áridas de México. Su clima es de tipo desértico cálido (clasificación BWh según Köppen), caracterizado por una alta radiación solar, precipitaciones escasas y temperaturas extremas a lo largo del año (INEGI, 2023).

La temperatura media anual en el municipio es de aproximadamente 23.1 °C. Durante los meses de verano, las temperaturas máximas suelen superar los 45 °C, con un récord histórico de hasta 52 °C. En contraste, las temperaturas mínimas en invierno pueden descender por debajo de los 4 °C, aunque sin alcanzar valores de congelación en zonas urbanas. Según datos del Servicio Meteorológico Nacional, el mes más cálido es julio, con una temperatura media máxima de 42.3 °C, mientras que el mes más frío es enero, con una mínima media de 4.4 °C (CONAGUA, 2024).

En cuanto a la precipitación, Mexicali registra un promedio anual de apenas 54.6 mm, lo cual lo posiciona como uno de los municipios con menor pluviosidad del país. Las lluvias se concentran principalmente entre los meses de diciembre y marzo, aunque pueden presentarse eventos aislados durante el verano (CONAGUA, 2024).

Estas condiciones climáticas imponen exigencias considerables sobre la infraestructura vial. El calor extremo provoca dilatación de materiales, oxidación acelerada de ligantes asfálticos y agrietamientos por contracción térmica. Por otro lado, las lluvias concentradas en cortos periodos de tiempo, aunque escasas, pueden inducir fallas estructurales si no se cuenta con un sistema de drenaje eficiente. Por ello, el clima debe considerarse como una variable crítica en la planeación y ejecución de estrategias de conservación en pavimentos urbanos en esta región.

4.1.2 Selección de vialidades

Para el desarrollo de esta investigación, se eligieron exclusivamente vialidades terciarias como tramos de estudio como se muestra en la tabla 4. Esta decisión se fundamenta en el hecho de que este tipo de vías representa un componente esencial en la red urbana, ya que

permite el acceso directo a predios, viviendas y comercios dentro de colonias y barrios. Además, las vialidades terciarias suelen presentar mayores deficiencias en términos de conservación, al recibir históricamente menos atención presupuestal y operativa por parte de las administraciones municipales en comparación con las vías primarias o secundarias.

Tabla 4. Vialidades seleccionadas para la investigación.

ID	Nombre	Clasificación
1	Av. José Joaquín Fernández de Lizardi	Terciaria
2	Av. Ignacio López Rayón	Terciaria
3	Av. José Antonio Torres	Terciaria
4	Av. Monclova – Av. Miguel Bravo	Terciaria
5	Av. Saltillo - Av. E. López Quezada	Terciaria

Fuente: Elaboración propia.

El enfoque en estas vialidades resulta particularmente relevante, dado que concentran una alta interacción peatonal, comercial y vehicular a baja velocidad, lo que incrementa la vulnerabilidad del pavimento ante fallas superficiales como baches, parches mal aplicados o deformaciones por humedad. Asimismo, su geometría suele ser más variable, con anchos reducidos, presencia de mobiliario urbano y condiciones de drenaje limitadas, lo cual las convierte en espacios ideales para aplicar nuevas tecnologías de inspección como el VANT.

No obstante, es importante destacar que el procedimiento metodológico propuesto en esta tesis no se limita al análisis de vialidades terciarias. Su estructura técnica es perfectamente escalable y adaptable a vías secundarias y primarias, ya que se basa en criterios universales de evaluación de pavimentos, procesamiento geoespacial, y análisis de deterioro superficial. En este sentido, los métodos utilizados pueden aplicarse en otras jerarquías viales con ajustes mínimos en los parámetros operativos, especialmente en lo que respecta a planificación de vuelos, cobertura espacial y tipos de intervención recomendada.

4.1.3 Composición del tráfico

Para efectos de esta investigación, se definió que las vialidades seleccionadas presentan un Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) correspondiente al nivel bajo. Esta asignación se justifica en función de la jerarquía funcional de los tramos analizados, ya que se trata

exclusivamente de vialidades terciarias, las cuales, por su naturaleza, están destinadas principalmente al acceso local y a la circulación de vehículos de baja intensidad y velocidad.

En este tipo de vialidades es común encontrar una mayor presencia de vehículos ligeros y un tráfico intermitente, concentrado en horarios específicos, sin un flujo constante como el que se observa en vialidades de mayor jerarquía. Por ello, se consideró adecuado establecer un valor de TDPA bajo, como parámetro de entrada para los modelos de conservación utilizados.

No obstante, para ampliar la aplicabilidad del procedimiento a otros tipos de vías, se toma como referencia la clasificación del tránsito vehicular default del programa HDM-4 según el tipo de uso. De acuerdo con esta clasificación, el intervalo de TDPA se divide en tres rangos: bajo (hasta 750 vehículos por día), medio (hasta 3,000 vehículos por día) y alto (hasta 7,500 vehículos por día). Esta segmentación permite ajustar el análisis según las condiciones reales de operación de cada tipo de vialidad, ya sea primaria, secundaria o terciaria.

Para esta investigación se utilizará los siguientes modelos de motorización.

Tabla 5. Clasificación vehicular para el tipo de vialidad

Tipo de vehículo	Clasificación de vehículo	Uso principal
Automóviles	Vehículo de pasajeros	Transporta hasta 5 pasajeros
Camperos	Vehículo de pasajeros	Transporta hasta 5 pasajeros
Camionetas	Vehículo de pasajeros	Transporta hasta 7 pasajeros
Autobús	Vehículo de pasajeros	Transporta hasta 30 pasajeros

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Parámetros geométricos del tramo

En la tabla 6 se presenta la información relativa a las características geométricas de los cinco tramos de vialidades terciarias seleccionadas para este estudio. Se observó que el ancho de la corona varía entre 11.0 y 12.0 metros, mientras que el ancho de calzada se mantiene constante en 7.0 metros para todos los casos, reflejando una configuración homogénea en cuanto a la sección de rodamiento.

El ancho de los carriles también es uniforme, con un valor de 3.5 metros, lo cual es coherente con las recomendaciones técnicas para vialidades urbanas de baja velocidad. En cuanto a los

acotamientos laterales, estos presentan ligeras variaciones entre 2.0 y 2.5 metros, con excepción del tramo correspondiente a la Av. José Antonio Torres, que cuenta con un acotamiento de 2.15 metros, ligeramente por debajo del promedio observado. En términos de velocidad operativa, los tramos presentan dos rangos principales: entre 20–30 km/h y entre 30–40 km/h, siendo esto indicativo de zonas con tránsito local o de baja intensidad, como es característico de las vialidades terciarias. Todos los tramos cuentan con un solo carril por sentido de circulación, lo que refuerza su función de acceso vecinal y servicio a zonas residenciales. Finalmente, las longitudes de los tramos son similares entre sí, oscilando entre 2.245 y 2.259 kilómetros, lo cual proporciona una base de comparación homogénea para los análisis de condición del pavimento y planificación de intervenciones en etapas posteriores del estudio.

Tabla 6. Parámetros geométricos

Parámetros geométricos								
ID	Nombre	Ancho (m)				Velocidad (km/h)	N° de carriles por sentido	Longitud (km)
		Corona	Calzada	Carril	Acotamiento			
1	Av. José Joaquín Fernández de Lizardi	11	7	3.5	2	20-30	1	2.259
2	Av. Ignacio López Rayón	11	7	3.5	2	30-40	1	2.254
3	Av. José Antonio Torres	11.3	7	3.5	2.15	20-30	1	2.245
4	Av. Monclova – Av. Miguel Bravo	12	7	3.5	2.5	30-40	1	2.246
5	Av. Saltillo - Av. E. López Quezada	11	7	3.5	2	20-30	1	2.247

Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis de confiabilidad

4.2.1 Evaluación PCI

Tras concluir las inspecciones de campo, se recopilaron los valores correspondientes a cada una de las vialidades evaluadas. En esta sección se presenta una descripción de las principales

fallas observadas durante el levantamiento, junto con los valores obtenidos del PCI que resultaron del análisis realizado.

- **Av. José Joaquín Fernández de Lizardi**

Durante el levantamiento y evaluación visual realizado sobre el tramo de 2.259 km correspondiente a la avenida José Joaquín, se determinó que el pavimento presenta un estado funcional calificado como regular. Esta clasificación se obtuvo aplicando la metodología del PCI, la cual arrojó un valor de 41 para dicho segmento, obteniendo una clasificación en regular. Si bien este puntaje indica que la superficie aún conserva condiciones aceptables de servicio, durante la inspección se observaron manifestaciones evidentes de deterioro que, de no ser atendidas de manera oportuna, podrían desencadenar un proceso acelerado de degradación.

Entre los daños identificados destacan la presencia de baches, agrietamientos en patrón de bloque, grieta de borde, desprendimiento de agregados, agrietamiento tipo piel de cocodrilo, así como grietas longitudinales y transversales, como se muestran en la figura 18. Estas fallas reflejan tanto esfuerzos estructurales acumulados como afectaciones superficiales asociadas al envejecimiento del material y a la posible falta de mantenimiento preventivo. Por tanto, este tramo requiere intervenciones oportunas para evitar que el deterioro evolucione hacia estados críticos que demanden tratamientos más costosos.

Figura 18. Fallas identificadas en Av. José Joaquín



Fuente: Elaboración propia.

Av. Ignacio López Rayón

En el tramo correspondiente a la avenida Ignacio López Rayón, con una longitud de 2.254 km, se realizó una inspección visual detallada que permitió determinar un estado general deficiente para la circulación vehicular. Aplicando la metodología del PCI, se obtuvo un valor de 26, lo cual ubica al tramo dentro de la categoría de condición malo. Esta calificación evidencia una pérdida significativa en el desempeño funcional del pavimento, y sugiere la necesidad de una intervención prioritaria.

Durante el recorrido se documentaron múltiples signos de deterioro que comprometen tanto la seguridad como la calidad del desplazamiento, como se muestran en la figura 19. Entre los daños observados se encontraron baches, grietas en los bordes, desprendimiento de agregados, agrietamiento tipo piel de cocodrilo, agrietamientos longitudinales y transversales, así como deformaciones como abultamientos, hundimientos y zonas parchadas. Estos defectos reflejan un desgaste acumulado que, de no ser corregido oportunamente, puede evolucionar rápidamente hacia condiciones críticas, aumentando considerablemente los costos de rehabilitación en el corto plazo.

Figura 19. Fallas identificadas en Av. Ignacio López



Fuente: Elaboración propia.

Av. José Antonio Torres

Durante la evaluación del tramo de 2.245 kilómetros correspondiente a la avenida Antonio José Torres, se concluyó que las condiciones actuales del pavimento son inadecuadas para una circulación segura y eficiente. A partir de la aplicación del método del PCI, se obtuvo un valor de 41, lo cual clasifica al tramo dentro de un nivel regular.

A pesar de no encontrarse aún en un estado crítico, se identificaron varios deterioros que podrían agravar rápidamente la condición estructural y funcional si no se aplican medidas correctivas a corto plazo. Entre los daños más significativos observados durante la inspección, como se muestran en la figura 20, se encuentran agrietamiento en patrón de bloque, zonas parchadas tanto de forma general como por cortes de utilidad, agrietamiento tipo piel de cocodrilo, presencia de exudación y desprendimiento de agregados.

Figura 20. Fallas identificadas en Av. José Antonio Torres.



Fuente: Elaboración propia.

Av. Monclova – Av. Miguel Bravo

En la sección correspondiente a la avenida Monclova, con una longitud de 2.246 kilómetros, se llevó a cabo una inspección visual detallada que permitió concluir que el estado del pavimento es altamente deficiente para el tránsito vehicular. De acuerdo con los cálculos

realizados mediante la metodología del PCI, se obtuvo un valor de 26, lo que posiciona a este tramo dentro de la categoría malo.

Durante la inspección se observaron múltiples daños, como se muestran en la figura 21, que evidencian un deterioro avanzado, entre los que destacan baches, grietas de bordes, desprendimiento de agregados, agrietamiento en forma de piel de cocodrilo, así como grietas tanto longitudinales como transversales. Estos signos de desgaste indican una pérdida considerable en la capacidad estructural y funcional del pavimento, y si no se aplican medidas de intervención inmediata, es probable que el deterioro progrese rápidamente hasta requerir una rehabilitación mayor. Este tramo representa una prioridad en términos de atención técnica y asignación de recursos.

Figura 21. Fallas identificadas en Av. Monclova



Fuente: Elaboración propia.

Av. Saltillo – Av. E. López Quezada

Se llevó a cabo una inspección sobre un tramo de 2.247 kilómetros, cuyo estado actual del pavimento fue clasificado como deficiente para la circulación. A partir del análisis realizado bajo los lineamientos del PCI, se obtuvo un valor de 48, lo que confirma que este segmento presenta un nivel de conservación malo.

Si bien el valor calculado no refleja una condición crítica, la superficie de rodamiento evidencia múltiples señales de deterioro que, en ausencia de intervención, podrían provocar una degradación acelerada. Entre los daños registrados durante el levantamiento como se muestran en la figura 22, se identificaron agrietamientos tipo piel de cocodrilo, agrietamiento por bloque, desprendimiento de material superficial y presencia de parches, incluyendo aquellos generados por cortes de servicio.

Figura 22. Fallas identificadas en Av. Saltillo.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado el proceso de inspección y cálculo del PCI en cada uno de los tramos seleccionados, se consolidaron los resultados individuales en la tabla 7. que se presenta a continuación. Esta tabla permite observar de forma comparativa los valores obtenidos en cada unidad de muestreo, así como el PCI general correspondiente a cada vialidad evaluada.

La tabla 7. también evidencia la variabilidad en el deterioro dentro de un mismo tramo, mostrando unidades con altos niveles de daño y otras con condiciones aceptables. Esto resalta la importancia de realizar evaluaciones por unidad de muestreo y no limitarse a valoraciones generales por tramo completo, ya que permite una planificación más precisa y focalizada de las intervenciones de mantenimiento.

Tabla 7. Resumen de las vialidades evaluadas con PCI tradicional.

Método Tradicional					
Unidad de muestreo	PCI				
	Av. José Joaquín	Av. Ignacio	Av. José Antonio	Av. Monclova	Av. Saltillo
1	58	20	95	6	31
2	70	30	46	7	55
3	56	29	38	20	50
4	57	10	5	24	55
5	60	33	58	60	60
6	56	20	5	59	3
7	17	33	99	17	24
8	47	29	100	5	14
9	55	5	7	11	15
10	15	45	35	0	5
11	40	14	2	5	13
12	10	40	0	4	22
PCI general:	45	26	41	18	29

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Evaluación VANT

Av. José Joaquín Fernández de Lizardi

Se llevó a cabo una inspección aérea con apoyo de un VANT sobre un tramo de 2.259 kilómetros, cuyo estado actual del pavimento fue clasificado como regular. A través de las imágenes capturadas mediante el dron y el posterior análisis bajo los lineamientos del PCI, se obtuvo un valor de 46, lo que confirma que este segmento requiere mantenimiento rutinario.

El uso del VANT permitió identificar de forma detallada y precisa múltiples señales de deterioro superficial, evidenciando condiciones que podrían derivar en una degradación acelerada si no se interviene oportunamente. Entre los daños detectados se encuentran agrietamientos tipo piel de cocodrilo, agrietamiento por bloque, grietas longitudinales y transversales, desprendimiento de material superficial, como se puede observar en la figura

23. Donde se muestra la falla de agrietamiento de bloque en una severidad alta en toda el área de la unidad de muestreo.

Figura 23. Ejemplo de unidad de muestreo #4 del tramo.



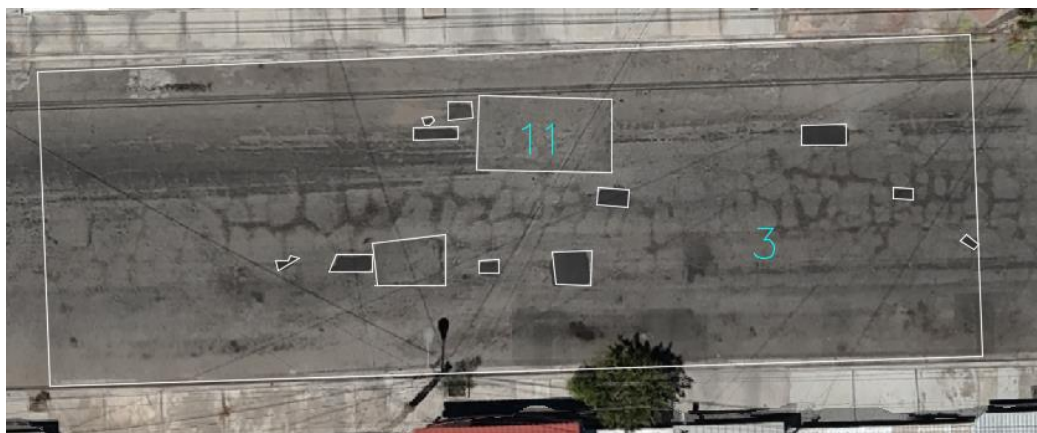
Fuente: Elaboración propia.

Av. Ignacio López Rayón

Mediante el uso de un VANT, se efectuó una revisión aérea a lo largo de un tramo de 2.254 kilómetros para evaluar el estado del pavimento. El análisis de las imágenes obtenidas permitió determinar que el nivel de conservación del tramo se encuentra en condición muy malo, asignándole un valor PCI de 25, lo cual indica la necesidad de rehabilitación inminente.

El despliegue del dron facilitó la detección minuciosa de daños superficiales significativos, proporcionando una visión clara del deterioro existente. Entre los principales tipos de afectaciones documentadas se identificaron fisuras en forma de piel de cocodrilo, agrietamiento en bloques, desprendimiento del recubrimiento superficial, hundimiento, grietas longitudinales y transversales y múltiples baches, como se puede observar en la figura 24. Donde se observan las fallas agrietamiento de piel de cocodrilo, agrietamiento de bloque y parcheo.

Figura 24. Ejemplo de unidad de muestreo #12 del tramo.



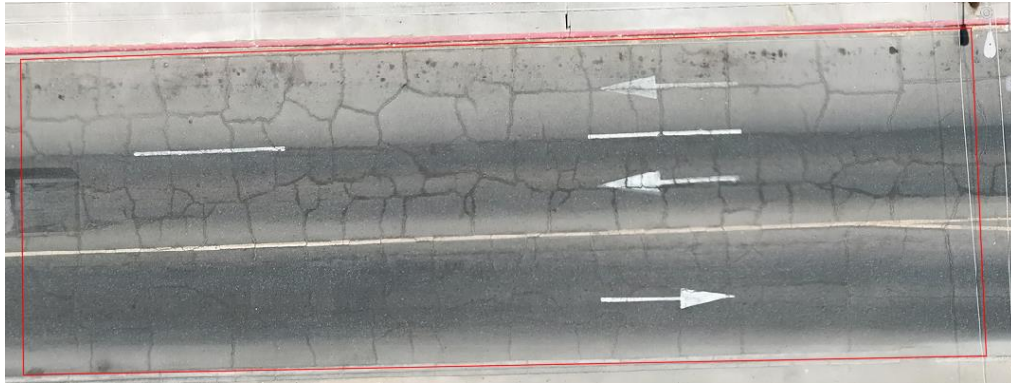
Fuente: Elaboración propia.

Av. José Antonio Torres

Se realizó un levantamiento aéreo mediante un VANT en un tramo de 2.245 kilómetros para evaluar el estado del pavimento. A partir del procesamiento de las imágenes captadas por el dron, se determinó un PCI de 40, lo cual clasifica la superficie como regular y señala la necesidad de mantenimiento rutinario, así como reparaciones puntuales en áreas críticas.

El uso del VANT permitió identificar con claridad zonas con agrietamientos por bloque, piel de cocodrilo, grietas longitudinales y transversales y desprendimiento de agregados. Esta herramienta tecnológica facilitó el mapeo visual de los daños, permitiendo establecer prioridades de intervención antes de que el deterioro evolucione hacia condiciones más severas que impliquen mayores costos de rehabilitación, como se puede observar en la figura 25. La falla de agrietamiento de bloque con nivel de severidad alto, en toda el aérea de la unidad de muestreo.

Figura 25. Ejemplo de unidad de muestro #2 del tramo.



Fuente: Elaboración propia.

Av. Monclova – Av. Miguel Bravo

Se llevó a cabo una evaluación aérea con VANT en un tramo de 2.246 kilómetros, obteniendo un PCI considerablemente bajo, lo que confirma un estado muy malo y la urgente necesidad de intervenciones correctivas extensas para restaurar la funcionalidad de la vialidad.

El análisis de las imágenes captadas reveló un deterioro significativo, caracterizado por la presencia de baches en distintos puntos, grietas de borde, fisuras longitudinales y transversales, agrietamiento tipo piel de cocodrilo y un desprendimiento notable de agregados, como se puede observar en la figura 26. Las fallas identificadas en esta unidad de muestreo son el agrietamiento de bloque, desprendimiento de agregados y dos parches, en toda el área de unidad de muestreo.

Figura 26. Ejemplo de unidad de muestreo #4 del tramo.



