



EDITORIAL
NAVEGANTE



ESTIMACIÓN DEL VALOR IRI CON METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN BASADA EN TELÉFONOS INTELIGENTES PARA LA MEJORA DEL TRANSPORTE REGULAR DE PERSONAS EN EL PERÚ

Walter Cardoza Chura
Martin Paucara Rojas



Walter Cardoza Chura

Correo: wcardozach@gmail.com

Perfil: Ingeniero Civil Supervisor.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4997-8396>

Martin Paucara Rojas

Correo: mpaucarar@unjbg.edu.pe

Perfil: Ingeniero Civil, Docente Universitario.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5169-102X>

Afiliación: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

ESTIMACIÓN DEL VALOR IRI CON
METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN
BASADA EN TELÉFONOS
INTELIGENTES PARA LA MEJORA
DEL TRANSPORTE REGULAR DE
PERSONAS EN EL PERÚ

Walter Cardoza Chura

Martin Paucara Rojas



EDITORIAL
NAVEGANTE

Todas nuestras publicaciones son sometidas a revisión doble-ciego de pares académicos (*Peer Review Double Blind*ed).

Esta publicación cuenta con licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada 3.0 Unported License.



ISBN: 978-628-7736-59-7

© Walter Cardoza Chura

© Martin Paucara Rojas

2025

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.16883176>

©Editorial Navegante

www.editorialnavegante.com

Queda prohibida la reproducción bajo cualquier modalidad de toda o una parte de esta obra sin autorización expresa del titular de los derechos.

Diseño de carátula y composición: Editorial Navegante

Edición electrónica: Editorial Navegante

Editado en Colombia/ *Published in Colombia*

ESTIMACIÓN DEL VALOR IRI CON
METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN
BASADA EN TELÉFONOS
INTELIGENTES PARA LA MEJORA
DEL TRANSPORTE REGULAR DE
PERSONAS EN EL PERÚ

Walter Cardoza Chura

Martin Paucara Rojas



EDITORIAL
NAVEGANTE

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
INTRODUCCIÓN	10

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA EVALUACIÓN SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS Y EL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)	12
1.1 Introducción a la Gestión de la Infraestructura Vial	12
1.2 El Índice de Rugosidad Internacional (IRI)	16
1.3.1 Equipos de Alto Rendimiento: Perfilómetros Láser	20
1.3.2 Equipos de Respuesta: El Rugosímetro y otros Dispositivos de Contacto.....	24
1.3.3 Métodos Manuales y de Menor Precisión (Clase III y IV)	25

1.3.4 Ventajas y Limitaciones de los Métodos Convencionales en el Contexto Peruano	29
1.4 Normativa Nacional e Internacional Aplicable	31

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL IRI MEDIANTE TELÉFONOS INTELIGENTES.....	35
--	----

2.1. El Teléfono Inteligente como Sensor de Datos Viales	35
2.2 Procesamiento de Datos del Acelerómetro para la Estimación del IRI.....	38
2.3 Planificación y Ejecución de Campañas de Medición.....	39
2.4 Casos de Estudio y Validación en el Perú	41

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DEL IRI PARA LA MEJORA DEL TRANSPORTE REGULAR DE PERSONAS EN EL PERÚ	45
--	----

3.1 Diagnóstico de la Influencia de la Rugosidad en el Sistema de Transporte	45
3.2 Integración de Datos de IRI en los Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS)	49
3.3 Metodología de Priorización para el Mantenimiento y Rehabilitación Vial.....	52
3.4 Hacia un Sistema de Transporte Público más Eficiente y Sostenible.....	58

CAPÍTULO IV

DETERMINACIÓN DEL VALOR IRI
CON LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN BASADAS
EN TELÉFONOS INTELIGENTES PARA LA MEJORA
DEL TRANSPORTE REGULAR DE PERSONAS
EN LA AV. INTERNACIONAL, TACNA – 202461

4.1. Introducción61

4.2 Aspectos Metodológicos.....64

 4.2.1 Objetivo General y Específicos64

 4.2.2. Metodología aplicada65

4.3 Hallazgos68

4.4 Discusión y Conclusiones.....73

 4.4.1 Discusión.....73

 4.4.2 Conclusiones.....77

REFLEXIONES FINALES.....80

REFERENCIAS.....82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	
<i>Representación Gráfica del Modelo de Cuarto de Carro</i>	19
Figura 2	
<i>Equipo Perfilómetro Láser</i>	22
Figura 3	
<i>Equipo Laser Crack Measurement System</i>	23
Figura 4	
<i>Perfilómetro Láser RSP MK-III y/o IV</i>	25
Figura 5	
<i>Bump Integrator: Equipo de Clase III</i>	27
Figura 6	
<i>Roughometer II: Equipo de Clase III</i>	28
Figura 7	
<i>Rugosímetro MERLIN</i>	29
Figura 8	
<i>Textura de la Superficie vs. Rugosidad de la Superficie</i>	47
Figura 9	
<i>Etapas de un Sistema de Gestión de Pavimentos (PMS)</i>	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1