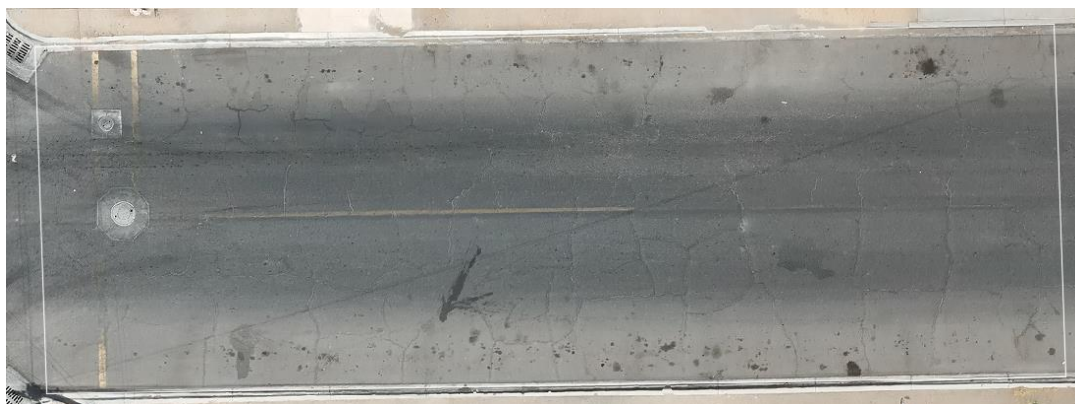
Fuente: Elaboración propia.

Av. Saltillo – Av. E. López Quezada

Se realizó un levantamiento aéreo con apoyo de un VANT en un tramo de 2.247 kilómetros para evaluar el estado del pavimento. El procesamiento de las imágenes obtenidas determinó un PCI de 28, clasificando la vialidad como mala y evidenciando la necesidad de acciones correctivas extensas.

El análisis mostró un deterioro considerable con múltiples señales de desgaste estructural, entre las cuales destacan agrietamiento tipo piel de cocodrilo, fisuración por bloque, desprendimiento de agregados, así como parches y parches por corte de utilidad en diversas zonas. Dado el avance del deterioro, se recomienda la implementación de estrategias de rehabilitación que permitan recuperar la funcionalidad del tramo y prevenir daños más severos, como se muestra en la figura 27. La falla que se presenta es agrietamiento de bloque en toda el área con un nivel de severidad medio.

Figura 27. Ejemplo de unidad de muestreo #3 del tramo



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra la tabla 8. Donde Una vez realizado el proceso de inspección y cálculo del PCI en cada uno de los tramos seleccionados, se consolidaron los resultados individuales en la tabla que se presenta a continuación.

Tabla 8. Resumen de vialidades evaluadas con VANT.

Método Tradicional					
Unidad de muestreo	PCI				
	Av. José Joaquín	Av. Ignacio	Av. José Antonio	Av. Monclova	Av. Saltillo
1	58	25	90	5	28
2	68	26	46	5	49
3	55	28	38	25	58
4	58	15	5	25	55
5	62	28	58	58	58
6	58	25	5	58	3
7	20	28	99	20	20
8	50	28	100	4	13
9	53	5	7	9	15
10	18	35	35	0	6
11	35	12	2	5	10
12	16	40	0	4	20
PCI general:	46	25	40	18	28

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla permite observar de forma comparativa los valores obtenidos en cada unidad de muestreo, así como el PCI general correspondiente a cada vialidad evaluada. Esto resalta la importancia de realizar evaluaciones por unidad de muestreo y no limitarse a valoraciones generales por tramo completo, ya que permite una planificación más precisa y focalizada de las intervenciones de mantenimiento.

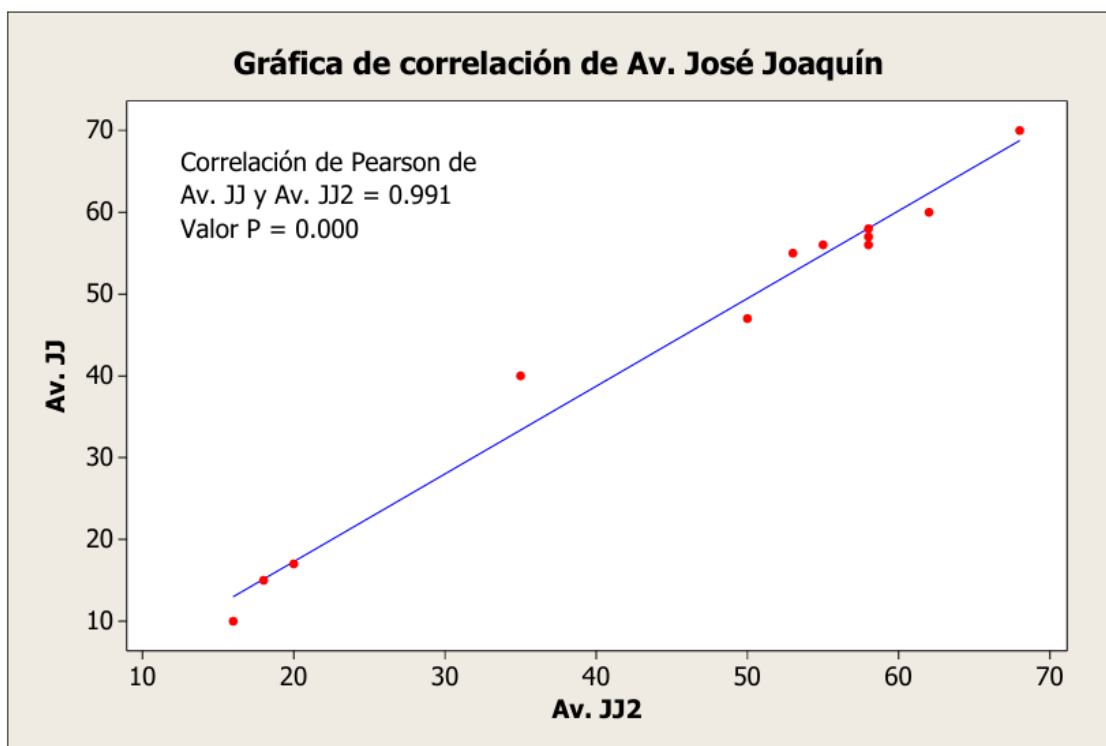
4.2.3 Correlación entre métodos

Con el propósito de evaluar la consistencia entre los resultados obtenidos mediante distintos métodos de inspección y análisis del estado de las vialidades, se aplicó la prueba de correlación de Pearson entre los datos obtenidos mediante dos enfoques comparables para cada una de las avenidas seleccionadas. Esta prueba permite cuantificar el grado de asociación lineal entre los conjuntos de datos, donde un coeficiente de correlación cercano a 1 indica una alta concordancia entre los métodos aplicados. A continuación, se presentan los resultados de las correlaciones para cada avenida, acompañados de sus respectivas gráficas y análisis.

Av. José Joaquín Fernández de Lizardi

En la figura 28. Se observa la gráfica de correlación del tramo Av. José Joaquín, la cual muestra una nube de puntos (en rojo) alineada estrechamente a lo largo de una línea azul de tendencia lineal positiva. El eje X representa los valores obtenidos en la segunda evaluación (Av. JJ2, datos obtenidos con el método VANT), mientras que el eje Y muestra los valores de la primera evaluación (Av. JJ, datos obtenidos con el método tradicional).

Figura 28. Correlación del tramo Av. José Joaquín Fernández de Lizardi.



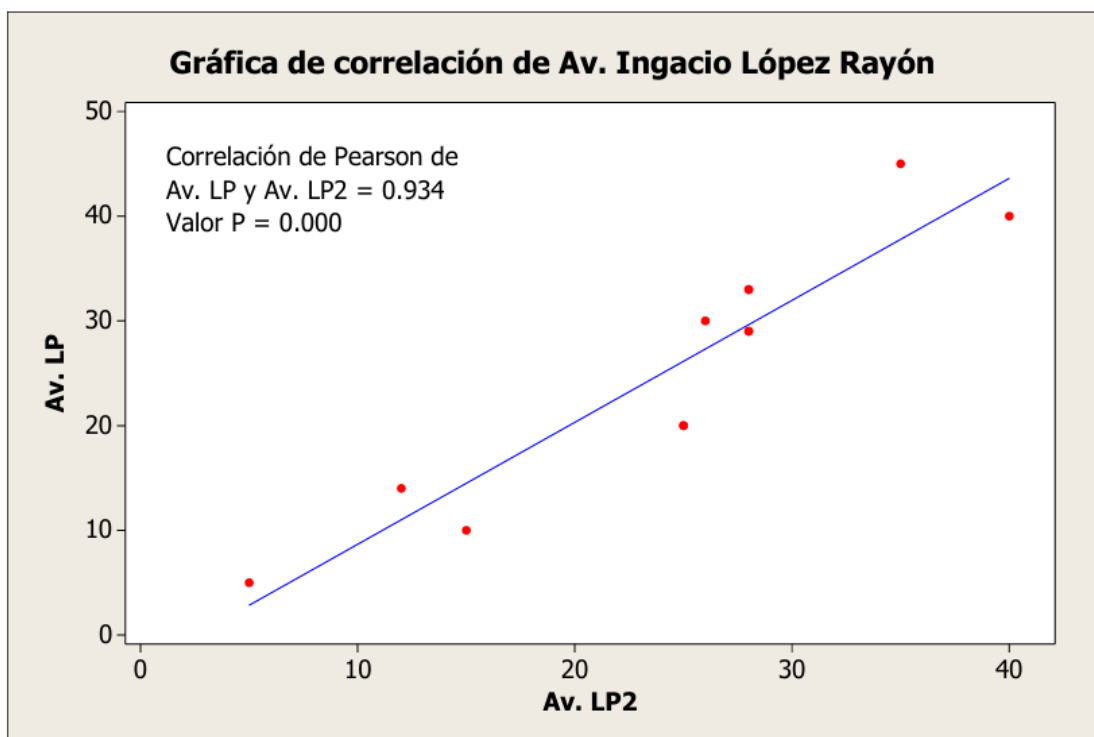
Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de correlación de Pearson es 0.991, con un valor $p = 0.000$, lo que indica una correlación extremadamente fuerte y estadísticamente significativa entre ambas evaluaciones. Esto refleja una gran consistencia en los métodos empleados y sugiere que la metodología de medición es confiable en esta vialidad. La conclusión es que los resultados son robustos y replicables para la Av. José Joaquín.

Av. Ignacio López Rayón

En la figura 29. Se observa la gráfica de correlación del tramo Av. Ignacio López Rayón, Se visualizan puntos rojos distribuidos a lo largo de la línea de tendencia, aunque con una mayor dispersión que en la figura anterior. Los valores en los ejes X (Av. LP2, datos obtenidos con el método VANT) y Y (Av. LP, datos obtenidos con el método tradicional) cubren un rango más amplio, especialmente en valores bajos y medios.

Figura 29. Correlación de Av. Ignacio López Rayón.



Fuente: Elaboración propia.

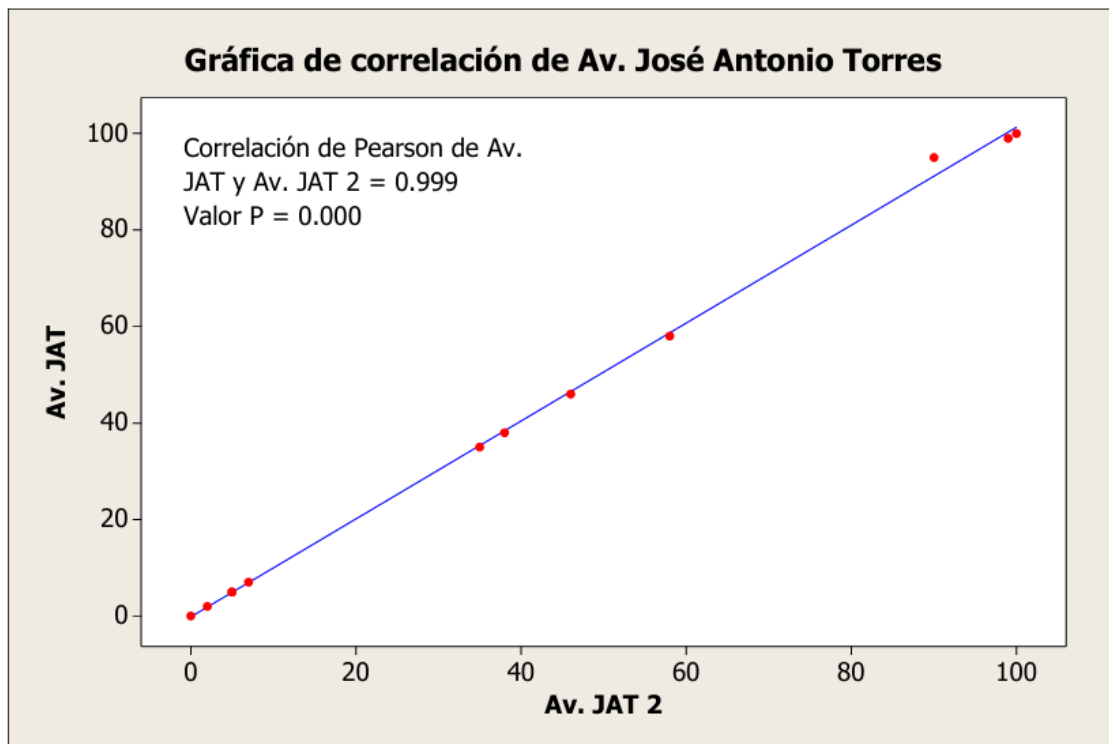
El coeficiente de 0.934, con un valor p de 0.000, lo cual indica una correlación positiva fuerte. Aunque ligeramente inferior a la obtenida en otras avenidas, el valor sigue siendo alto, mostrando que existe una buena concordancia entre los dos conjuntos de datos, aunque con una dispersión un poco mayor en los puntos.

Av. José Antonio Torres

En la figura 30. Se observa la gráfica de correlación del tramo Av. José Antonio Torres, los puntos en esta gráfica están casi perfectamente alineados sobre la línea azul, cubriendo un

rango amplio de valores tanto en X (Av. JAT2, datos obtenidos con el método VANT) como en Y (Av. JAT, datos obtenidos con el método tradicional).

Figura 30. Correlación de Av. José Antonio Torres



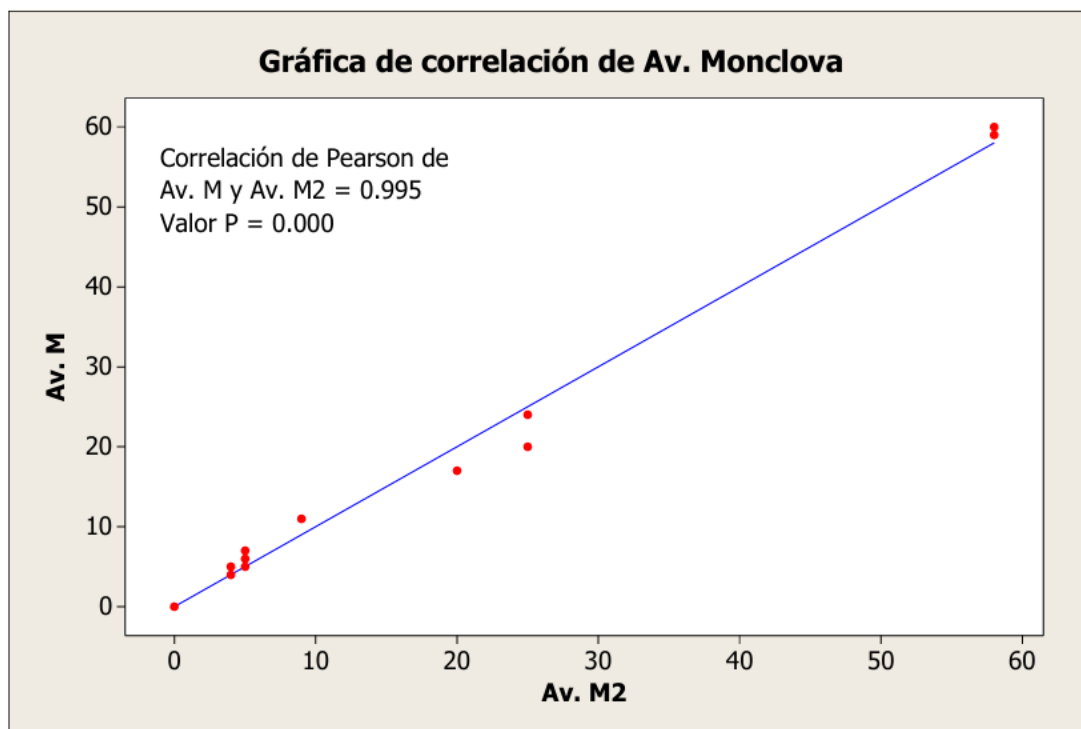
Fuente: Elaboración propia

El valor de correlación es 0.999, lo que representa una correspondencia prácticamente igual entre ambos métodos.

Av. Monclova – Av. Miguel Bravo

En la figura 31. Se observa la gráfica de correlación del tramo Av. Monclova – Av. Miguel Bravo, se observa un patrón alineado positivamente con los puntos rojos siguiendo muy de cerca la línea de tendencia, aunque con ligeras separaciones en valores intermedios. El rango de datos en el eje X (Av. M2, datos obtenidos con el método VANT), y en el eje Y (Av. M, datos obtenidos con el método tradicional).

Figura 31. Correlación de Av. Monclova – Av. Miguel Bravo.



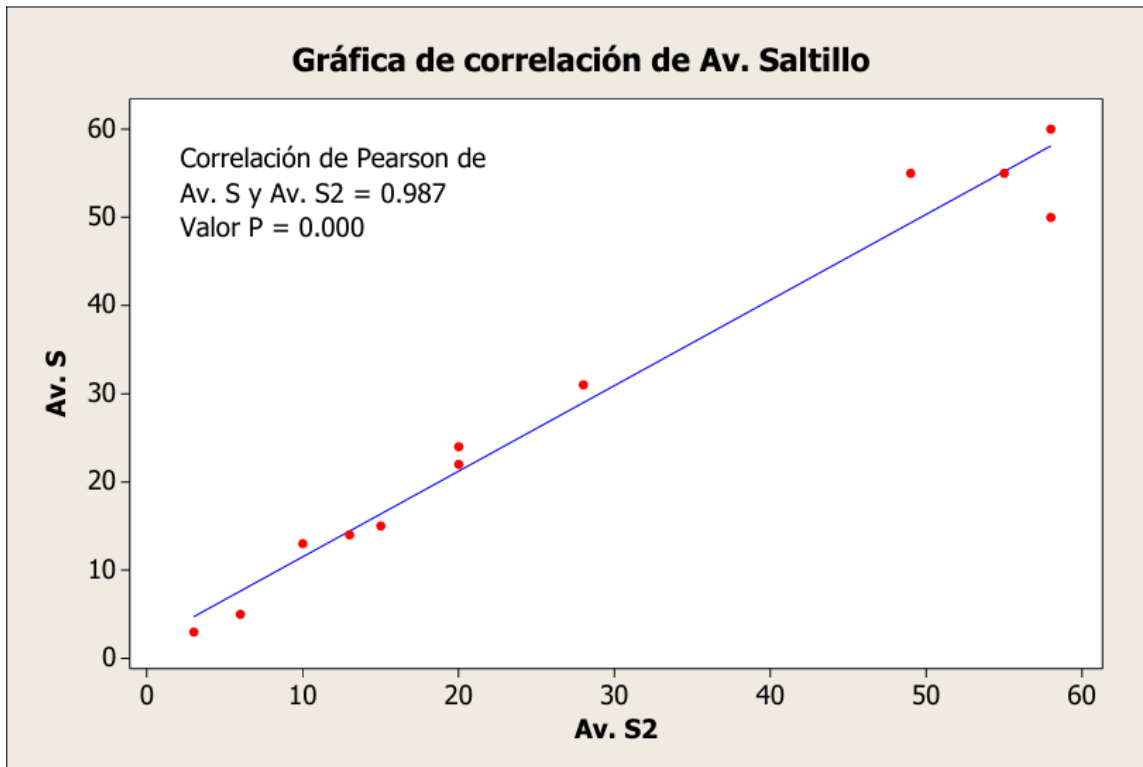
Fuente: Elaboración propia.

La correlación de 0.995 indica una relación muy fuerte. La ligera dispersión en algunos tramos medios no afecta de manera significativa la fiabilidad del resultado, lo que valida el método como adecuado para este entorno.

Av. Saltillo – Av. E. López Quezada

En esta figura 32 se muestra la relación entre los datos obtenidos en dos mediciones sobre la Av. Saltillo (Av. S (datos obtenidos con el método tradicional) y Av. S2(datos obtenidos con el método VANT)). Los puntos rojos se distribuyen de manera creciente, siguiendo una tendencia lineal marcada por la línea azul, aunque se observa una ligera dispersión, especialmente en valores intermedios y altos.

Figura 32. Correlación de Av. Saltillo – Av. E. López Quezada



Fuente: Elaboración propia

El análisis arrojó un coeficiente de correlación de 0.987, lo que indica una relación lineal muy fuerte y estadísticamente significativa entre ambas mediciones. Aunque algunos puntos se alejan levemente de la línea de tendencia, la asociación general se mantiene sólida. En conclusión, los métodos aplicados en esta avenida son altamente compatibles, lo que permite confiar en los datos obtenidos.

Los resultados obtenidos en este apartado demuestran una alta consistencia entre las mediciones realizadas mediante los diferentes métodos aplicados para evaluar el estado del pavimento en los cinco tramos analizados, todos con significancia estadística, lo que indica una relación lineal positiva fuerte en todos los casos.

El promedio general de correlación fue de 0.981 como se observa en la tabla 9, lo cual respalda de manera contundente la validez y confiabilidad del procedimiento de evaluación utilizado en este estudio.

Tabla 9. Confiabilidad de método

Confiabilidad de método		
ID	Nombre de tramo	Correlación
1	Av. José Joaquín Fernández de Lizardi	0.991
2	Av. Ignacio López Rayón	0.934
3	Av. José Antonio Torres	0.999
4	Av. Monclova – Av. Miguel Bravo	0.995
5	Av. Saltillo - Av. E. López Quezada	0.987
Promedio general de correlación:		0.9812

Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, los altos niveles de correlación observados refuerzan la robustez de la metodología empleada, validan la reproducibilidad de los resultados obtenidos y confirman que los métodos utilizados son adecuados para la caracterización del estado superficial del pavimento urbano en las condiciones del caso de estudio.

4.3 Análisis de conservación

4.3.1 Diagnóstico del estado del pavimento

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del método del PCI con el VANT como se muestra en la tabla 10, revelan un panorama crítico en cuanto al estado de conservación de las vialidades evaluadas. En total, se inspeccionaron cinco segmentos viales, cuyos valores de PCI oscilan entre 18 y 46 puntos, ubicándose todos dentro de las categorías D, E y F, lo que representa condiciones deficientes, malas y muy malas, respectivamente. Esta distribución refleja una clara predominancia de deterioro funcional y estructural, que compromete seriamente la calidad del servicio vial y la seguridad de los usuarios.

Tabla 10. Clasificación del pavimento

Clasificación del pavimento				
N°	Nombre de la vialidad	PCI	Categoría	Fallas identificadas
1	Av. José Joaquín Fernández de Lizardi	46	D	Baches, Agrietamiento por bloque, Grieta de borde, Piel de cocodrilo, Grietas longitudinales y transversales, Desprendimiento de agregados.
2	Av. Ignacio López Rayón	25	E	Baches, Abultamiento y hundimiento, Grieta de borde, Piel de cocodrilo, Grietas longitudinales y transversales, Desprendimiento de agregados.
3	Av. José Antonio Torres	40	D	Agrietamiento por bloque, Piel de cocodrilo, Parcheo y parcheo de corte de utilidad, Exudación.
4	Av. Monclova - Av. Miguel Bravo	18	F	Baches, Grieta de borde, Piel de cocodrilo, Grietas longitudinales y transversales, Desprendimiento de agregados.
5	Av. Saltillo - Av. E. López Quezada	28	E	Piel de cocodrilo, Agrietamiento por bloque, Desprendimiento de agregados, Parcheo y parcheo de corte de utilidad.

Fuente: Elaboración propia.

los resultados obtenidos confirman la necesidad urgente de implementar estrategias de conservación más estructuradas y preventivas, priorizando aquellas vialidades con categorías E y F, que podrían comprometer la seguridad vial y la funcionalidad urbana si no se intervienen oportunamente.

4.3.2 Formulación de estrategias

Una vez identificado el estado funcional del pavimento en los tramos analizados, y considerando los resultados del PCI junto con las fallas predominantes y el nivel de correlación entre métodos, se procedió a la formulación de estrategias de conservación

específicas para cada vialidad. Estas estrategias buscan optimizar los recursos disponibles mediante una intervención técnica adecuada al nivel de deterioro identificado, priorizando la funcionalidad, seguridad y prolongación de la vida útil del pavimento.

El enfoque adoptado se basó en los principios de conservación por niveles de servicio, integrando criterios técnicos como tipo y severidad de fallas, categoría PCI y condiciones particulares del entorno urbano. A partir de estos insumos, se definieron acciones de mantenimiento correctivo, rehabilitación parcial o reconstrucción total según el caso. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada vialidad en términos de las estrategias propuestas.

En la tabla 11, establece una correspondencia entre la categoría de condición del pavimento (de la N a la F) y la intervención recomendada según su grado de deterioro. La categorización va desde pavimentos nuevos (N), que no requieren acciones inmediatas, hasta pavimentos con daño severo (F), que exigen una reconstrucción total o parcial. Las categorías intermedias (A a E) contemplan desde el mantenimiento rutinario y preventivo hasta tratamientos más invasivos como fresado, reencarpetado o aplicación de capas de refuerzo.

Tabla 11. Plan de intervenciones por categoría.

Plan de intervenciones por categoría	
Categoría	Intervención
N	Son pavimentos nuevos por lo que no requieren intervención inmediata.
A	Requieren únicamente mantenimiento rutinario y monitoreo periódico.
B	
C	Incluye trabajos preventivos como el sellado de grietas y la aplicación de microcarpetas.
D	Involucra reparaciones locales y la aplicación de capas de refuerzo.
E	Requiere fresado y reencarpetado o reconstrucción parcial.
F	Requiere la reconstrucción total o parcial del pavimento.

Fuente: Elaboración propia.

La tabla permite definir de manera clara y jerárquica el tipo de intervención que debe aplicarse con base en el estado del pavimento diagnosticado. Es una herramienta clave para la toma de decisiones técnicas y presupuestales, ya que orienta los trabajos correctivos o

preventivos de acuerdo con el nivel de deterioro. Sirve también como puente directo entre los resultados del PCI y la planificación de conservación.

Por otra parte, la tabla 12, detalla las alternativas de tratamiento disponibles para la conservación del pavimento, agrupadas en cinco grandes categorías: mantenimiento rutinario, mantenimiento preventivo, rehabilitación sobre carpeta, rehabilitación con microcarpeta y reconstrucción. Para cada alternativa se especifican:

- Tratamiento técnico específico (bacheo, sellado de grietas, microcarpeta, fresado, etc.),
- Criterios de aplicación (como cantidad de baches o porcentaje de área dañada),
- Costos unitarios estimados en pesos mexicanos por metro cuadrado (\$/m²).

Los costos utilizados para este estudio son del año 2024 consultados en los presupuestos de obras públicas de Mexicali.

Tabla 12. Intervenciones utilizadas en la evaluación de los tramos

Alternativa	Tratamiento	Criterios	Costos	Unidad
Mantenimiento rutinario	Bacheo superficial	Baches \geq 10 baches (km)	\$ 356.37	m ²
	Sellado de grietas	Grietas \geq 10% de tramo	\$ 22.00	m ²
Mantenimiento preventivo	Bacheo superficial	Baches \geq 10 baches (km)	\$ 356.37	m ²
	Sellado de grietas	Grietas \geq 10% de tramo	\$ 22.00	m ²
	Microcarpeta	Área total dañada \geq 5%	\$ 312.53	m ²
Rehabilitación sobre carpeta	Bacheo superficial	Baches \geq 10 baches (km)	\$ 356.37	m ²
	Sellado de grietas	Grietas \geq 10% de tramo	\$ 22.00	m ²
	Sobre carpeta	IRI \geq 6	\$ 138.88	m ²
Rehabilitación de microcarpeta	Microcarpeta	Área total dañada \geq 5%	\$ 312.53	m ²
Reconstrucción	Fresado	IRI \geq 6	\$ 514.42	m ²
	Encarpetado	IRI \geq 6	\$ 723.87	m ²

Fuente: Elaboración propia

Esta tabla ofrece una guía operativa precisa para seleccionar el tipo de intervención más adecuada según la condición física observada y los criterios técnicos establecidos. Además, al incorporar los costos unitarios, permite estimar el presupuesto necesario para ejecutar las acciones propuestas, lo cual es fundamental para una planificación eficiente de recursos. La combinación de criterios técnicos y económicos fortalece la toma de decisiones para priorizar las estrategias de conservación vial.

4.3.3 Propuestas de intervención

Con base en la clasificación del estado del pavimento obtenida mediante el análisis del PCI y apoyado en los lineamientos técnicos del programa HDM-4 se desarrollaron proyecciones de desempeño para cada una de las vialidades seleccionadas. Estas simulaciones permiten visualizar el comportamiento de la regularidad media (IRI) a lo largo del tiempo bajo dos escenarios:

- Escenario base, sin intervención.
- Escenario con intervención, aplicando estrategias de mantenimiento acordes con la categoría del pavimento.

La herramienta HDM-4 ofrece un modelo técnico robusto para la predicción del deterioro vial, permitiendo evaluar el impacto de diferentes alternativas de intervención a lo largo de un horizonte de análisis de 15 años (2025-2039).

Esta sección presenta los resultados de estas simulaciones iniciando con las vialidades clasificadas en categoría D. Las gráficas muestran cómo, en ausencia de intervención, la condición del pavimento se deteriora aceleradamente, mientras que con una intervención oportuna es posible mantener una condición adecuada y estable en el tiempo.

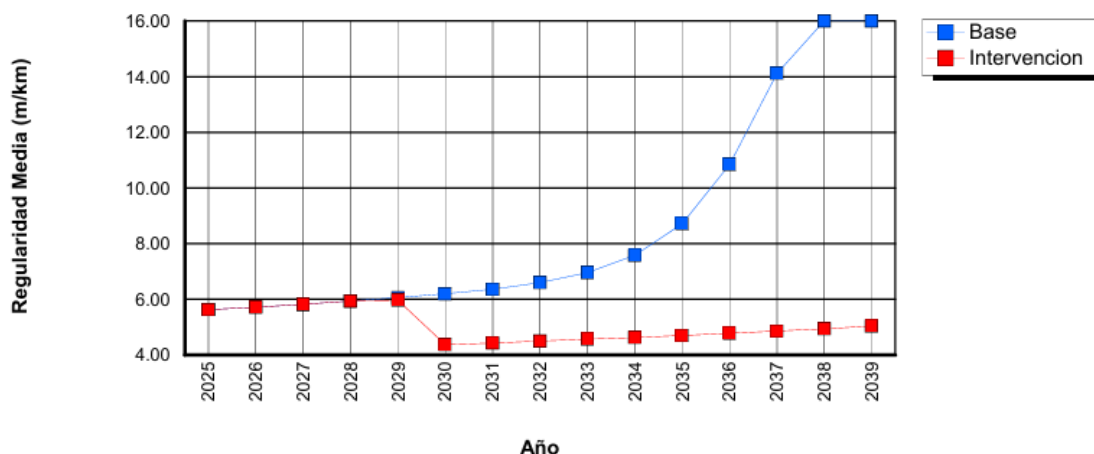
A continuación, se describen los resultados específicos para los tramos de categoría D.

En la figura 33, la gráfica presenta la evolución de la regularidad media (IRI) desde el año 2025 hasta 2039. Se muestran dos curvas: la curva azul representa el escenario base, es decir, sin intervención y la curva roja representa el escenario con intervención. En el escenario base, el IRI inicia alrededor de 5.58 m/km y muestra un crecimiento progresivo a partir del año 2030, alcanzando valores superiores a 15 m/km hacia 2038-2039, lo cual indica un deterioro severo del pavimento. En contraste, la curva roja permanece prácticamente estable en un

valor cercano a 5.0 m/km durante todo el horizonte de análisis, demostrando que la intervención mantiene la vialidad en buen estado.

Figura 33. Grafica de intervención para categoría D tramo Av. José Antonio Torres

Detalles del Tramo:			
ID: Av. JAT VANT	Clase de Carretera: Tertiary or Local	Rampa + Pendiente: 1.00 m/km	
Descripción: Av. Jose Antonio Torres VANT	Longitud: 2.24 km	Curvatura: 3.00 %/km	
	Ancho: 7.00 m		



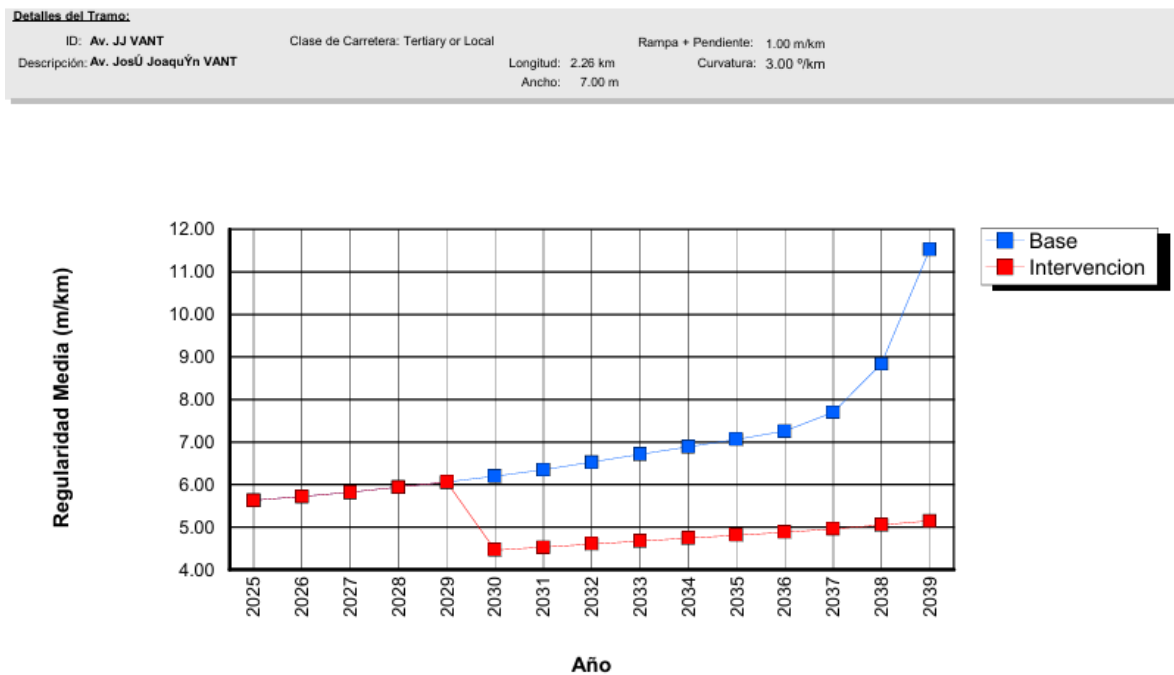
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que, si no se aplica ninguna intervención, la condición del pavimento en la Av. José Antonio Torres se deteriorará rápidamente a partir del año 2030, alcanzando niveles críticos de irregularidad. En cambio, la estrategia de intervención propuesta logra conservar una regularidad adecuada y constante, evitando el deterioro acelerado. Esto justifica plenamente la necesidad de aplicar reparaciones locales y capas de refuerzo de manera oportuna en este tramo clasificado en categoría D, asegurando su funcionalidad y prolongando su vida útil.

Por otra parte, también en la categoría D. La figura 34, presenta una gráfica la cual proyecta la evolución del IRI en la Av. José Joaquín desde 2025 hasta 2039, también bajo dos escenarios: línea azul (Base): sin intervención y línea roja (Intervención): con aplicación de estrategias de mantenimiento. En el escenario sin intervención, la curva azul muestra un incremento paulatino del IRI a partir del año 2028, alcanzando un valor de casi 12 m/km hacia el año 2039, reflejando un deterioro moderado a severo.

Por otro lado, la curva roja permanece prácticamente constante, ligeramente por debajo de los 6 m/km, lo que indica que el pavimento se mantiene dentro de los rangos aceptables de regularidad durante todo el periodo de análisis.

Figura 34. Grafica de intervención para categoría D tramo Av. José Joaquín Fernández de Lizardi.



Fuente: Elaboración propia.

La proyección revela que una falta de intervención en la Av. José Joaquín provocaría un deterioro progresivo que, aunque más lento que en la avenida anterior, también comprometería la calidad del rodamiento a mediano plazo. Sin embargo, con la estrategia propuesta intervenciones, se logra mantener un IRI estable, asegurando una superficie de rodamiento funcional por más de 15 años. Por tanto, se confirma que las acciones de conservación asociadas a la categoría D son técnicas y económicamente justificadas para este tramo.

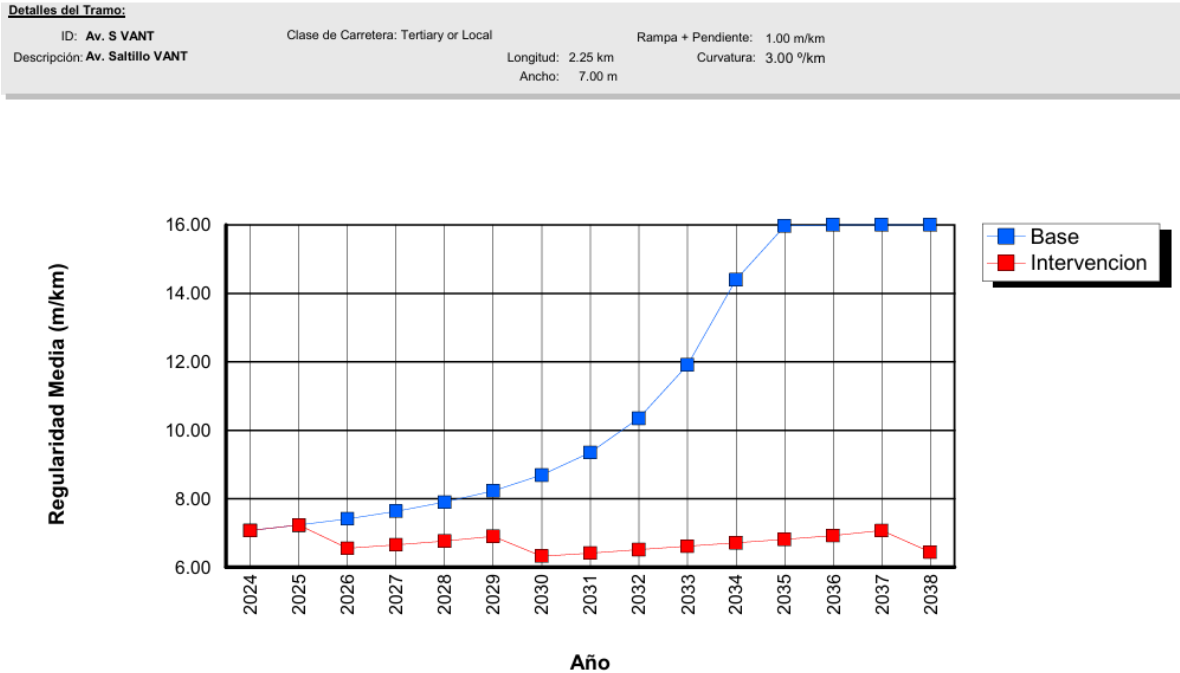
Esta sección presenta los resultados de las simulaciones correspondientes a las vialidades clasificadas en categoría E, las cuales requieren tratamientos más intensivos como fresado, reencarpado o reconstrucción parcial. Las gráficas obtenidas a través del programa HDM-4 muestran que, si no se implementan intervenciones, el pavimento experimenta un deterioro

progresivo que compromete rápidamente su funcionalidad. En cambio, con una intervención adecuada, es posible restaurar y mantener la regularidad estructural del tramo, garantizando condiciones aceptables de servicio a lo largo del tiempo.

A continuación, se presentan los resultados específicos para los tramos de categoría E.

La figura 35 se observa una gráfica donde se muestra la evolución del Índice de Regularidad Internacional (IRI) para la Av. Saltillo entre los años 2024 y 2038, bajo dos escenarios: Curva azul (Base): Representa la evolución del pavimento sin ninguna intervención. El IRI parte de un valor cercano a 6.5 m/km y presenta un incremento constante a partir de 2028, alcanzando su punto máximo de 16 m/km en 2035, lo cual indica una condición crítica del pavimento que se mantiene hasta el final del periodo analizado y la curva roja (Intervención): Representa el escenario con intervención. El IRI se mantiene estable a lo largo de todo el periodo, con valores próximos a 6.0 m/km, sin presentar incrementos notables, lo cual refleja una condición aceptable del pavimento con la estrategia aplicada.

Figura 35. Grafica de intervención para categoría E tramo Av. Saltillo.