Evaluación y Valoración del IRI, según Tipo de Vía..... 34

Tabla 2

*Daños Comunes en el Pavimento Flexible Evaluados
con Metodologías de Priorización Basadas en el Estado Físico
del Pavimento.....* 56

INTRODUCCIÓN

La evaluación superficial de pavimentos constituye una práctica elemental en la gestión y mantenimiento de la infraestructura vial, orientada a la preservación de la seguridad y el confort de los usuarios, centrada en la caracterización de las condiciones de la superficie del pavimento, donde uno de los parámetros principales para cuantificar su estado es el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) (Cepeda, 2019). El IRI es una medida estándar a nivel global que cuantifica la irregularidad longitudinal de una superficie, expresada comúnmente en metros por kilómetro (m/km). Un valor de IRI bajo indica una superficie más lisa y en mejores condiciones, mientras que un valor alto denota una superficie irregular y deteriorada. La determinación precisa del IRI es crucial para la toma de decisiones informadas sobre la priorización de políticas dirigidas a la rehabilitación o el mantenimiento de las vías (Homero, 2021).

Tradicionalmente, la medición del IRI se ha realizado con equipos especializados y de alto costo, como los perfilómetros láser, pero el avance tecnológico ha propiciado el desarrollo de nuevas metodologías más accesibles y eficientes. En este contexto, la metodología para la estimación del IRI mediante teléfonos inteligentes ha emergido como una alternativa viable, ya que estos dispositivos móviles, equipados con acelerómetros y sensores de geolocalización, permiten registrar las vibraciones del vehículo durante su desplazamiento; a partir de estos datos, y mediante algoritmos de procesamiento de señales, es posible calcular un valor de IRI con una precisión comparable a la de los métodos convencionales.

La aplicación de la estimación del IRI mediante teléfonos inteligentes tiene un impacto directo y significativo en la mejora del transporte regular de mercancías y personas en el Perú. La capacidad de obtener datos en tiempo real sobre la calidad de las carreteras permite a las autoridades competentes identificar de manera proactiva los tramos viales deteriorados, y con esta información, es posible priorizar los trabajos de mantenimiento y rehabilitación en las zonas que más lo necesitan, optimizando así la asignación de recursos. La implementación de esta tecnología contribuye con la reducción de los costos operativos de los vehículos, disminuye el tiempo de viaje y, lo más importante, mejora la seguridad y el confort de los pasajeros, elevando la calidad del servicio de transporte público (Celi, 2018).

La determinación del valor IRI utilizando estas metodologías basadas en teléfonos inteligentes se consolida como una herramienta estratégica para la planificación y gestión de la infraestructura vial en el país. Al integrar esta tecnología en los programas de gestión de pavimentos, se establece un marco de trabajo sólido para la mejora continua del transporte regular de personas, fomentando un desarrollo vial más sostenible y eficiente.

El objetivo de esta investigación es analizar y validar la aplicabilidad de metodologías de evaluación basadas en teléfonos inteligentes para determinar el IRI del pavimento en la av. Internacional, Tacna, con el fin de optimizar las condiciones del transporte público de pasajeros durante el año 2024 (Cardoza y Paucara, 2024).

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA EVALUACIÓN SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS Y EL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)

1.1 Introducción a la Gestión de la Infraestructura Vial

La infraestructura vial constituye un factor de gran importancia para favorecer el acceso de las empresas y sus productos al mercado, permitiendo el desplazamiento de personas y el intercambio de bienes y servicios. Esta infraestructura de apoyo a la producción y comercialización promueve el crecimiento económico, la generación de empleo, la productividad, la expansión comercial y el desarrollo de un país o región (Cortés, 2018, como se citó en Crispin y Estrada, 2025).

El financiamiento público y privado en proyectos de infraestructura vial de calidad es fundamental para mejorar la competitividad y la eficiencia tanto en mercados nacionales como internacionales; el desarrollo de la vialidad permite la integración de las unidades productivas con los centros de consumo al nivel nacional y de exportación al nivel global (Serebrisky et al. 2015; Vásquez y Bendezu, 2008; como se citaron en Crispin y Estrada, 2025).