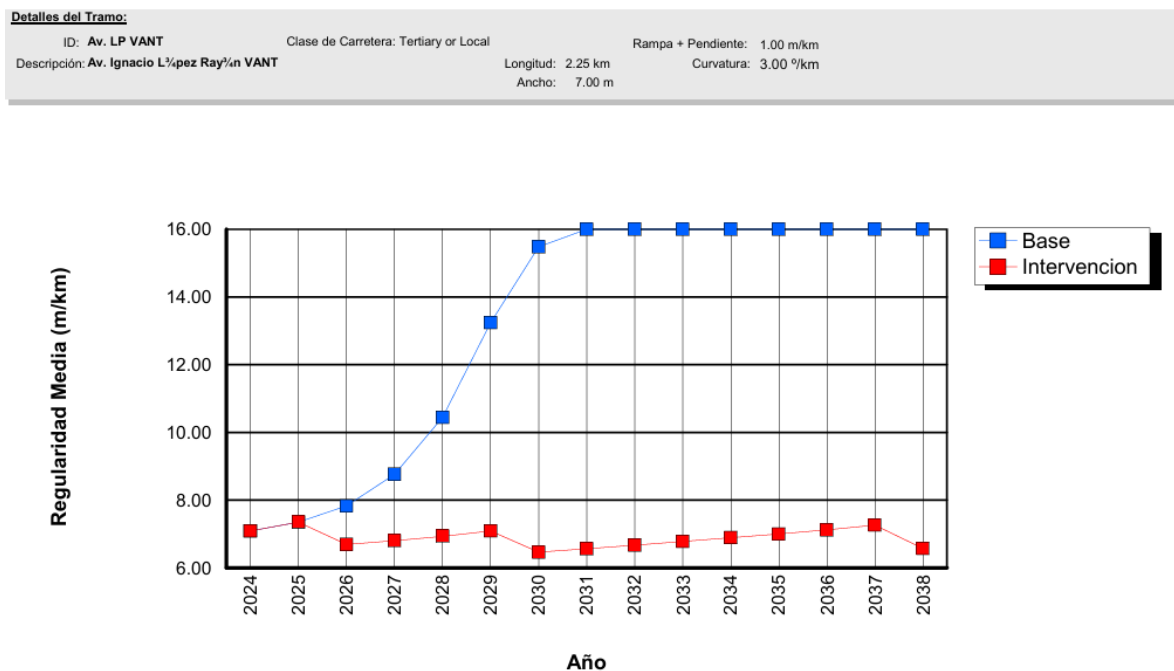


Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indican que, de no aplicarse ninguna intervención, la Av. Saltillo presentaría un deterioro progresivo que llevaría a una pérdida funcional grave del pavimento en aproximadamente 10 años. Esta evolución justifica su clasificación en la categoría E, la cual requiere intervenciones como fresado, reencarpelado o reconstrucción parcial. La simulación con intervención demuestra que es posible contener el deterioro y preservar la regularidad media en niveles aceptables durante todo el horizonte de planeación. Por lo tanto, se valida la necesidad técnica de una intervención estructural o correctiva de mediana intensidad para prolongar la vida útil del tramo y garantizar condiciones de operación seguras y eficientes.

En el siguiente tramo también de la categoría E como se muestra en la figura 36, la gráfica muestra la evolución de la regularidad media (IRI) entre 2024 y 2038 para la Av. Ignacio López Rayón. Se comparan dos escenarios: curva azul (base): sin intervención. El IRI parte de un valor cercano a 6.5 m/km en 2024 y aumenta rápidamente a partir de 2027, alcanzando el límite de 16 m/km en el año 2030, y se mantiene en ese nivel hasta 2038. Y la curva roja (intervención): con intervención el IRI permanece estable, ligeramente por debajo de los 6 m/km, sin mostrar signos de deterioro significativo durante todo el periodo analizado.

Figura 36. Grafica de intervención para categoría E tramo Av. Ignacio López Rayón.



Fuente: Elaboración propia.

La simulación revela que, sin intervención, la Av. Ignacio López Rayón alcanzaría niveles críticos de deterioro en menos de 6 años. Este comportamiento se alinea con su clasificación en categoría E, que exige fresado o reencarpetado. La intervención propuesta detiene el deterioro y mantiene una condición adecuada durante los 15 años del análisis. Se concluye que la estrategia de conservación es técnicamente necesaria y eficaz para prolongar la funcionalidad de la vialidad.

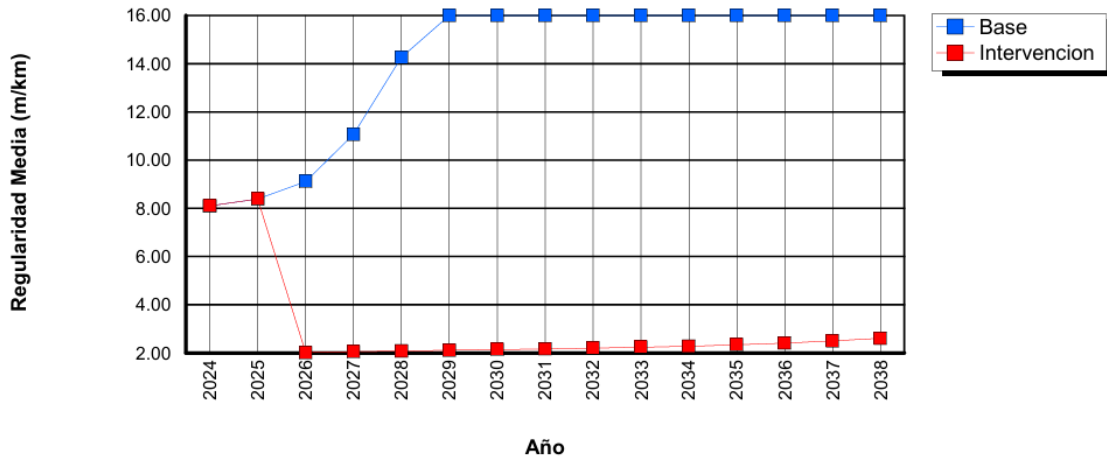
Esta sección presenta los resultados de las simulaciones para las vialidades clasificadas en categoría F, que representan las condiciones más críticas, con daño estructural severo. En estos casos, el HDM-4 proyecta un rápido deterioro de la superficie de rodamiento en ausencia de intervención, alcanzando niveles inaceptables de irregularidad en poco tiempo. La gráfica demuestra que solo mediante reconstrucciones parciales o totales del pavimento es posible revertir este proceso y restablecer la funcionalidad de la vía.

A continuación, se describen los resultados correspondientes a los tramos clasificados en categoría F.

En la figura 37, se presenta una gráfica donde se muestra la evolución del IRI para la Av. Monclova entre los años 2024 y 2038, bajo dos escenarios: Curva azul (Base): Sin intervención. El IRI parte de un valor de 8.0 m/km en 2024 y se eleva rápidamente, alcanzando el máximo de 16.0 m/km ya en el año 2027, manteniéndose en ese nivel hasta el final del horizonte de análisis. Esta evolución indica un deterioro severo y sostenido del pavimento y la curva roja (Intervención): Con intervención. El IRI muestra una caída significativa a 2.0 m/km tras la intervención en 2025 y permanece estable en ese nivel durante todo el periodo, lo que refleja una condición óptima de rodadura.

Figura 37. Grafica de intervención para categoría F tramo Av. Monclova.

Detalles del Tramo:		
ID: E-4	Clase de Carretera: Tertiary or Local	Rampa + Pendiente: 1.00 m/km
Descripción: Av. Monclova	Longitud: 2.47 km	Curvatura: 3.00 %/km
	Ancho: 9.00 m	



Fuente: Elaboración propia.

La Av. Monclova, clasificada en categoría F, presenta condiciones críticas desde el inicio del periodo de análisis, con un deterioro acelerado que llevaría a la inoperabilidad de la vialidad si no se actúa oportunamente. La simulación confirma que solo una intervención de tipo estructural profunda, como la reconstrucción parcial, es capaz de revertir esta situación. La mejora drástica en el IRI tras la intervención evidencia su efectividad para restituir la funcionalidad de la vía y mantenerla en estado óptimo a largo plazo.

Cronograma de intervenciones

Como parte de la formulación de estrategias de conservación y con base en los resultados obtenidos mediante el análisis del estado del pavimento y las simulaciones proyectadas en HDM-4, se elaboró un cronograma de actividades que organiza de forma clara y estructurada las acciones de intervención para cada vialidad evaluada. La tabla 13 presenta información relevante como el nombre del tramo, el tipo de rodadura, la longitud, el año programado de intervención, la descripción de las actividades y la categoría de deterioro asignada a cada vialidad según el índice PCI.

Este cronograma permite visualizar de manera secuencial y programada las actividades que deberán ejecutarse a lo largo del periodo de planeación, asignando las acciones técnicas más adecuadas a cada caso, tales como sellado de grietas, aplicación de microcarpeta, sobrecarpeta o reconstrucción parcial.

Tabla 13. Cronograma de intervenciones

Alternativa	Tramo	Tipo de rodadura	Longitud (Km)	Año	Descripción	Categoría
Intervención	Av. José Antonio Torres	Bituminosa	2.24	2028	Sellado de grietas	D
				2029	Sobre carpeta Prep. Rep. Bordes	
	Av. José Joaquín Fernandez	Bituminosa	2.26	2029	Sobre carpeta Prep. Rep. Bordes	D
	Av. Ignacio López Rayón	Bituminosa	2.25	2025	Microcarpeta Prep. Bacheo Prep. Rep. Bordes	E
				2029	Microcarpeta Prep. Rep. Bordes	
				2037	Microcarpeta Prep. Sellado fis. Prep. Rep. Bordes	
	Av. Saltillo	Bituminosa	2.25	2025	Microcarpeta Prep. Bacheo Prep. Rep. Bordes	E
				2029	Microcarpeta Prep. Rep. Bordes	
				2037	Microcarpeta Prep. Sellado fis. Prep. Rep. Bordes	
	Av. Monclova	Bituminosa	2.47	2025	Reconstrucción parcial	F

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 13, del cronograma de actividades refleja una planificación técnica y temporal coherente con el diagnóstico previo del estado del pavimento. Se observa que las vialidades clasificadas en categorías D y E serán objeto de intervenciones escalonadas, combinando acciones de mantenimiento correctivo y preventivo, mientras que el tramo clasificado como

categoría F (Av. Monclova) será atendido desde el inicio del periodo mediante una reconstrucción parcial, debido a su condición crítica.

El diseño de este cronograma permite una gestión eficiente de los recursos, evita acumulación de deterioro a largo plazo y facilita el seguimiento técnico de las intervenciones, promoviendo la sostenibilidad del sistema vial. Asimismo, la repetición periódica de tratamientos en tramos como Av. Saltillo e Ignacio López Rayón garantiza la conservación continua de la infraestructura.

4.3.4 Procedimiento de conservación asistido por VANT

Como parte del plan de conservación de vialidades, en esta sección se presenta el proceso planificado de intervenciones, incluyendo la metodología para un tratamiento optimizado, desarrollada con la ayuda de análisis aéreos y resultados de inspecciones visuales obtenidas de VANT. La Tabla 14 identifica el número de acciones planificadas, desglosadas por sección y por categoría general de pavimento, y el tipo de trabajo requerido identificado en cada segmento.

Las intervenciones propuestas están en consonancia con el nivel de deterioro encontrado (seis niveles de la A a la F, así como secciones de tipo N) y abarcan desde tratamientos preventivos, como el sellado de grietas, hasta trabajos más extensos, como el fresado, recarpeteo, superposición o reconstrucción parcial. Y, por último, la programación es coherente con una visión a medio y largo plazo hacia el mantenimiento, escalonando las acciones para optimizar recursos y maximizar la vida útil de cada vialidad. Este método se basa en datos georreferenciados y en evidencia de tecnología adquirida mediante vuelos VANT, lo que proporciona una planificación más precisa y sistemática.

Tabla 14. Planeación de intervenciones para cada tipo de categoría.

Alternativa	Tipo de rodadura	Categoría	Año	Descripción
Intervención	Bituminosa	A1	2026	Sellado de grietas
			2027	Microcarpeta, Prep. Sellado fis.
			2028	Sellado de grietas
			2029	Bacheo superficial
			2030	Micro carpeta
		A2	2027	Bacheo superficial aislado
			2028	Bacheo superficial aislado
			2029	Bacheo superficial aislado
			2030	Microcarpeta, Prep. Bacheo
		A3	2030	Micro carpeta
		B1	2025	Micro carpeta
			2032	Micro carpeta
		B2	2025	Microcarpeta, Prep. Rep. Bordes
			2032	Microcarpeta, Prep. Sellado fis.
			2038	Microcarpeta
		B3	2025	Micro carpeta (Prep. Rep. Bordes)
			2033	Micro carpeta (Prep. Sellado fis.)
		C1	2025	Micro carpeta
			2032	Micro carpeta
		C2	2025	Microcarpeta, Prep. Rep. Bordes
			2033	Microcarpeta, Prep. Sellado fis.
		C3	2025	Micro carpeta (Prep. Rep. Bordes)
			2033	Micro carpeta (Prep. Sellado fis.)
		D1	2025	Sobrecarpeta
			2035	Sellado de grietas
		D2	2025	Sobrecarpeta
			2031	Sellado de grietas
			2035	Sellado de grietas
		D3	2027	Sobrecarpeta
			2036	Sellado de grietas
			2038	Sellado de grietas
		E1	2025	Fresado y reenc
			2035	Micro carpeta
		E2	2025	Fresado y reenc
			2035	Microcarpeta
		E3	2025	Fresado y Reencarpetado
2036	Micro carpeta (Prep. Sellado fis.)			

	F1	2025	Reconstrucción
		2036	Microcarpeta
	F2	2025	Microcarpeta, Prep. Bacheo, Prep. Rep. Bordes
		2029	Microcarpeta
		2037	Microcarpeta, Prep. Sellado fis.
	F3	2030	Reconstrucción Parcial
	N1	2027	sellado de grietas
		2028	Micro carpeta
		2029	sellado de grietas
		2030	sellado de grietas
		2037	Micro carpeta
	N2	2025	sellado de grietas
		2027	Micro carpeta
		2028	sellado de grietas
		2029	sellado de grietas
		2030	Micro carpeta
	N3	2030	Microcarpeta

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 14, evidencia una planificación técnica estructurada y detallada que aprovecha el uso de VANT como herramienta clave para el diagnóstico y programación de estrategias de conservación vial. Se observa una cobertura progresiva de intervenciones en todas las categorías de pavimento, lo cual permite atender desde tramos nuevos con acciones ligeras hasta vialidades con daño estructural que requieren reconstrucción.

El uso de microcarpeta como tratamiento recurrente resalta su importancia como solución de conservación superficial en varias etapas del ciclo de vida del pavimento. Asimismo, la programación anticipada de actividades como bacheo, sellado y preparación de bordes demuestra un enfoque preventivo que busca evitar deterioros mayores.

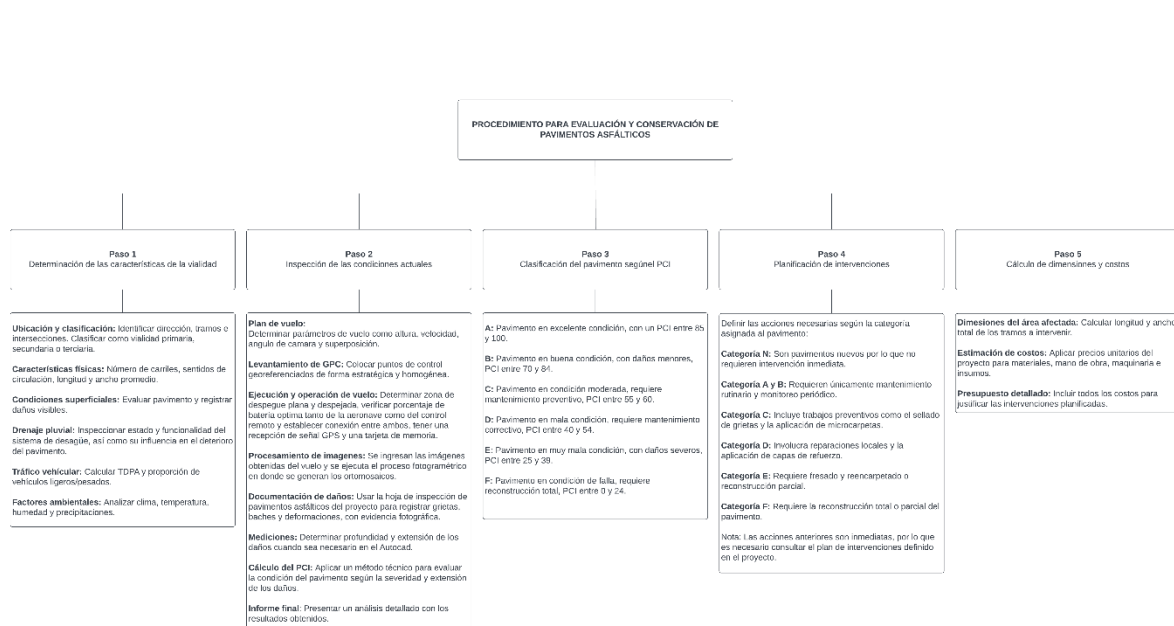
En conjunto, el procedimiento asistido por VANT no solo mejora la precisión en la detección de fallas, sino que optimiza la planeación de intervenciones, asegurando una gestión más eficiente, técnica y sostenible de las vialidades urbanas a lo largo del tiempo.

Como parte de los resultados la elaboración de la figura 38, se presenta un diagrama que resume de forma estructurada y secuencial el procedimiento metodológico utilizado para llevar a cabo la evaluación y conservación de pavimentos asfálticos, aplicado en este estudio con apoyo de vehículos aéreos no tripulados (VANT). El flujo se divide en cinco pasos

principales, que integran tanto la recolección de información como la toma de decisiones técnicas y económicas.

Este esquema visual sintetiza el enfoque adoptado en el estudio y establece una lógica operativa clara que integra tanto el análisis visual por VANT como el modelo tradicional de evaluación técnica.

Figura 38. Procedimiento para evaluación y conservación de pavimentos asfálticos.



Fuente: Elaboración propia.

El diagrama de flujo del procedimiento se ha convertido en un instrumento importante para estructurar el análisis y la conservación de vialidades, de manera organizada, incorporando factores técnicos, operativos y económicos. El principal valor añadido de esta herramienta se encuentra en su capacidad no solo para mostrar el proceso en cada etapa (caracterización inicial e intervenciones implementadas), sino también para permitir un proceso de toma de decisiones informado y estratégico. Además, las fases de inspección y diagnóstico involucran a los VANT como una herramienta que presenta un enfoque novedoso que aumenta la precisión en la recopilación de datos y la planificación objetiva.

En conjunto, este diagrama no solo facilita la ejecución técnica, sino que también fortalece la trazabilidad y justificación de las acciones propuestas dentro de un programa de conservación vial urbano moderno.

5. Conclusiones

La conservación efectiva de las vialidades urbanas es un gran desafío para la gestión de infraestructuras públicas, especialmente en entornos como Mexicali, con condiciones climáticas extremas, rápido crecimiento urbano y recursos financieros limitados.

Este estudio ha demostrado que las estrategias actuales de mantenimiento en la ciudad presentan una fuerte dependencia de métodos tradicionales de inspección, muchas veces aplicados de forma aislada y reactiva, sin una planeación estratégica que permita anticiparse al deterioro ni priorizar de forma técnica las intervenciones. El enfoque desarrollado en esta tesis, utilizando VANT y procedimientos PCI, ha producido una metodología detallada para evaluar mejor los pavimentos urbanos. Los hallazgos mostraron que los datos adquiridos por VANT presentan una evaluación superior en comparación con los datos de inspección tradicionales (0.981 en promedio para el coeficiente de evaluación de Pearson).

Esta confiabilidad estadística, no solo confirma la relevancia de los VANT como herramienta técnica, sino que también allana el camino para la aplicación de esta metodología en otras ciudades con características urbanas equivalentes.

De la evaluación de cinco tramos de vialidades terciarias en Mexicali, se observará que todas las vialidades evaluadas están en un estado de pobre a muy pobre, con valores PCI inferiores a 46. Las fallas detectadas, tales como agrietamientos tipo piel de cocodrilo, parches mal adheridos, desprendimiento de agregados y baches, son síntomas de un desgaste acumulado que no ha sido atendido de forma preventiva. Estas condiciones justifican plenamente la necesidad de implementar estrategias de conservación estructuradas, sustentadas en criterios técnicos y priorizadas mediante herramientas de análisis predictivo como HDM-4.

La proyección de intervenciones a través de este modelo permitió establecer planes de mantenimiento que extienden la vida útil del pavimento, reducen los costos acumulativos y aseguran niveles de servicio adecuados. Además, el cronograma calendarizado de actividades propuesto para cada tramo, basado en la severidad del daño y los costos unitarios actualizados, ofrece una herramienta operativa útil para las autoridades responsables de la infraestructura urbana.

Más allá de sus contribuciones técnicas, esta tesis pone la importancia de modernizar la gestión vial a través de la integración de nuevas tecnologías, especialmente en ciudades intermedias donde la presión sobre la red vial es cada vez mayor y los recursos son limitados. La metodología desarrollada promueve una transición de un modelo reactivo de conservación hacia un esquema proactivo, basado en evidencia empírica, análisis geoespacial y planificación de largo plazo.

Finalmente, partiendo en el método de conservación llevado a cabo utilizando VANT no solo se trata de un cambio en la eficiencia de nuestra recopilación de datos, sino también en el concepto de lo que sería la planificación y conservación de pavimentos urbanos. Más allá del desarrollo metodológico, la tesis recomienda un conjunto de recomendaciones técnicas principales para lograr una calidad operativa sólida en los vuelos asistidos por UAV:

- Evita vuelos si la velocidad del viento es superior a 15 km/h, dado que provocará desviaciones en el rendimiento de estabilidad del dron, así como afectará la claridad al tomar fotografías.
- Siempre verifique la calibración y la batería del equipo antes de la misión, con la operación completa a lo largo de la ruta programada.
- Respalda las imágenes y modelos generados después de cada vuelo, asegurando así que los datos permanezcan intactos y disponibles para ser utilizados en más de una ocasión, ya que no se requiere una nueva inspección.

Estas recomendaciones, aunque operativas, son esenciales para estandarizar el procedimiento, mejorar su reproducibilidad y evitar errores que puedan comprometer la calidad del diagnóstico técnico. La integración de estas buenas prácticas garantiza que el método pueda ser replicado con consistencia en otros entornos urbanos.