Por consiguiente, el adecuado mantenimiento de la infraestructura vial es esencial para garantizar su funcionalidad, seguridad y durabilidad a lo largo del tiempo, por tanto se requiere una buena administración para realizar los gastos necesarios para mantener en buenas condiciones toda esta infraestructura; para ello se requieren herramientas necesarias para realizar un buen diagnóstico del estado de las carreteras y los niveles de servicio que ofrecen (Crispin y Estrada, 2025; Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, Asociación Civil [AMIVTAC], 2017, como se citó en Ancco, 2018).

Al nivel internacional, las carreteras presentan distintas condiciones, pues algunas de ellas se encuentran en buen estado mientras que otras resultan reprobadas en materia de vialidad. En el continente asiático, generalmente se evidencia que la construcción de carreteras cumple con los requisitos adecuados, ofreciendo un buen servicio a los transportistas y usuarios en general. Por ejemplo, Hong Kong y Singapur son países que cuentan con buenas condiciones de vialidad (Ancco, 2018).

Por otro lado, países como Australia y el Reino Unido constituyen mercados de infraestructura consolidados desde la década de 1980. En Australia, Canadá y algunos países de Europa, se han establecido asociaciones o alianzas público-privadas avanzadas. Australia es un país que tiene mucho en común con Europa y ha sido pionera en infraestructura, a diferencia de los Estados Unidos, donde la inversión en infraestructura ha crecido de manera lenta en comparación con otros países industrializados, recurriendo al financiamiento en los mercados de bonos municipales (exentos de impuestos) o mercados emergentes (Towers, 2019, como se citó en Chinchay, 2023).

En América Latina y el Caribe, según Serebrisky et al. (2015, como se citaron en Chinchay, 2023), la inversión en infraestructura debería estar en un promedio de 5 % anual del PIB. No obstante, ha venido disminuyendo como en el caso de Brasil, pasando de 5,2 % en 1980 a 2,0 % en 2013 (Góes et al., 2018, como se citaron en Chinchay, 2023). De modo que muchos

países de América Latina adolecen de infraestructura vial adecuada, dado que la construcción de la vialidad se realiza en condiciones muy precarias, ocasionando gran insatisfacción en los transportistas y demás usuarios, generando incluso situaciones de peligro al conducir. En este sentido, Venezuela se caracteriza por poseer una infraestructura vial en pésimas condiciones; actualmente se ubica en el penúltimo lugar de los países de la región que tienen déficit en materia de infraestructura vial y de transportes (BBC Mundo, 2016, como se citó en Ancco, 2018).

Análogamente, en el Perú existen grandes problemas en cuanto a la infraestructura vial, generando dificultades a los transportistas y personas que hacen uso de la misma, resaltando que las autoridades prácticamente no muestran preocupación al respecto y no impulsan proyectos con base en la articulaciones de gobiernos locales, regionales y nacionales, en beneficio de la colectividad. El Sistema Nacional de Carreteras (2023) en el Perú refiere que cerca del 17,4 % de carreteras en este país se encuentran pavimentadas, mientras que el 82,6 % restante forman parte de trochas. Por su parte, según el Foro Económico Mundial (2019), el Perú ocupa el lugar 85 de 140 economías evaluadas en términos de infraestructura de transporte, como resultado principalmente de la escasa inversión en obras de construcción, mantenimiento, conservación y expansión de las carreteras. Esta situación incide desfavorablemente en el transporte de bienes o productos, así como de personas, influyendo negativamente en las actividades económicas, incluyendo el turismo, pues generalmente las vías de acceso a los lugares o atractivos turísticos no se encuentran en las condiciones adecuadas y no reciben el mantenimiento requerido por parte de las autoridades competentes (Ancco, 2018; Crispin y Estrada, 2025).

En la mayoría de los casos, al nivel de proyectos de infraestructura en América Latina y el Caribe, los presupuestos limitados y el mal manejo de los recursos económicos repercuten en su efectividad. La gestión de la infraestructura vial constituye una especialidad de la ingeniería, que surgió en la década de 1960, para el diagnóstico, evaluación, planificación y programación, dirigidas a optimizar el uso de los recursos disponibles para

su construcción y mantenimiento, así como la seguridad vial; su objetivo principal es apoyar técnicamente la toma de decisiones en relación con las inversiones necesarias para apoyar el desarrollo de la infraestructura vial a lo largo del tiempo (Chinchay, 2023).