Como aporte central, se destaca que el procedimiento planteado es adaptable a distintas condiciones de pavimento y niveles de tráfico, lo que le confiere versatilidad para su aplicación en una variedad de escenarios urbanos. Esta capacidad de ajuste permite que el modelo conserve su efectividad técnica sin perder precisión diagnóstica, incluso en contextos con demandas operativas diversas.

Su implementación en Mexicali evidencia que es posible combinar innovación tecnológica con criterios técnicos y financieros, generando soluciones viables para una gestión vial más inteligente y sostenible. El reto futuro consiste en consolidar este enfoque como política pública y fortalecer las capacidades técnicas institucionales para su aplicación continua, no solo en Mexicali, sino en todo el territorio nacional.

6. Referencias

- Aleadelat, W., & Ksaibati, K. (2017). Estimación del índice de transitabilidad del pavimento mediante una aplicación para teléfonos inteligentes Android para carreteras locales. *Transportation Research Record*, 2639, 129–135. <https://doi.org/10.3141/2639-16>
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). *AASHTO Transportation Asset Management Guide, Volume 1: A strategic framework for transportation asset management* (2.^a ed.). AASHTO.
- ASTM International. (2023). *Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-23)*.
- Atencio, E., Plaza-Muñoz, F., Muñoz-La Rivera, F., & Lozano-Galant, J. A. (2022). Calibration of UAV flight parameters for pavement pothole detection using orthogonal arrays. *Automation in Construction*, 143, 104545. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104545>
- Ayuntamiento de Mexicali. (2020). *Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Mexicali 2020–2040*. Gobierno Municipal de Mexicali. <https://www.mexicali.gob.mx/>
- Badilla, G. (s.f.). *Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI* [PDF]. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/xmlui/bitstream/handle/50625112500/504/Determinaci%C3%B3n%20de%20un%20procedimiento%20de%20ensayo%20para%20el%20c%C3%A1lculo%20del%20IRI,%20Gustavo%20Badilla.PDF?sequence=1>
- Banco Mundial. (2022). *Movilidad urbana sostenible y competitividad en América Latina*. <https://www.worldbank.org/>

- Bianchini, A. (2014). Planificación del mantenimiento de pavimentos a nivel de red con análisis de componentes principales. *Journal of Infrastructure Systems*, 20(2), 04013004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000189](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000189)
- Bianchini, A., Bandini, P., & Smith, D. W. (2010). Confiabilidad entre evaluadores de las evaluaciones manuales del deterioro del pavimento. *Journal of Transportation Engineering*, 136(2), 165–172. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2010\)136:2\(165\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2010)136:2(165))
- Bogus, S. M., Song, J., Waggerman, R., & Lenke, L. R. (2010). Método de correlación de rangos para la evaluación manual de la variabilidad de los datos de deterioro del pavimento. *Journal of Infrastructure Systems*, 16(1), 66–72. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2010\)16:1\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2010)16:1(66))
- Calderón, M., Palafox, H., & Ramírez, J. (2020). Modelos de regresión múltiple para predicción de rutting en pavimentos de Sonora. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Civil*, 15(3), 45–58. <https://doi.org/10.18041/1405-1478/rlc.2020v15n3.40976>
- Cambridge Systematics. (2006). *Guía de gestión de activos para agencias locales en Michigan*. Lansing, MI: Consejo de Gestión de Activos de Transporte de Michigan.
- Cervera, J., Vázquez, J., Balarezo, D., & Cital, A. (2014). *Diagnóstico de la Infraestructura Vial en Mexicali*. Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). *Normales climatológicas diarias 1981–2010: Estación Mexicali, B.C. (02034)*. Servicio Meteorológico Nacional. https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Diarios/bc/dia02034.txt
- CONAGUA. (2021). *Estadísticas climatológicas de Mexicali*. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx>
- De Luis-Ruiz, J. M., Sedano-Cibrián, J., Pereda-García, R., Pérez-Álvarez, R., & Malagón-Picón, B. (2021). Optimization of photogrammetric flights with UAVs for the metric virtualization of archaeological sites. *Applied Sciences*, 11(3), 1204. <https://doi.org/10.3390/app11031204>

- Dotto Bueno, L., Pivoto Specht, L., Da Silva Pereira, E., & Ribas, L. (2016). Pavement maintenance management and prioritization: A case study. *Transportation Research Procedia*, 18, 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.01.031>
- D-RCM SLR. (2024). *Systematic literature review of UAV applications in pavement inspection*. Drone Research and Collaborative Modeling.
- Ewertowski, M. W., Tomczyk, A. M., Evans, D. J. A., Roberts, D. H., & Ewertowski, W. (2019). Operational framework for rapid, very-high resolution mapping of glacial geomorphology using low-cost unmanned aerial vehicles and structure-from-motion approach. *Remote Sensing*, 11(1), 65. <https://doi.org/10.3390/rs11010065>
- Federal Highway Administration. (2013). *Practical Guide for Quality Management of Pavement Condition Data Collection (FHWA-NHI-13-036)*. U.S. Department of Transportation.
- Federal Highway Administration. (2022). *Pavement Management Roadmap: A 10-Year Strategy for Transformative Research and Practice (Tech. Pap. HIF-22054)*. U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/roadmap/>
- Freitas, E., Freitas, C., & Braga, A. C. (2014). Análisis de la variabilidad de los indicadores de pavimento: MPD, SMTD e IRI. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(4), 361–371. <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.807343>
- García, M., & Pérez, R. (2021). The role of condition assessment in pavement management. *Transportation Research Record*, 2674(2), 34–45. <https://doi.org/10.3141/2674-04>
- Hernández, P. (2019). Impacto de las condiciones climáticas en la degradación de pavimentos flexibles en Baja California. *Revista Mexicana de Ingeniería Civil*, 12(1), 22–35. <https://doi.org/10.24254/rmic.12.1.22>
- Huang, Y., & Kong, X. (2022). Utilizing UAV technology in pavement condition surveys. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(5), 456–467. <https://doi.org/10.1080/10298416.2022.21345>
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/>
- INEGI. (2021). *Anuario estadístico y geográfico de Baja California 2021*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx>

- INEGI. (2023). *Información geográfica y climática del municipio de Mexicali, B.C.* https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/02/02002.pdf
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP). (2022). *Sistema de Información Geográfica y de Movilidad Urbana de Mexicali.*
- López, J., & Martínez, S. (2020). Estrategias de mantenimiento vial en contextos de recursos limitados: El caso de Baja California. *Ingeniería Vial y Transporte*, 18(3), 119–130. <https://doi.org/10.1080/17442397.2020.1713572>
- Madanat, S. M., Karlaftis, M. G., & McCarthy, P. S. (1997). Modelos probabilísticos de deterioro de infraestructura con datos de panel. *Journal of Infrastructure Systems*, 3(1), 4–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(1997\)3:1\(4\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(1997)3:1(4))
- MoDOT. (2017). *Guía de políticas de ingeniería 144.5: Mantenimiento de pavimentos.* http://epg.modot.org/index.php?title=144.5_Pavement_Maintenance
- NCHRP. (1993). *Acreditación para evaluadores de deterioro del pavimento en estudios de desempeño de pavimentos a largo plazo.* Washington, DC: Academia Nacional de Ciencias.
- North American Development Bank. (2011). *Proyecto municipal de pavimentación en Mexicali, Baja California.* NADB.
- Ortega Rengifo, D. M., Capa Salinas, J., Pérez Caicedo, J. A., & Rojas Manzano, M. A. (2024). Unmanned aircraft systems in road assessment: A novel approach to the Pavement Condition Index and VIZIR methodologies. *Drones*, 8(3), 99. <https://doi.org/10.3390/drones8030099>
- PIARC. (s. f.). *Taking decisions in the rehabilitation of flexible pavements based on non-destructive measurements.* World Road Association. <https://www.piarc.org/en/activities/technical-committees/tc-3-3-pavements>
- Ruíz, F., & Sánchez, D. (2021). Políticas públicas y gestión de la infraestructura vial: Un estudio de caso en municipios mexicanos. *Gestión y Políticas Públicas*, 7(2), 88–102. <https://doi.org/10.1177/2057891121993542>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2018). *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras (Versión 2018).* Dirección General de Servicios Técnicos.

https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/manual-pg/MPGC_2018_16_11_18.pdf

- Silva, L. A., Quietinho Leithardt, V. R., López Batista, V. F., Villarrubia González, G., & De Paz Santana, J. F. (2023). Automated road damage detection using UAV images and deep learning techniques. *IEEE Access*, *11*, 68012–68025. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3287770>
- Smith, J. K., Johnson, A. B., & Thompson, C. D. (2020). Advances in pavement inspection and maintenance planning. *Journal of Infrastructure Systems*, *26*(3), 04020020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000480](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000480)
- Sourav, M. M., et al. (2022). Evaluation of small uncrewed aircraft systems data in airfield pavement crack detection and rating. *Transportation Research Record*, *2676*(7), 246–259. <https://doi.org/10.1177/03611981221082615>
- Torres, M., & Flores, G. (2021). Implementación del Manual PASER en municipios costeros de Sinaloa. *Revista de Ingeniería del Transporte*, *9*(2), 105–118. <https://doi.org/10.25110/rit.v9i2.2021.119>
- Transportation Research Board. (2023). *NCHRP Report 20-123: Digital Update of the AASHTO Guide for Pavement Management*. TRB. <http://www.trb.org/Main/Blurbs/180513.aspx>
- Walker, D., Entine, L., & Kummer, S. (2002). *Manual PASER para la evaluación y clasificación de superficies de pavimento*. Madison, WI: Centro de Información de Transporte, Universidad de Wisconsin–Madison.
- Wang, K. C. P. (2000). Diseños e implementaciones de sistemas automatizados para el estudio del deterioro de la superficie del pavimento. *Journal of Infrastructure Systems*, *6*(1), 24–32. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2000\)6:1\(24\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2000)6:1(24))
- World Bank. (2013). *Group of Twenty (G20) financing framework for sustainable infrastructure*. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/19058>
- World Highways. (2023). Mexico's road crisis from poor maintenance. <https://www.worldhighways.com/wh10/news/mexicos-road-crisis-poor-maintenance>

ANEXO 1

“Herramienta para la determinación de las condiciones actuales de los pavimentos flexibles.”

Contenido

1. Introducción	97
2. Importancia de la conservación.....	98
3. Procedimiento de evaluación de la condición del pavimento.	102
3.1 Formato para la selección de unidades de muestreo para inspección	102
3.2 Formato para la evaluación de la condición.....	104
3.3 Hoja de inspección del pavimento asfáltico.....	105
3.4 Manual de daños:	106
Referencias.....	130

1. Introducción

La gestión eficiente de los caminos urbanos es un factor clave para garantizar la movilidad y calidad de vida en las ciudades. Los pavimentos, constituyen una parte fundamental de la infraestructura urbana, suelen experimentar un deterioro precipitado, especialmente en México, debido a factores como la calidad deficiente de los materiales, errores en el diseño y la insuficiencia de un mantenimiento adecuado. El deterioro afecta la funcionalidad de las vías y genera la necesidad de intervenciones periódicas que, en muchos casos, no logran extender su vida útil según lo proyectado.

Las administraciones de carreteras deben garantizar que los recursos destinados a la conservación vial se utilicen de manera eficiente para evitar futuros costos elevados y maximizar el rendimiento de las inversiones. Para lograrlo, es cada vez más necesario contar con sistemas modernos de gestión de activos y un esfuerzo institucional sólido. Sin embargo, a menudo no se realizan adecuadamente las intervenciones de mantenimiento vial ni se aplican métodos confiables para evaluar el estado actual de las infraestructuras o planificar un mantenimiento adecuado, lo que provoca un rápido deterioro de las redes viales y genera costos más altos de operación y recuperación en el futuro. Los tomadores de decisiones deben reconocer la importancia de la conservación, financiarla adecuadamente y gestionarla eficientemente, ya que una administración insuficiente o ineficaz de las carreteras puede tener graves consecuencias para la economía y el bienestar social (PIARC, 2014).

Para enfrentar esta problemática, en países en desarrollo se emplean métodos de diversos métodos de evaluación de pavimentos flexibles. Sin embargo, en las ciudades de países en desarrollo no se realizan procedimientos adecuados para evaluar las condiciones de estas. Entre los métodos más comunes utilizados por los países desarrollados Índice de Condición del Pavimento (PCI), mismo que permite evaluar el estado del pavimento de forma precisa y sin requerir equipo especializado, a través de trabajo de campo, facilitando así la planificación de estrategias de mantenimiento y optimización de recursos disponibles. El objetivo de esta herramienta es proporcionar una herramienta metodológica clara y eficiente para evaluar la condición de los caminos urbanos construidos con pavimentos flexibles con el fin facilitar la toma de decisiones informada de las agencias administradoras de las vialidades urbanas a través de la obtención de datos precisos sobre la condición actual de su infraestructura vial.

2. Importancia de la conservación

Una de las principales responsabilidades de las ciudades es gestionar de manera eficiente el territorio y los servicios que influyen en el entorno inmediato de quienes viven y trabajan en ellas (Vallicelli, 2002). En este contexto, los pavimentos urbanos desempeñan un papel fundamental en la vida diaria, representando un patrimonio común esencial para todos los habitantes, ya que facilitan y condicionan la movilidad y el uso del espacio urbano (López Careño et al., 2017). Además, los pavimentos urbanos constituyen una porción significativa del área construida de las ciudades, siendo un elemento clave para su buen funcionamiento, ya que, debido a su funcionalidad y extensión, impactan de manera constante y directa en la calidad de vida de los ciudadanos.

La mayoría de las vialidades de las ciudades de México son construidas a base de pavimentos flexibles. Sin embargo, es importante mencionar que la durabilidad de estas no está cumpliendo con el tiempo estimado de servicio debido a que el deterioro ocurre de forma prematura. Dicho deterioro tiene múltiples causas entre las que destacan deficiencias en los materiales, uso equivocado en de los métodos de diseño, errores u omisiones durante la construcción y la falta de un adecuado mantenimiento.

En este contexto, es importante destacar que el mantenimiento adecuado de las vías es fundamental, ya que influye en la seguridad, el medio ambiente y economía además de la integración social. Las vías en mal estado aumentan los accidentes, la inseguridad y las emisiones de CO₂, además de elevar los costos operativos y reducir la productividad. También limita el acceso de comunidades remotas y obstaculiza el acceso a servicios básicos como la salud y la educación, afectando a grupos vulnerables. Mantener las vías en buen estado es clave para mejorar el bienestar general. (PRIARC, 2014).

En este orden de ideas, el mantenimiento de pavimentos flexibles en ciudades de México incluye bacheo, sellado de grietas y reencarpetado, lo que prolonga su vida útil. Sin embargo, estas acciones no suelen cumplir con la vida de servicio proyectada, ya que no abordan el problema real de las vías. Esto genera mayores costos y uso de recursos no renovables. Los pavimentos se degradan progresivamente, por lo que es necesario un mantenimiento adecuado para evitar su deterioro. (Osuna Ruiz, 2008). Sin embargo, la insuficiencia de los recursos disponibles provoca que sea indispensable el mantenimiento preventivo rutinario, siendo este desplazado por rehabilitaciones o incluso reconstrucciones costosas, las cuales terminarán consumiendo la mayor parte de los presupuestos

disponibles. No obstante, para definir las estrategias de mantenimiento, es fundamental tener conocimiento sobre el estado actual del pavimento.

Actualmente existen diversos métodos de evaluación y planeación para la conservación de pavimentos flexibles como son:

- Método de la Facultad de Ingeniería UNAM /SCT-IMT.
- Método PSI fue desarrollado por la Asociación Estadounidense de funcionarios de carreteras estatales (AASTHO por sus siglas en inglés).
- Métodos a base de indicadores de desempeño (regularidad, roderas, reflexiones, etc.).
- El método del Índice de Condición de Pavimento (PCI por sus siglas en inglés).

Los métodos mencionados ofrecen resultados favorables para la correcta obtención de las condiciones de una vialidad o carretera. Sin embargo, presentan diversos inconvenientes que dificultan su correcta implementación en ciudades. Dichas desventajas pueden resumirse en:

- Requieren equipo especializado.
- El equipo necesario es costoso.
- Requieren pruebas de laboratorio.
- Es necesario cerrar la circulación del tráfico.
- El personal de inspección es propenso a accidentes.

De los métodos anteriormente mencionados el método de PCI presenta mayor viabilidad para su aplicación en contextos urbanos debido a que no requiere equipo ni herramienta especializada, a continuación, se describe dicho método. Sin embargo, actualmente en México no existe un procedimiento normativo para la aplicación de dicho método adicionalmente no se cuenta con una herramienta metodológica establecida para su aplicación. El PCI es un índice numérico que varía entre 0 y 100, donde 0 indica un pavimento en condiciones muy deficientes o fallidas, mientras que 100 representa un pavimento en estado óptimo. En la tabla 1 se detallan los rangos del PCI, acompañados de una descripción cualitativa correspondiente a la condición del pavimento.

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 1. Tabla del índice de condición del pavimento (PCI).

El cálculo del PCI es fundamental para evaluar la condición del pavimento a través de un inventario visual, en el cual los daños se clasifican según su CLASE, SEVERIDAD y CANTIDAD. El PCI permite obtener un índice que refleja tanto la integridad estructural del pavimento como el estado operativo de su superficie. La información recopilada sobre los daños ofrece una visión clara de las posibles causas, ya sea por las cargas o por factores climáticos. A continuación, se describen algunas de las condiciones y fallas que puede presentar un pavimento según el valor de PCI obtenido, complementadas con ayudas visuales (Vásquez, 2022).

Excelente: En una vialidad con un rango de PCI de 100 a 85 su estructura tiene una excelente condición y contiene fallas bajas y el requerimiento de su mantenimiento será mínimo. En este sentido tiene una condición en excelente estado.



Figura 1. Referencia de PCI “Excelente”.

Muy bueno: En una vialidad con un rango de PCI 85 a 70 su estructura es buena y sus fallas son bajas y medias y el requerimiento de su mantenimiento será mínimo. En este sentido el daño del pavimento es bajo y se considera en un estado muy bueno.

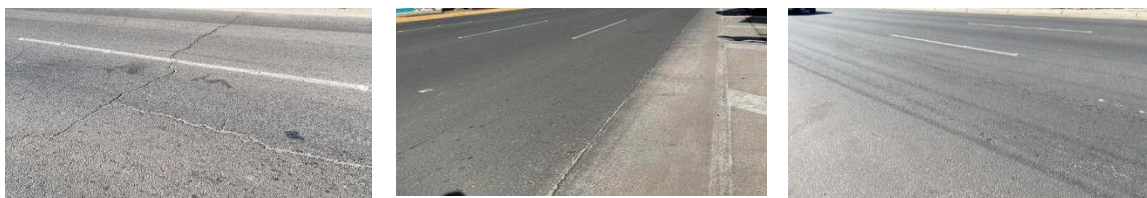


Figura 2. Referencia de PCI “Muy bueno”.

Bueno: En una vialidad con un rango de PCI de 70 a 55 su estructura es buena y sus fallas son bajas y medias y el requerimiento de su mantenimiento será mínimo. Por lo tanto el daño del pavimento se considera bueno.



Figura 3. Referencia de PCI “Bueno”.

Regular: En una vialidad con un rango de PCI de 55 a 40 su estructura es buena y sus fallas son bajas, medias y altas y el requerimiento de su mantenimiento será medio. En este aspecto el daño del pavimento es regular.



Figura 4. Referencia de PCI “Regular”.

Malo: En una vialidad con un rango de PCI de 40 a 25 su estructura es mala y sus fallas son medias y altas y el requerimiento de su mantenimiento será alto. En relación con eso el daño del pavimento es malo.



Figura 5. Referencia de PCI “Malo”.

Muy malo: En una vialidad con un rango de PCI de 25 a 10 su estructura es mala y sus fallas son medias y altas y el requerimiento de su mantenimiento será alto ya que sus fallas son altas y medias. También en este sentido el daño del pavimento es muy malo.



Figura 6. Referencia de PCI “Muy malo”.

Fallado: En una vialidad con un rango de PCI de 10 a 0 su estructura es mala y sus fallas son altas y el requerimiento de su mantenimiento será alto debido a que el pavimento se encuentra en un estado fallado.



Figura 7. Referencia de PCI “Fallado”.

3. Procedimiento de evaluación de la condición del pavimento.

La primera etapa consiste en realizar el trabajo de campo, donde se identifican los daños del pavimento considerando su clase, severidad y extensión. Esta información se registra en formatos diseñados específicamente para este propósito. Las Figuras 8 y 9 muestran ejemplos de formatos utilizados para la inspección de pavimentos asfálticos. Cabe señalar que estas figuras son solo ilustrativas, y en la práctica se debe disponer del espacio adecuado para registrar toda la información relevante.

3.1 Formato para la selección de unidades de muestreo para inspección.

Para evaluar el estado del pavimento sin realizar un análisis completo, se emplean "unidades de muestreo", cuya longitud varía según el ancho de la calzada. A medida que el ancho de la calzada aumenta, la longitud de las unidades disminuye. Por ejemplo, para una calzada de 5.0 metros de ancho, la unidad de muestreo mide 46.0 metros. Si el ancho es de 5.5 metros, la longitud se reduce a 41.8 metros, y para una calzada de 6.0 metros, baja a 38.3 metros. En el caso de un ancho de 6.5 metros, la unidad de muestreo mide 35.4 metros, mientras que el mayor ancho considerado, 7.3 metros, tiene una longitud de muestreo de 31.5 metros. Es recomendable que las unidades seleccionadas mantengan una separación uniforme a lo largo del tramo y que la primera unidad sea

elegida aleatoriamente (Campos & Layza 2021). Además, si el número mínimo de unidades a evaluar es inferior a 5, se deben analizar todas las unidades, como se muestra en la Figura 8.

A continuación, se muestra un ejemplo de aplicación; si la unidad de muestreo es la ubicada en la tercera posición y el siguiente intervalo de muestreo es (i) es igual a 1, el patrón de las siguientes unidades a inspeccionar sería 5, 7, 9, 11, etc. Sin embargo, si se requiere inspeccionar daños exactos para una licitación de rehabilitación deberá ser inspeccionadas todas las unidades de muestreo.



Figura 8. Referencia de unidades de muestreo.

Determinación de las unidades de muestreo para evaluación.

Donde:

n: Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar.

N: Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento.

e: Error admisible en el estimativo del PCI de la sección (e = 5%).

σ : Desviación estándar del PCI.

n =	#iDIV/0!
N =	
e =	
σ =	

Selección de las unidades de muestreo para inspección.

Donde:

N: Número total de unidades de muestreo disponible .

n: Número mínimo de unidades para evaluar.

i: Intervalo de muestreo, se redondea al número entero inferior (por ejemplo, 3.7 se redondea a 3).

i =	#iDIV/0!
N =	
n =	

$$i = \frac{N}{n} \text{ Ecuación 2.}$$

$$n = \frac{N \times \sigma^2}{\frac{e^2}{4} \times (N - 1) + \sigma^2} \text{ Ecuación 1.}$$

Figura 9. Determinación y selección de unidades de muestreo.

3.2 Formato para la evaluación de la condición

El procedimiento debe llevarse a cabo siguiendo las definiciones de daños establecidas en este manual, a fin de asegurar que el valor del PCI obtenido sea confiable. Siguiendo las medidas correctas para llevar la evaluación, equipo necesario, equipo de seguridad y llevando todo el material que se necesitará. Entre las herramientas esenciales se incluyen el odómetro manual, utilizado para medir las longitudes y áreas afectadas, así como una regla y una cinta métrica, que permiten determinar la profundidad de los ahuellamientos o depresiones en el pavimento.

A continuación, se presenta la herramienta y las partes que la constituyen:

The form is divided into several sections:

- Top Section:** Fields for 'Zona:', 'Fecha:', 'Encuesta por:', 'Sección:', 'Unidad de muestra:', and 'Área de muestra:'.
- Tipos de falla:** A table listing 19 types of pavement defects, such as 'Piel de cocodrilo', 'Exudación', 'Agritamiento por bloque', etc.
- Bosquejo:** A sketch area with a rectangular box for drawing.
- Tipo de falla existente, cantidad y gravedad:** A table with columns for 'Escribe.', 'Quantity y severity', and 'Total Severity (L, M, H)'. Callout 13 points to the 'Escribe.' column, 14 to the 'Quantity y severity' column, and 11 to the 'Total Severity' column.
- Cálculo de PCI:** A table with columns for 'Tipo de falla.', 'Severidad.', 'Densidad.', and 'Deducir Valor'. Callouts 12 and 15 point to the 'Deducir Valor' column.
- Calculations:** Fields for 'PCI = 100 - CDV =', 'Calificación =', and 'PCI ='. Callouts 19, 20, and 21 point to these respective fields.
- Summary:** Fields for 'q =', 'Valor de deducción total.', and 'Valor de deducción corregido (CDV)'. Callouts 16, 17, and 18 point to these fields.

Figura 10. Hoja de inspección de pavimento asfáltico.

3.3 Hoja de inspección del pavimento asfáltico

1. **Zona:** Se refiere a la delimitación geográfica o área específica dentro de la cual se realiza la evaluación del pavimento. Puede ser una calle, un tramo del pavimento vial o cualquier área de interés que se pretenda analizar.
2. **Fecha:** Indica el día en que se lleva a cabo la inspección del pavimento. Es fundamental para llevar un registro preciso del estado del pavimento en un momento específico, y para realizar análisis comparativos en el tiempo.
3. **Encuesta por:** Hace referencia al nombre o identificación del inspector o equipo encargado de realizar la inspección visual y la recolección de datos del pavimento. Es

importante para mantener un control de la calidad y trazabilidad del proceso de inspección.

4. **Sección:** Tramo homogéneo del pavimento, identificado por características como intersecciones, sentidos de circulación, y delimitaciones de áreas de muestreo.
5. **Unidad de muestreo:** Es la subdivisión de una sección de pavimento seleccionada para una inspección detallada. Su objetivo es extrapolar los resultados obtenidos al resto de la sección inspeccionada.
6. **Área de muestra:** Se refiere a la superficie específica dentro de la unidad de muestreo que es evaluada. Esta área es clave para identificar el número y tipo de fallas presentes, así como para calcular el PCI.
7. **Bosquejo:** Es una representación gráfica de la sección del pavimento a evaluar, que incluye detalles importantes de la inspección para facilitar su comprensión y planificación.
8. **Tipos de fallas:** Las fallas del pavimento se clasifican en distintas categorías según su origen y el impacto que tienen en su funcionamiento. A continuación, se describen los diferentes tipos de fallas.

3.4 Manual de daños:

La siguiente información proviene de diversas fuentes especializadas evaluación de infraestructura de pavimentos. Se ha consultado el documento titulado "Manual de fallas en pavimentos flexibles", (SCT, 2022), el cual aborda los distintos tipos de fallas que pueden aparecer en pavimentos, sus causas y posibles soluciones. Asimismo, se ha tomado como referencia el documento normativo "M-CSV-CAR-1-03-008-23" del Instituto Mexicano del Transporte (IMT, 2023), que establece las especificaciones técnicas para la construcción, conservación y mantenimiento de carreteras y vialidades, con un enfoque en la calidad y durabilidad de las obras. Por último, se han extraído contenidos del "Manual PCI", que proporciona un método estándar para la evaluación de pavimentos a través del índice de condición de pavimentos, permitiendo una valoración precisa del estado de las superficies de rodamiento (Vásquez, 2002).

Calidad de tránsito:

Durante la inspección de daños, es necesario evaluar la calidad del tránsito (o confort de viaje) para determinar el nivel de severidad de ciertos daños, como las corrugaciones y los cruces de vías férreas.

A continuación, se ofrece una guía general para ayudar a establecer el grado de severidad relacionado con la calidad del tránsito.

L: (Low, Bajo). Se perciben las vibraciones en el vehículo, pero no es necesario reducir la velocidad con el objeto de mejorar la comodidad o la seguridad.

M: (Medium, Medio). Las vibraciones en el vehículo son significativas y se requiere alguna reducción de la velocidad con el fin de mejorar la comodidad y la seguridad.

H: (High: Alto). Las vibraciones en el vehículo son tan excesivas que debe reducirse la velocidad de forma considerable con intención de mejorar la comodidad y la seguridad.

La calidad del flujo vehicular se evalúa al transitar por la sección de pavimento en un automóvil de tamaño estándar, manteniendo la velocidad permitida por el límite legal.

Unidades de muestreo, según el daño:

1. Piel de cocodrilo:

Son una serie de grietas interconectadas causadas por la acción repetida de las cargas de tránsito sobre el pavimento, por lo tanto, sólo ocurren en áreas sujetas a cargas repetidas, como en el área de paso de los neumáticos. Las piezas que se forman por el patrón de grietas generalmente son polígonos que no superan los 0,5 m en su lado más largo y tienen apariencia similar a la piel de un cocodrilo.

Tipo de medida: Se miden en pies cuadrados (o metros cuadrados) del área afectada. La mayor dificultad en la medida de este tipo de daño radica en que, a menudo, dos o tres niveles de severidad coexisten en un área deteriorada.

L	M	H
No se lleva a cabo ninguna acción; solo se aplica un sello superficial. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sobrecarpeta. 	Parqueo parcial o en toda la profundidad (Full Depth). <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sobrecarpeta. ▪ Reconstrucción. 	Parqueo parcial o Full Depth. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sobrecarpeta. ▪ Reconstrucción.

Tabla 2. Opciones de reparación “Piel de cocodrilo”.

Niveles de severidad:

L (Bajo): Grietas longitudinales de menos de 3 mm de ancho que corren paralelas entre sí, con o sin interconexión entre ellas

M (Medio): Son grietas más desarrolladas que las de baja severidad, con un ancho mayor a 3 mm y menor a 19 mm, en un patrón o red de grietas que pueden estar ligeramente descascaradas.

H (Alto): Red o patrón de grietas bien definidas con bordes desgastados; el ancho de las grietas es mayor a 19 mm. Algunas de las piezas pueden moverse bajo la acción del tránsito.

2. Exudación.

Es una película de material bituminoso en la superficie del pavimento, la cual forma una superficie brillante, cristalina y reflectora que usualmente llega a ser pegajosa.

Tipo de medida: Se mide en metros cuadrados de área afectada. Si se contabiliza la exudación no deberá contabilizarse el pulimento de agregados.

L	M	H
No requiere intervención.	Se aplica arena / agregados y cilindrado.	Se aplica arena/ agregados y cilindrado (precalentando si fuera necesario).

Tabla 3. Opciones de reparación "Exudación".

Niveles de severidad:

L: La exudación se ha producido en un grado muy leve y se presenta sólo durante unos pocos días al año. El asfalto no se pega a los zapatos ni a los neumáticos de los vehículos.

M: Se ha producido exudación hasta un punto tal que el asfalto se pega a los zapatos y neumáticos de los vehículos sólo durante unas pocas semanas al año.

H: Se ha producido un exudado en zonas extensas y con un espesor considerable. El asfalto se adhiere a los zapatos y neumáticos de los vehículos durante varias semanas del año.

3. Agrietamiento de bloque:

El agrietamiento en bloque son grietas interconectadas que dividen al pavimento en piezas aproximadamente rectangulares, las cuales tienen una longitud por lado de entre 0.3 y 3.0 m.

Tipo de medida: Se mide en metros cuadrados de área afectada. Generalmente, se presenta un sólo nivel de severidad en una sección de pavimento; sin embargo, cualquier área de la sección de pavimento que tenga diferente nivel de severidad deberá medirse y anotarse separadamente.

L	M	H
Sellado de grietas con ancho mayor a 3.0 mm, riego de sello.	Sellado de grietas, reciclado superficial, escarificado en caliente y sobrecarpeta.	Sellado de grietas, reciclado superficial, escarificado en caliente y sobrecarpeta.

Tabla 4. Opciones de reparación "Agrietamiento de bloque".

Niveles de severidad:

L: Las grietas son menores a 3 mm de ancho y no están desgastadas en los bordes.

M: Las grietas están más desarrolladas que las de baja severidad en un patrón o red de grietas que pueden estar ligeramente desgastadas en sus bordes. Las grietas tienen un ancho entre 3 mm y 19 mm.

H: Son grietas en red o patrón que ha progresado de modo tal que las piezas están bien definidas y los bordes desgastados. El ancho de las grietas es mayor a 19 mm. Algunas de las piezas pueden moverse bajo la acción del tránsito.

4. *Abultamientos (BUMPS) y Hundimientos(SAGS):

Los abultamientos son desplazamientos de un área localizada de la superficie del pavimento dando origen a una elevación abrupta.

Tipo de medida: Su medición es en metros cuadrados. Si aparecen en un patrón perpendicular al flujo del tránsito y están espaciadas a menos de 3.0 m, el daño se llama corrugación. Si el abultamiento ocurre en combinación con una grieta, ésta también se registra.

L	M	H
No requiere intervención.	Reciclado en frío, parcheo profundo o parcial.	Reciclado (fresado) en frío, parcheo profundo o parcial, sobrecarpeta.

Tabla 5. Opciones de reparación "Abultamientos y Hundimientos".

Niveles de severidad:

L: Los abultamientos es la diferencia de niveles entre el punto más alto del abultamiento y el resto del pavimento es de hasta 6 mm.

M: Los abultamientos se definen por la diferencia de niveles entre el punto más alto del abultamiento y el resto del pavimento es mayor a 6 mm y menor de 19 mm.

H: Los abultamientos son la diferencia de niveles entre el punto más alto del abultamiento y el resto del pavimento es igual o mayor a 19 mm.

5. **Corrugación:**

También conocida como "lavadero", es una serie de crestas y valles perpendiculares a la dirección del tránsito, poco espaciadas entre sí, que ocurren a intervalos regulares, generalmente a menos de 3 m a lo largo del pavimento. Si los abultamientos ocurren en una serie con menos de 3.0 m de separación entre ellos, cualquiera sea la causa, el daño se denomina corrugación.

Tipo de medida: Se mide en metros cuadrados de área afectada.

L	M	H
No requiere intervención.	Sustitución de la capa de rodadura en mantenimiento rutinario.	Sustitución de la capa de rodadura en mantenimiento rutinario.

Tabla 6. Opciones de reparación "Corrugación".

Niveles de severidad:

L: El desnivel de la cresta respecto al nivel del resto del pavimento es de hasta 6 mm.

M: El desnivel de la cresta respecto al nivel del resto del pavimento es mayor a 6 mm y menor de 19 mm.

H: El desnivel de la cresta respecto al nivel del resto del pavimento es igual o mayor a 19 mm.

6. **Depresión:**

La depresión son áreas superficiales del pavimento localizadas con elevaciones ligeramente más bajas que las del pavimento circundante, las cuales causan irregularidad de la superficie. Las depresiones son formadas por el asentamiento de la subrasante o por una construcción incorrecta. Originan alguna rugosidad y cuando son suficientemente profundas o están llenas de agua pueden causar hidropelano.

Tipo de medida: Se mide en metros cuadrados del área afectada.

L	M	H
---	---	---

No requiere intervención.	Parqueo superficial, parcial o profundo.	Parqueo superficial, parcial o profundo.
---------------------------	--	--

Tabla 7. Opciones de reparación “Depresión”.

Niveles de severidad (Máxima profundidad de la depresión):

L: son iguales o mayores de 13 mm y menores de 25 mm de profundidad.

M: son iguales o mayores de 25 mm y menores de 50 mm de profundidad.

H: son iguales o mayores de 50 mm de profundidad.

7. *Grieta de borde:

Las grietas de borde son paralelas al eje de la carretera y por lo general están a una distancia no mayor de 0,6 m del borde exterior del pavimento. Este daño se acelera por una base o subrasante debilitada por la acción del agua cerca del borde del pavimento, fallas del drenaje longitudinal de la carretera, deficiente compactación del borde de la carretera, y por cambios volumétricos en la capa de desplante de las terracerías por cambios de humedad en el material.

Tipo de medida: La grieta de borde se mide en metros lineales.

L	M	H
No requiere intervención.	Sellado de grietas. Parqueo parcial – profundo.	Parqueo parcial – profundo.

Tabla 8. Opciones de reparación “Grieta de borde”.

Niveles de severidad:

L: Las grietas son menores de 3 mm de ancho y no están desgastadas en los bordes.

M: Las grietas están más desarrolladas que las de baja severidad, se presentan algunos desprendimientos del borde. El ancho de las grietas está entre 3 mm y 19 mm.

H: Son grietas que han progresado de modo tal que las piezas de borde se han desprendido.

8. *Grieta de reflexión de junta (de losas de concreto de cemento portland):

Las grietas por reflexión de junta de losas de concreto hidráulico son grietas que sólo se presentan en pavimentos flexibles construidos sobre pavimentos rígidos. Estas grietas forman rectángulos de la dimensión de las losas de concreto sobre las cuales se construyó la superficie asfáltica. Las causas que ocasionan las grietas por reflexión son los movimientos por efectos térmicos de las losas o por

cambios de humedad de las capas inferiores a éstas. Estos efectos se originan por un deficiente sellado de juntas o por el envejecimiento del material de sellado, lo que propicia la presencia de movimientos que generan tensiones en la capa inferior de la carpeta asfáltica, las cuales se ven reflejadas como grietas en la superficie, además no están relacionadas con la carga del tránsito, sin embargo, la carga puede provocar una ruptura de la superficie del pavimento flexible cerca de la grieta.

Tipo de medida: La grieta de reflexión de junta se mide en metros lineales. Si la grieta no tiene el mismo nivel de severidad a lo largo de toda su longitud, cada porción se registrará con la severidad que le corresponda de manera separada.

L	M	H
Sellado para anchos superiores a 3 .00 mm.	Sellado de grietas. Parcheo de profundidad parcial.	Parcheo de profundidad parcial. Reconstrucción de la junta.

Tabla 9. Opciones de reparación “Grieta de reflexión de junta”.

Niveles de severidad:

L: El ancho de la grieta sin sellado es menor de 3 mm o la grieta sellada de cualquier ancho (sello en condiciones satisfactorias).

M: El ancho de la grieta sin relleno es mayor de 3 mm y menor a 19 mm; grieta sin sello menor o igual a 19 mm rodeada de agrietamiento ligero; o grieta sellada de cualquier ancho rodeada de agrietamiento ligero.

H: Cualquier grieta con o sin sello rodeada por agrietamiento de severidad media o alta; grietas sin sello de más de 19 mm; o una grieta de cualquier ancho con los bordes severamente dañados o incluso desprendidos.

9. *Desnivel carril /berma.

El desnivel carril / berma es una diferencia de niveles entre el borde del pavimento y la berma. Este daño se debe a la erosión de la berma, el asentamiento berma o la colocación de sobrecarpetas en la calzada sin ajustar el nivel de la berma.

Tipo de medida: El desnivel carril / berma se mide en metros lineales.

L	M	H
---	---	---

Renivelación de las bermas para ajustar al nivel del carril.	Renivelación de las bermas para ajustar al nivel del carril.	Renivelación de las bermas para ajustar al nivel del carril.
--	--	--

Tabla 10. Opciones de reparación “Desnivel carril / berma”.

Niveles de severidad:

L: La diferencia en elevación entre el borde del pavimento y la berma está entre 25.0 y 51.0 mm.

M: La diferencia está entre 51.0 mm y 102.0 mm.

H: La diferencia en elevación es mayor que 102.00 mm.

10. *Grietas longitudinales y transversales

Las grietas longitudinales son paralelas al eje del pavimento o a la dirección de construcción con abertura mayor a 3 mm y pueden ser causadas por: una junta de carril del pavimento pobremente construida, contracción de la superficie de concreto asfáltico debido a bajas temperaturas o al endurecimiento del asfalto o al ciclo diario de temperatura, etc.

Las grietas transversales son sensiblemente perpendiculares al eje de la carretera, con abertura mayor de 3 mm, causadas por juntas transversales de construcción inadecuadamente trabajadas, uso de asfaltos muy duros, etc.

Tipo de medida: Se miden en metros lineales. La longitud y severidad de cada grieta debe registrarse después de su identificación. Si la grieta no tiene el mismo nivel de severidad a lo largo de toda su longitud, cada porción de la grieta con un nivel de severidad diferente debe registrarse por separado.

L	M	H
No requiere intervención.	Calafateándola en mantenimiento rutinario.	Calafateándola , parcheo parcial.

Tabla 11. Opciones de reparación “Grietas longitudinales y transversales”.

Niveles de severidad:

L: Grieta sin relleno de ancho menor que 10.0 mm.

M: Grieta sin relleno de ancho entre 10.0 mm y 76.0 mm, Grieta sin relleno de cualquier ancho hasta 76.0 mm, rodeada de grietas aleatorias pequeñas.

H: Cualquier grieta rellena o no, rodeada de grietas aleatorias pequeñas de severidad media o alta, Grieta sin relleno de más de 76.0 mm de ancho.

11. Parcheo y acometidas de servicios públicos:

Un parche es un área de pavimento la cual ha sido reemplazada con material nuevo para reparar el pavimento existente. que presentó deterioros como oquedades por desprendimientos o desintegración inicial de los agregados, en zonas localizadas y relativamente pequeñas, cuando la base del pavimento se encuentra en condiciones estables y sin exceso de agua, con mezcla asfáltica nueva.

Tipo de medida: Los parches se miden en metros cuadrados del área afectada. Sin embargo, si un sólo parche tiene áreas de diferente severidad, estas deben medirse y registrarse de forma separada.

L	M	H
No requiere intervención.	sustitución del parche.	Sustitución del parche.

Tabla 12. Opciones de reparación "Parcheo".

Niveles de severidad:

L: El bache reparado no presenta deformaciones ni agrietamientos y su superficie esta nivelada.

M: El bache reparado está moderadamente deteriorado por desprendimiento de agregado y abultamiento de la superficie.

H: El bache reparado presenta deterioros múltiples y condiciones de funcionalidad que afectan la seguridad del usuario.

12. Pulimento de agregados:

El pulimento de agregados es la pérdida de la textura superficial de los agregados gruesos que integran una carpeta asfáltica, es decir, la porción de agregado que se extiende por encima del asfalto es muy pequeña y/o no hay partículas de agregado ásperas o angulares que proporcionen una buena microtextura, haciendo que la superficie se vuelva lisa al tacto. Por lo tanto, la textura del pavimento no contribuye de manera significativa a reducir la velocidad del vehículo.

Tipo de medida: Se mide en metros cuadrados de área afectada. Si se contabiliza exudación, no se tendrá en cuenta el pulimento de agregados.