La gestión de infraestructura vial se sustenta en factores técnicos y económicos para la evaluación y planificación de alternativas de mantenimiento vial, considerando un análisis costo-beneficio de estas acciones, de acuerdo con indicadores del estado del pavimento. Adicionalmente, en la actualidad esta disciplina confronta el desafío de desarrollar sistemas de gestión sostenibles, trascendiendo el ámbito meramente económico, pues además se deben considerar aspectos técnicos, financieros, ambientales, sociales, políticos e institucionales; todo ello exige el desarrollo de investigaciones en función de los objetivos propuestos (SADC, 2003, como se citó en Espinoza et al., 2025).

El rezago de la vialidad en algunos países o regiones no se deriva únicamente de temas referidos a la inversión, sino de una baja capacidad del Estado, reflejada fundamentalmente en una inadecuada planificación de la obra y una deficiente capacidad organizacional entre los actores involucrados en esta materia, aunado al escaso mantenimiento y atención frente a la adversidad de las condiciones hidrometeorológicas. Al mismo tiempo, la inversión de las últimas décadas se ha destinado básicamente a la transitabilidad urbana y la culminación de proyectos previamente iniciados hace muchos años.

Otro aspecto a considerar es la inadecuada gestión vial, dado que muchas veces no existe un ente rector encargado de coordinar las políticas en materia de infraestructura, lo que dificulta los acuerdos y la unificación de criterios entre los actores, conllevando debilidades institucionales. Así mismo, Svava señala que generalmente quienes erigen políticas públicas son entes distintos a quienes la ejecutan, por lo que es necesario analizar la relación entre la política y la administración, requiriendo una capacidad interorganizacional y liderazgo político, así como la consideración del

contexto que enmarcan estas acciones, para el logro de la coordinación, control y gobernanza sobre la base de un marco legal actualizado (López-López, 2024).

1.2 El Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

El transporte por carretera es de gran importancia en la actividad económica nacional, por lo que es fundamental que la vialidad se encuentre en condiciones favorables y opere de acuerdo con parámetros de eficiencia; para ello es fundamental contar con una programación de construcción y mantenimiento, acorde con el presupuesto y las necesidades, considerando la elaboración de proyectos que especifiquen en forma detallada la construcción o rehabilitación de un tramo determinado (Arriaga et al., 1998).

En condiciones óptimas de circulación, es decir, una carretera recta y en terreno plano, bien conservada y sin baches ni problemas de tránsito, los costos de operación de transporte son mínimos, a diferencia de los casos en los que hay irregularidades o deficiencias de las superficies, pendientes, grados de curvaturas no adecuados o mucho tráfico de vehículos, que terminan afectando los costos de operación correspondientes. En efecto, una mala regularidad de la vialidad significa daños y deterioros funcionales o estructurales, que influyen en las condiciones de su estado y vida útil (Arriaga et al., 1998; Moreno, 2016).

Dada la diversidad de equipos empleados para la medición de la regularidad o rugosidad superficial de las carreteras o caminos, así como los numerosos índices y escalas para el establecimiento de los criterios de aceptación de la funcionalidad de una carretera, se aceptó la conveniencia de utilizar el Índice Internacional de Rugosidad (*International Roughness Index*, IRI en sus siglas en inglés), como estándar de medida de dicha variable, desarrollado en 1986 por el Banco Mundial. El IRI tiene sus orígenes en el programa *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP). Actualmente constituye uno de los parámetros de mayor aceptación y

utilización para efectuar la medición del deterioro de los pavimentos, el cual puede emplearse bien sea como un indicador de calidad en la recepción de carreteras nuevas así como índice de rehabilitación de las mismas, señalando de manera puntual aquellas áreas que requieren mantenimiento. De modo que el IRI es la medición de la respuesta de un vehículo en relación con las condiciones de la vialidad (Arriaga et al., 1998; Moreno, 2016).

La rugosidad o regularidad constituye uno de los parámetros de mayor importancia en la evaluación de los pavimentos. De acuerdo con NEVI-12 (2013, como se citó en Velázquez, 2024), la rugosidad se define como la desviación que presenta la superficie en relación con una superficie plana con dimensiones características en sentido longitudinal que corresponde a una longitud de onda comprendida entre 0,5 y 50 m. Los defectos de regularidad existentes en la vialidad influyen en la masa suspendida de los vehículos, por tanto afectan la comodidad de viaje de los usuarios.