L	M	H
No requiere intervención.	Tratamiento superficial, sobrecarpeta, fresado y sobrecarpeta.	Tratamiento superficial, sobrecarpeta, fresado y sobrecarpeta.

. Tabla 13. Opciones de reparación "Pulimento de agregados".

Niveles de severidad:

No se define ningún nivel de severidad. Sin embargo, el grado de pulimento deberá ser significativo antes de ser incluido en una evaluación de la condición y contabilizado como defecto.

13. *Baches:

Los Baches son áreas en forma cóncava en la superficie del pavimento, donde se ha perdido el material que lo integraba. Por lo general, tienen un diámetro menor a 75 cm y suelen tener los bordes bien definidos y lados verticales cerca de la parte superior. La aparición de los baches es debido a que existen deterioros en la carpeta asfáltica como deformaciones y oquedades por desprendimiento o desintegración inicial de los agregados.

Tipo de medida: Los huecos se miden contando aquellos que sean de severidades baja, media y alta, y registrándose separadamente.

L	M	H
No requiere intervención o realizar un parcheo parcial.	Parcheo parcial o profundo.	Parcheo profundo.

Tabla 14. Opciones de reparación "Bacheo".

Niveles de severidad:

L: En profundidades de 13 mm a 25 mm, con un diámetro de entre 10 cm y 45 cm. En profundidades mayores de 25 mm y hasta 50 mm, con un diámetro de entre 10 cm y 20 cm.

M: En profundidades de 13 mm a 25 mm, con un diámetro de entre 45 cm y 75 cm. En profundidades mayores de 25 mm y hasta 50 mm, con un diámetro de entre 20 cm y 45 cm. En profundidades mayores de 50 mm, con un diámetro de entre 10 cm y 45 cm.

H: En profundidades mayores de 25 mm y hasta 50 mm, con un diámetro de entre 45 cm y 75 cm.
En profundidades mayores de 50 mm, con un diámetro de entre 45 cm y 75 cm.

14. Cruce de vía férrea.

Los defectos asociados al cruce de vía férrea son depresiones o abultamientos alrededor o entre los rieles.

Tipo de medida: El área del cruce se mide en pies cuadrados (ó metros cuadrados) de área afectada. Si el cruce no afecta la calidad de tránsito, entonces no debe registrarse. Cualquier abultamiento considerable causado por los rieles debe registrarse como parte del cruce.

L	M	H
No requiere intervención.	Parqueo superficial o parcial de la aproximación. Reconstrucción del cruce.	Parqueo superficial o parcial de la aproximación. Reconstrucción del cruce.

Tabla 15. Opciones de reparación "Cruce de vía férrea".

Niveles de severidad:

L: El cruce de vía férrea produce calidad de tránsito de baja severidad.

M: El cruce de vía férrea produce calidad de tránsito de severidad media.

H: El cruce de vía férrea produce calidad de tránsito de severidad alta.

15. Ahuellamiento.

Es una depresión en la superficie de las huellas de las ruedas. Puede presentarse el levantamiento del pavimento a lo largo de los lados del ahuellamiento, pero, en muchos casos, éste sólo es visible después de la lluvia, cuando las huellas están llenas de agua, causadas por: cargas de tránsito mayores a las consideradas en el diseño del pavimento, mezclas asfálticas inestables susceptibles a ser desplazadas ante la aplicación de cargas.

Tipo de medida: se mide en metros cuadrados de área afectada y su severidad está definida por la profundidad media de la huella. La profundidad media del ahuellamiento se calcula colocando una regla perpendicular a la dirección del mismo, midiendo su profundidad.

L	M	H
No requiere intervención.	Parqueo superficial, parcial o profundo.	Parqueo superficial, parcial o profundo. Fresado y sobrecarpeta.

Tabla 16. Opciones de reparación "Ahuellamiento".

Niveles de severidad:

L: En Red Básica Libre y Red Secundaria: valores menores a 7 mm. En Autopistas y Corredores Carreteros: valores menores a 5 mm.

M: En Red Básica Libre y Red Secundaria: valores entre 7,1 mm y 9 mm. En Autopistas y Corredores Carreteros: valores entre 5,1 mm y 8 mm.

H: En Red Básica Libre y Red Secundaria: valores mayores a 9 mm. En Autopistas y Corredores Carreteros: valores mayores a 8 mm.

16. Desplazamiento.

son pequeños deslizamientos ascendentes localizados de la superficie del pavimento flexible adyacentes a losas de pavimento rígido, o corrimientos longitudinales permanentes en un área localizada por efecto de las cargas del tránsito, una de las causas que ocasionan esta falla son: efectos de congelación del agua interior de las capas hidráulicas, la infiltración y acumulación de material en grieta en combinación con cargas de tránsito, etc.

Tipo de medida: Se miden en metros cuadrados de área afectada. Los desplazamientos que ocurren en parches se consideran para el inventario de daños como parches.

L	M	H
No requiere intervención.	Parcheo parcial o profundo.	Fresado, parcheo parcial o profundo.

Tabla 17. Opciones de reparación "Desplazamiento".

Niveles de severidad:

L: La diferencia de niveles entre el punto más alto del desplazamiento y el resto del pavimento es de hasta 6 mm.

M: La diferencia de niveles entre el punto más alto del desplazamiento y el resto del pavimento es mayor a 6 mm y menor de 19 mm.

H: La diferencia de niveles entre el punto más alto del desplazamiento y el resto del pavimento es igual o mayor a 19 mm.

17. Grietas parabólicas.

Las grietas parabólicas por deslizamiento son grietas en forma de medialuna, generalmente transversales al eje de la carretera. Son producidas cuando las ruedas que frenan o giran inducen el deslizamiento o la deformación de la superficie del pavimento. Usualmente, este daño ocurre en presencia de una mezcla asfáltica de baja resistencia. Este deterioro generalmente ocurre en las sobrecarpetas cuando existe una mala unión entre la capa de superficie y la siguiente capa de la estructura del pavimento

Tipo de medida: El área asociada con una grieta parabólica se mide en metros cuadrados y se califica según el nivel de severidad más alto presente en la misma.

L	M	H
No requiere intervención.	Parqueo parcial.	Parqueo parcial.

Tabla 18. Opciones de reparación “Grietas parabólicas”.

Niveles de severidad:

L: El ancho promedio de la grieta es menor de 3 mm.

M: El ancho de grieta promedio está entre 3 mm y 19 mm y el área alrededor de la grieta está moderadamente desintegrada o rodeada de grietas secundarias.

H: El ancho promedio de la grieta es mayor de 19 mm y el área alrededor de la grieta está desintegrada, con piezas fáciles de desprender.

18. Hinchamiento.

Se caracteriza por un pandeo hacia arriba de la superficie del pavimento, una onda larga y gradual con una longitud mayor que 3.0 m. El hinchamiento puede estar acompañado de agrietamiento superficial.

Tipo de medida: El hinchamiento se mide en metros cuadrados del área afectada.

L	M	H
No requiere intervención.	Reconstrucción.	Reconstrucción.

Tabla 19. Opciones de reparación “Hinchamiento”.

Niveles de severidad:

L: El hinchamiento de baja severidad no es siempre fácil de ver, pero puede ser detectado conduciendo en el límite de velocidad sobre la sección de pavimento. Si existe un hinchamiento se producirá un movimiento hacia arriba.

M: El hinchamiento causa calidad de tránsito de severidad media.

H: El hinchamiento causa calidad de tránsito de alta severidad.

19. Meteorización / desprendimiento de agregados.

El desprendimiento de agregados es la pérdida de partículas de agregado grueso de la capa superficial del pavimento flexible. Su aparición se presenta en figuras de forma y tamaño irregular. Este daño indica que, o bien el ligante asfáltico se ha endurecido de forma apreciable, o que la mezcla presente es de pobre calidad. Una de sus causas que lo ocasionan son: un bajo de contenido de asfalto, insuficiente compactación, desprendimiento de asfalto, etc.

Tipo de medida: La meteorización y el desprendimiento se miden en metros cuadrados de área afectada.

L	M	H
No requiere intervención.	Sello superficial, tratamiento superficial, sobrecarpeta.	Tratamiento superficial, sobrecarpeta, reciclaje, reconstrucción.

Tabla 20. Opciones de reparación "Desprendimiento de agregados".

Para los niveles M y H, si el daño es localizado, por ejemplo, por derramamiento de aceite, se hace parcheo parcial.

Niveles de severidad:

L: La pérdida de agregado grueso es mayor a 20 piezas por metro cuadrado o existen zonas de agregado grueso faltante (o ambos).

M: La pérdida de agregado grueso es mayor a 20 piezas por metro cuadrado o existen zonas de agregado grueso faltante (o ambos).

H: La superficie es muy áspera y con huecos. El agregado grueso puede no estar por completo en algunas zonas.

9. **Escribe:** Se identifica el número del tipo de falla.

10. **Cantidad y severidad:** Se tomará en consideración el tipo de medida de cada falla anotando la cantidad de la misma.
11. **Severidad total:** De acuerdo a la cantidad y tipo de falla se determina su severidad **L, M, H**.
12. **Tipo de falla:** Es un resumen del punto 9.
13. **Severidad:** Es un resumen del punto 10.
14. **Densidad:** Toma la cantidad de cada tipo de daño en cada nivel de gravedad y divídelo entre el área total de la unidad de muestreo. Luego, muestra el resultado como un porcentaje, esto representa la densidad del daño en el nivel de gravedad indicado dentro de la unidad que estás analizando.
15. **Deducir valor:** Para obtener el valor deductivo se utilizan las gráficas utilizadas en la norma **ASTM D6433-23 (ASTM, 2023)** que se muestran a continuación, donde se utiliza el valor de la densidad obtenida y la severidad de cada una de las fallas (L, M, H).

Curvas para pavimentos asfálticos.

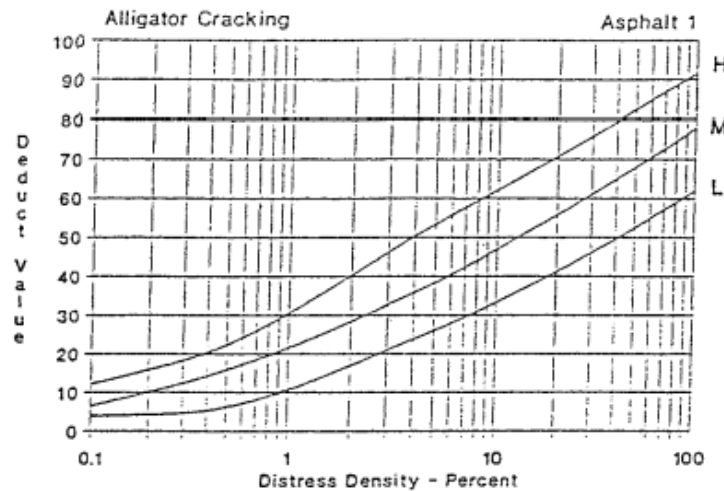


Figura 11. Valor deductivo “Agrietamiento de cocodrilo”.

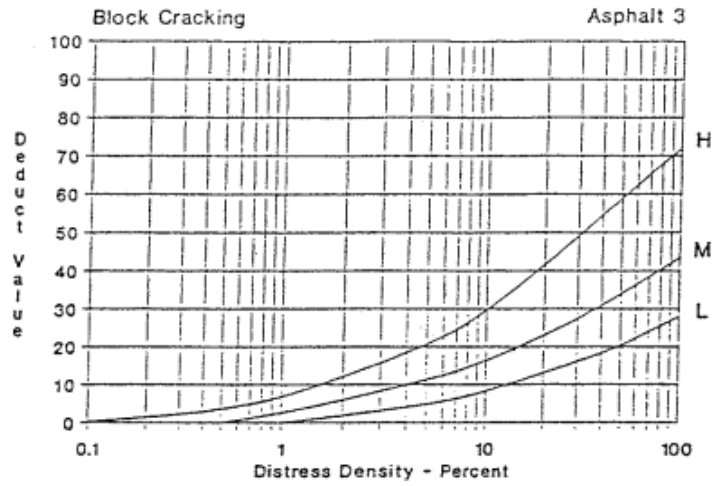


Figura 12. Valor deductivo "Agrietamiento de bloque".

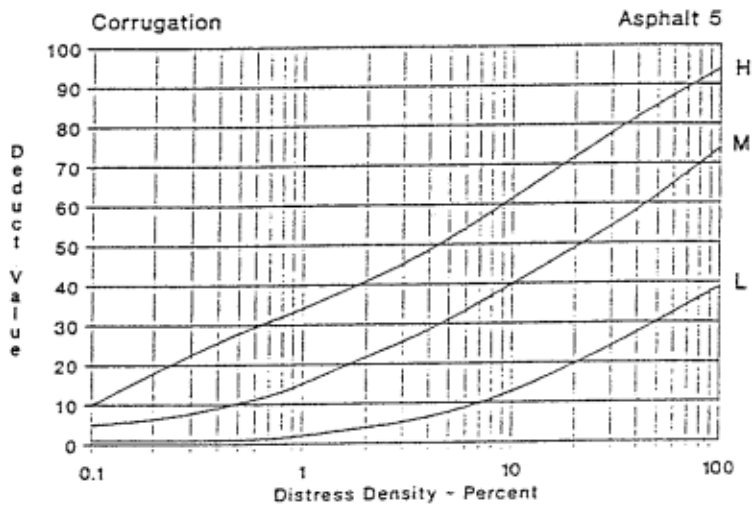


Figura 13. Valor deductivo "Corrugación".

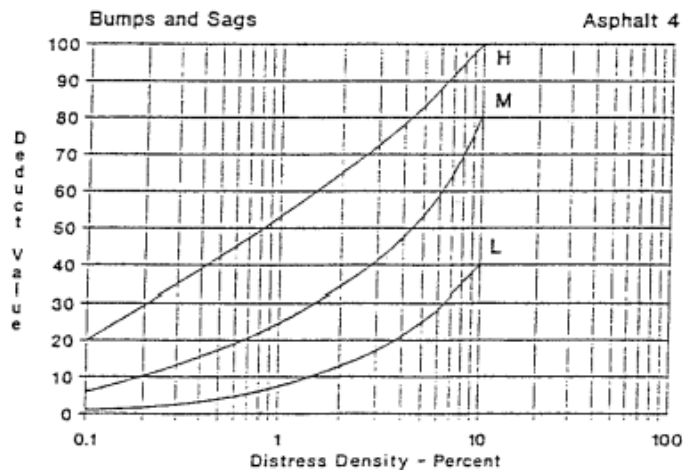


Figura 14. Valor deductivo "Hundimientos".

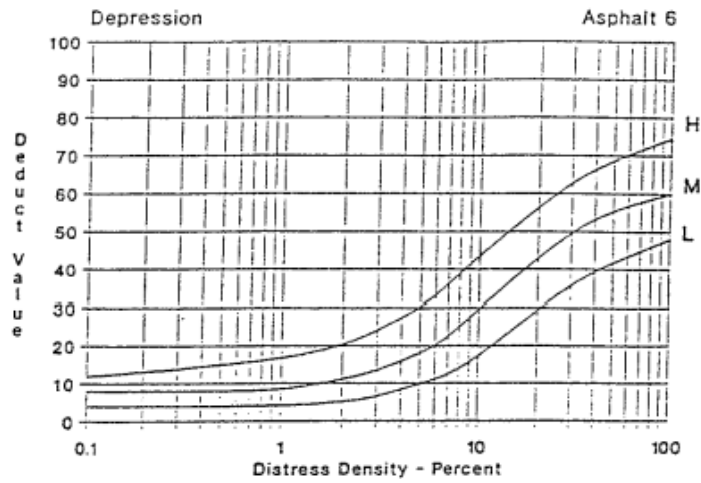


Figura 15. Valor deductivo "Depresión".

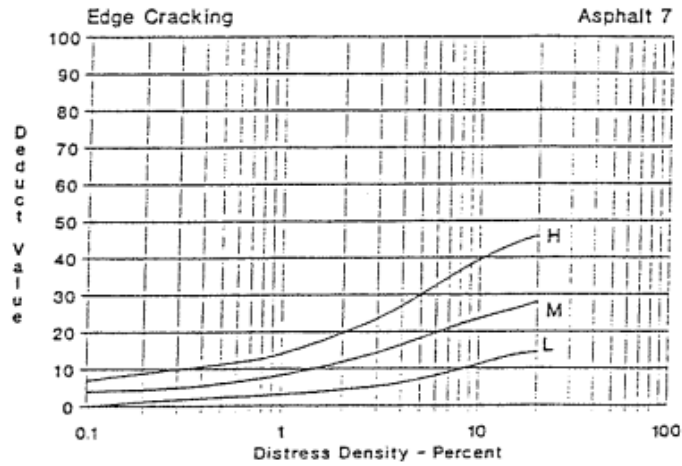


Figura 16. Valor deductivo "Agrietamiento de borde".

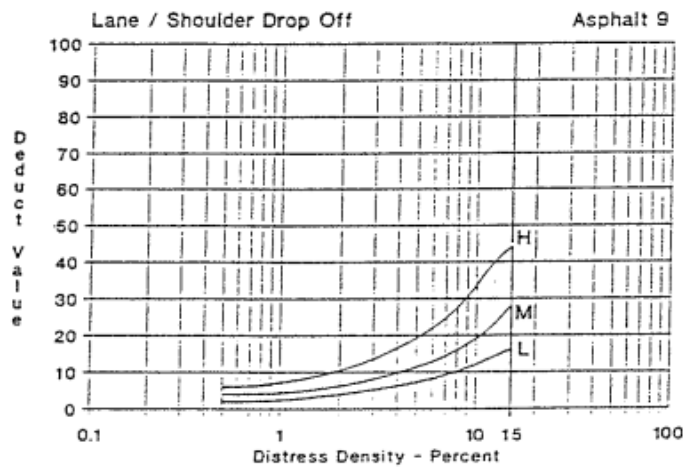


Figura 17. Valor deductivo "Caída del borde".

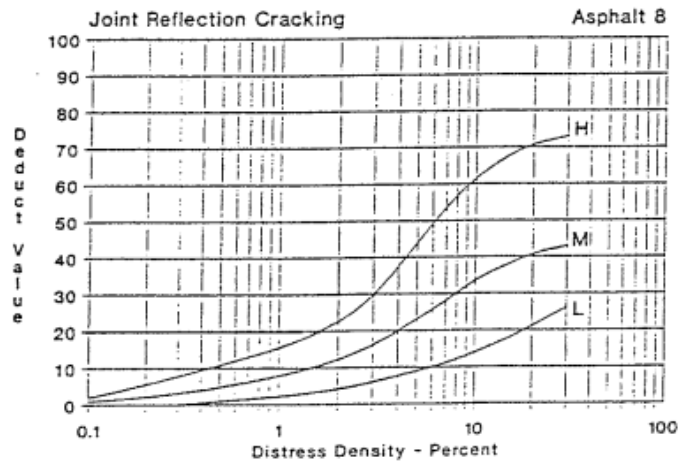


Figura 18. Valor deductivo "Agrietamiento por reflexión de juntas".

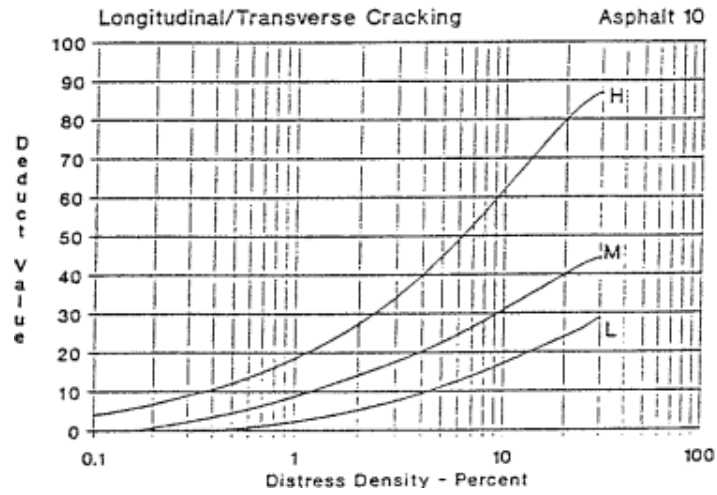


Figura 19. Valor deductivo "Agrietamiento longitudinal / transversal".

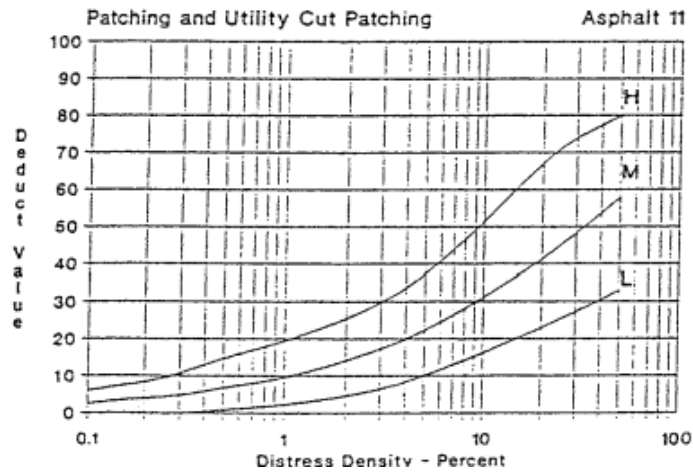


Figura 20. Valor deductivo "Parcheo".

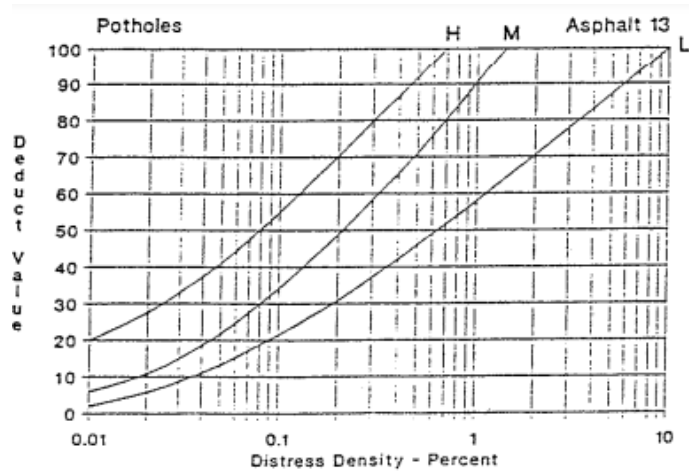


Figura 21. Valor deductivo "Bacheo".

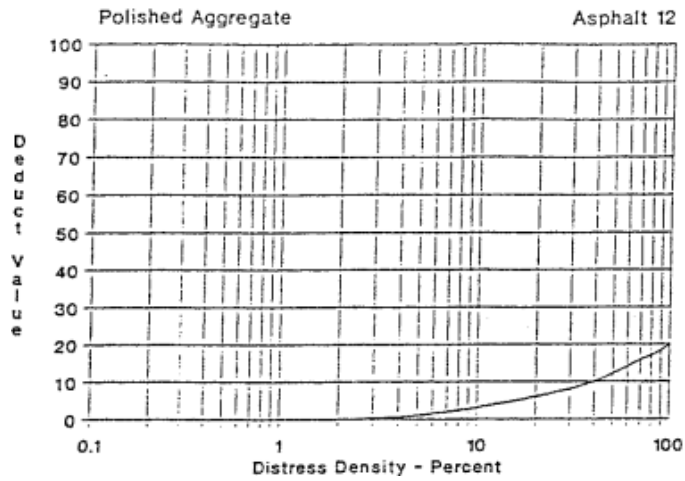


Figura 22. Valor deductivo "Agregado de pulido".

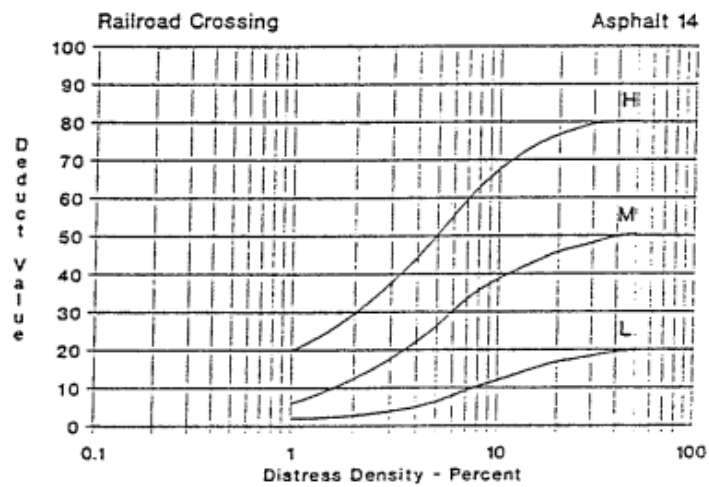


Figura 23. Valor deductivo "Cruce de ferrocarril".

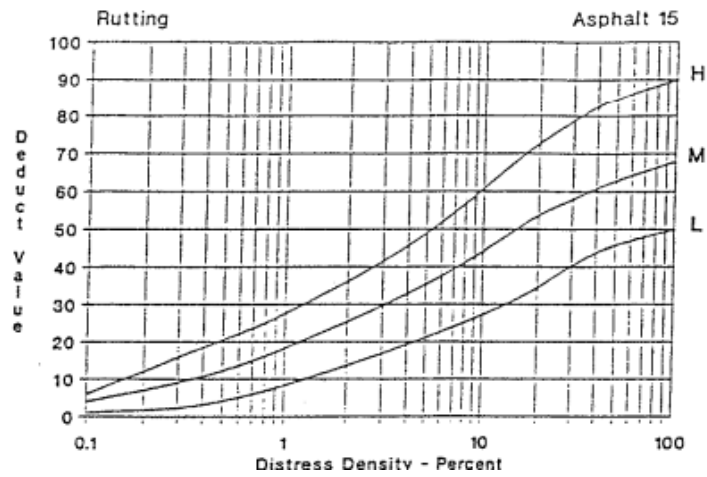


Figura 24. Valor deductivo "Asentamiento".

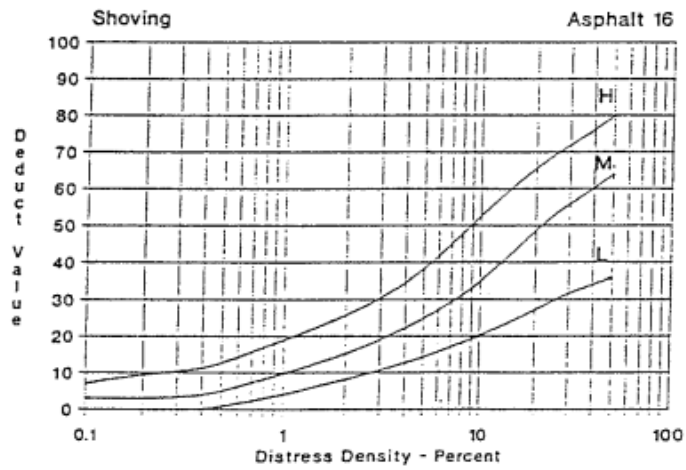


Figura 25. Valor deductivo "Corrugación".

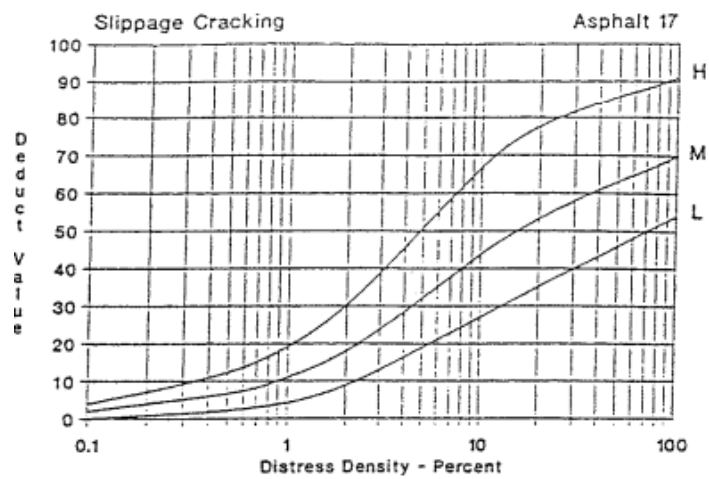


Figura 26. Valor deductivo "Grietas por deslizamiento".

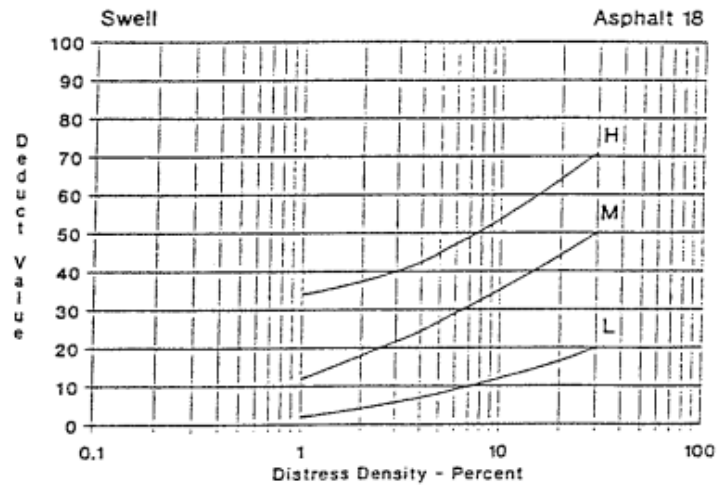


Figura 27. Valor deductivo "Hinchazón".

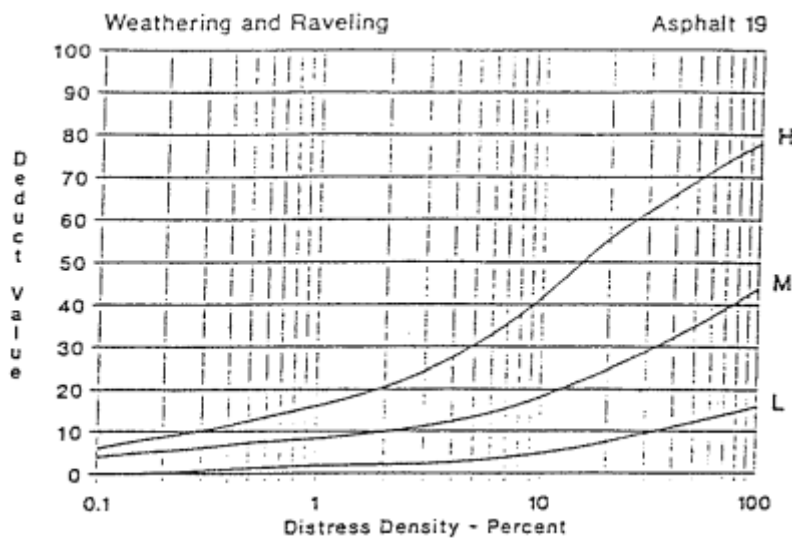


Figura 28. Valor deductivo "Desmoronamiento".

16. **q:** Se obtiene de la suma de la cantidad de fallas del punto 12.
17. **Valor de deducción total:** Es la suma del punto 15.
18. **Valor de deducción corregido (CDV):** Se obtiene mediante la gráfica que nos muestran en la norma de ASTM D6433-23 donde ocuparemos los valores del número de q y el valor de deducción total.

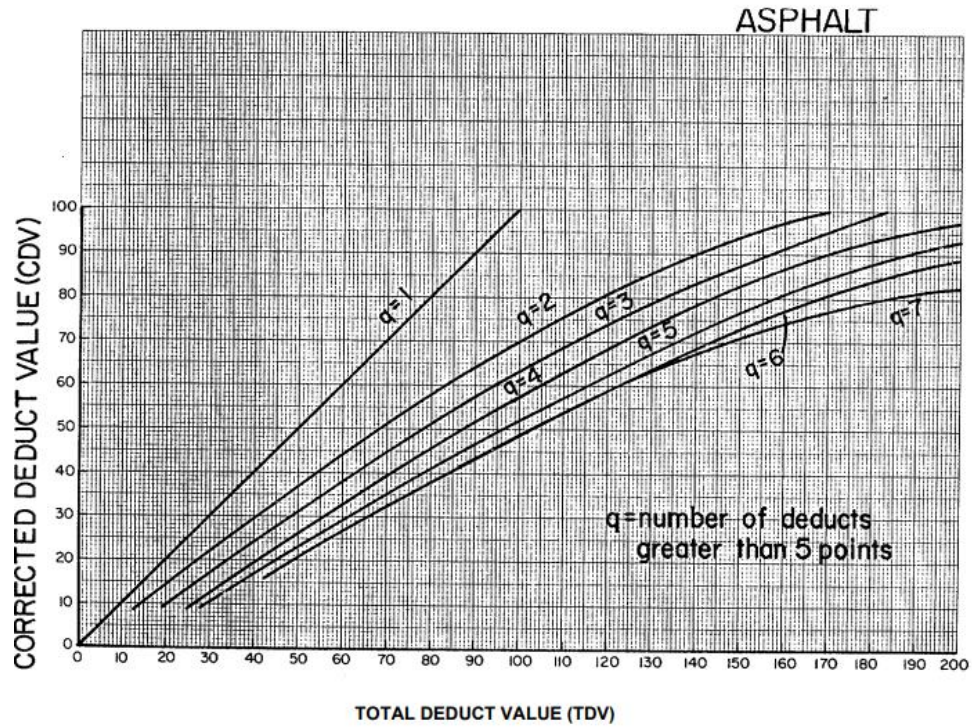


Figura 29. Valor deductivo “Valor deducido corregido”.

19. **PCI:** El valor obtenido del CDV se le restara a 100, siendo el resultado final del PCI.
20. **Calificación:** Este apartado se define de acuerdo al valor del PCI obtenido con ayuda de la tabla 1.
21. **PCI:** Resultado final de la unidad de muestreo.

Ejemplo

Hoja de inspección del pavimento asfáltico.

Zona:	Blvrd. Venustiano Carranza	Sección:	Carr. Sta Isabel - Blvrd. Lázaro Cárdenas.
Fecha:	06 de Diciembre del 2022	Unidad de muestra:	1 / 12.
Encuesta por:	Cuadrilla 02	Area de muestra:	293.27 m ²

Tipos de falla.				Bosquejo:					
1-. Piel de cocodrilo.	* 10-. Grietas longitudinal y transversal.								
2-. Exudación.	11-. Parcheo y parcheo de corte de utilidad.								
3-. Agritamiento por bloque.	12-. Pulimiento.								
* 4-. Abultamiento y hundimientos.	* 13-. Baches.								
5-. Corrugación.	14-. Cruce de vía ferrea								
6-. Depresión.	15-. Ahuellamiento.								
* 7-. Grieta a bordes.	16-. Desplazamiento.								
* 8-. Grieta a reflexión de junta.	17-. Grieta parabolica.								
* 9-. Desnivel carril / berma.	18-. Hinchamiento.								
	19-. Desprendimiento de agregados.								
Tipo de falla existente, cantidad y gravedad.									
Escribe. →	3								
Quantity y severity	293.27 L								
Total Severity (L, M, H).	293.27 L								
Cálculo de PCI.									
Tipo de falla.	Severidad.	Densidad.	Deducir Valor	PCI = 100 - CDV = PCI = 100 - 28 = 72					
3	L	100	28						
				Calificación = MUY BUENO					
q =	1	Valor de deducción total.	28	PCI =	72				
		Valor de deducción corregido (CDV).	28						

Figura 30. Ejemplo del uso del formato de inspección.

A continuación, se presenta un formato de inspección realizado en una vialidad construida de pavimento asfáltico. La hoja de inspección se divide en tres partes principales: datos generales, descripción de fallas y cálculo de PCI. La primera parte del formato recaba los datos generales del lugar inspeccionado (Blvrd. Venustiano Carranza, Carr. Sta Isabel - Blvrd. Lázaro Cárdenas), la fecha (6 de diciembre del 2022) y el equipo que realizó la inspección, así como el bosquejo del área a

inspeccionar (anchode calzada por largo de la unidad de muestreo). Para el apartado de cantidad, se registró que el daño afectaba toda el área inspeccionada (293.27 m²), y una severidad baja (L).

Esto indica que, aunque el agrietamiento estaba presente en toda la superficie, su impacto no era significativo, lo que sugiere que el pavimento se encuentra en una etapa temprana de deterioro y posiblemente solo requiere mantenimiento rutinario a través del sellado de grietas. En el último apartado “cálculo de PCI” se hace un resumen de las fallas mencionadas en el apartado 2, la densidad se obtiene al dividir la cantidad total de falla entre el área total inspeccionada, en este caso se obtuvo el 100%, una vez obtenido el valor de la densidad se utilizan las gráficas correspondientes al tipo de falla para encontrar el valor deductivo donde con para este ejemplo el valor de la densidad es 100 y el tipo de severidad encontrada fue “L”, el punto de intersección definirá el valor deductivo cuyo resultado es 28.

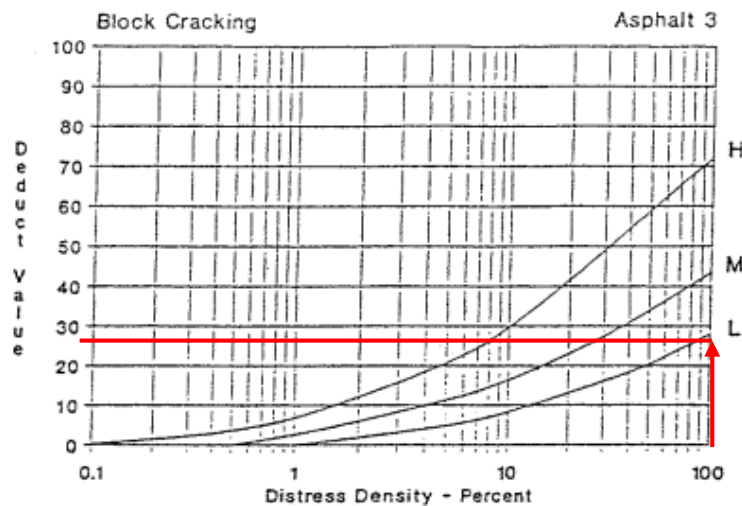


Figura 31. Ejemplo del uso de la gráfica del valor deductivo según el tipo de falla.

Una vez obtenido el valor deductivo se procede a obtener el valor deductivo corregido (CDV), utilizando el valor deductivo se correlaciona con el número total de fallas en este caso $q=1$, por lo que se obtuvo en esta ocasión el mismo valor de CVD. Por último, se calculó el PCI realizando mediante la fórmula $100-CVD$, dando como resultado el valor del PCI final de la unidad de muestreo de 72 lo que es una condición superficial muy buena de acuerdo a la tabla 1.

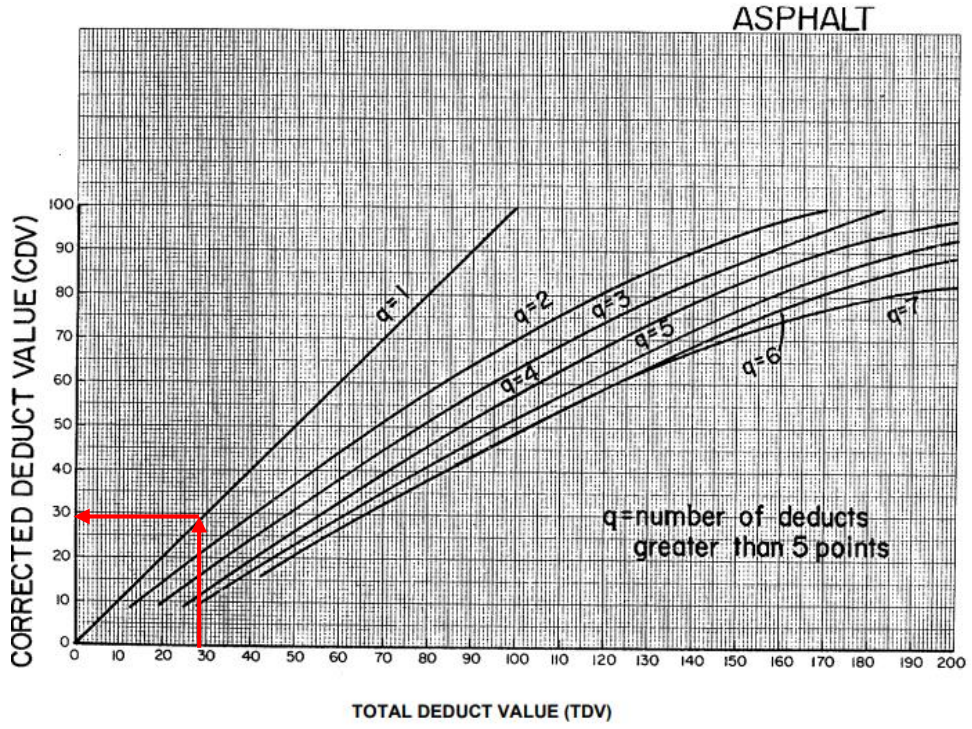


Figura 32. Ejemplo del uso de la gráfica del valor deductivo corregido.

Referencias

- ASTM (2023) Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys.
- Campos Elorreaga, D. E., & Layza Mendoza, N. J. (2021). Propuesta de diseño del pavimento, tramo Km 04+ 000 al Km 14+ 000 de la carretera Otuzco-Usquil, La Libertad 2021.
- IMT (2023). Determinación de los Deterioros Superficiales de los Pavimentos (DET). M·CSV·CAR·1·03·008/23
- López Carreño, R. D., Pialarissi Cavalaro, S. H., Pujadas Álvarez, P., & Aguado de Cea, A. (2017). Innovaciones y avances en el ámbito de los pavimentos urbanos para smart cities. *Cemento hormigón: fabricación, investigación y aplicaciones del cemento y del hormigón*, (982), 72-79.
- Osuna Ruíz, R. E. (2008). "Propuesta para la implementación de un sistema de administración de pavimentos para la red vial de la ciudad de Mazatlán, Sin.". (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/449391>
- PIARC (2014). Importancia de la conservación de carreteras. *Francia*.
- STC (2002). Catálogo de deterioros de pavimentos flexibles. Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica.
- Vallicelli, L. (2002). Un modelo de desarrollo sostenible: Curitiba, Brasil. En: *Las nuevas funciones urbanas: gestión para la ciudad sostenible-LC/L*. 1692-P-2002-p. 71-76.
- Vásquez, L. (2002). Pavement Condition Index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. *Manizales*. Recuperado, desde: <http://www.camineros.com/docs/cam036.pdf>, 24.