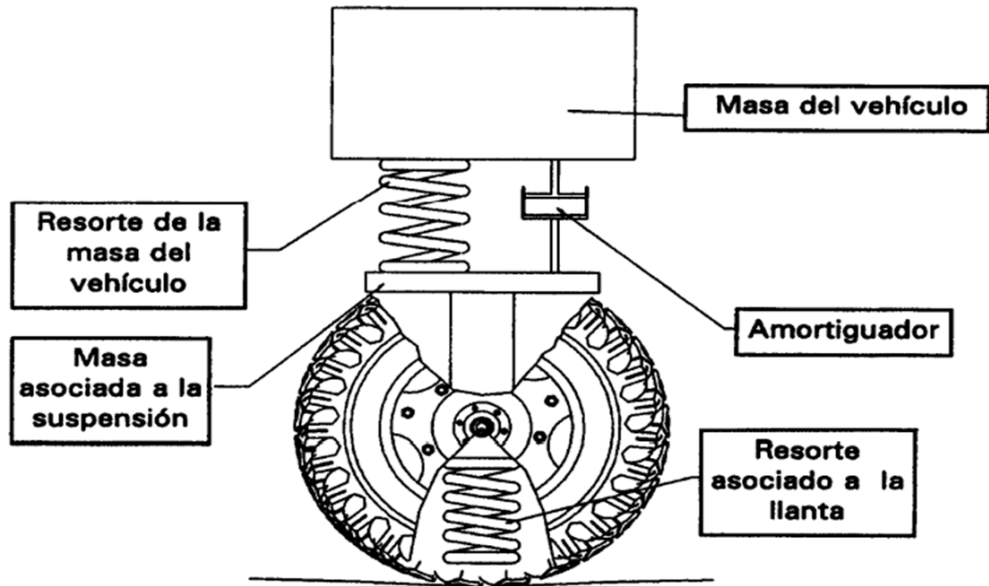
El IRI, o índice de regularidad superficial del pavimento, se define como una medida estandarizada o indicador que mide las irregularidades o rugosidad en la superficie del pavimento, las cuales afectan la calidad del rodado, la seguridad y los costos de operación de transporte y mantenimiento. El cálculo matemático del IRI se basa en un modelo matemático denominado Cuarto de Carro; se simulan los movimientos producidos entre las masas amortiguadas y no amortiguadas de dicho modelo, cuyo método es la simulación de un automóvil en movimiento, a una velocidad de 80 km/h. Los resultados de esta medida se pueden expresar en metros por kilómetros (m/Km), milímetros por metro (mm/m) o pulgada por milla (in/mi) (Arriaga et al., 1998; Saldaña et al., 2017; Velázquez, 2024).

Según Arriaga et al. (1998), el nombre del modelo de Cuarto de Carro viene dado por el hecho de que implica la cuarta parte de un vehículo. Este modelo incluye una rueda representada por un resorte vertical, la masa del eje soportada por el neumático, un resorte de suspensión, un amortiguador y la masa del vehículo soportada por la suspensión de la

rueda. Moreno (2016) sostiene que el modelo Cuarto de Carro es un modelo matemático que se define como un conjunto de masas inerciales, resorte y amortiguaciones específicas que interactúa al desplazarse por un perfil de la vía, permitiendo el cálculo del IRI (ver Figura 1).

Figura 1

Representación Gráfica del Modelo de Cuarto de Carro



Nota: Tomado de Arriaga et al. (1998).

El IRI es el valor del movimiento vertical acumulado del asiento del conductor del vehículo a lo largo de una distancia dada; a mayor irregularidad en el pavimento, los desplazamientos verticales sobre la horizontal teórica y consecuentemente el valor del IRI, serán mayores (Montoya y Goicochea, 2013, como se citó en Almeida, 2023).

El rango de la escala del IRI para un camino pavimentado es de 0 - 12 m/km (0 a 760 in/mi). Si el IRI es 0 se trata de una superficie perfectamente uniforme y si su valor es 12 refiere un camino intransitable. Para una superficie con pendiente constante sin deformaciones (plano inclinado perfecto), este índice es igual a cero, por lo que la pendiente no influye en

el valor del IRI, a diferencia de los cambios de pendiente (Arriaga et al., 1998, como se citó en Almeida, 2023).

De ahí que el IRI es un indicador de niveles de servicio que permite calificar y cuantificar el estado de la vialidad o pavimento y que normalmente se utilizan como límites admisibles hasta los cuales pueden evolucionar su condición superficial, funcional, estructural y que son propios a cada vía, estableciendo los factores técnicos dentro de un esquema general de satisfacción del usuario en términos de la comodidad, seguridad, oportunidad y economía (Huamán, 28 de enero de 2025).

Este índice permite conocer, de manera cuantitativa, la calidad asociada a una determinada carretera o camino y viene siendo empleado por las diferentes agencias viales al nivel mundial para controlar y verificar la calidad de sus carreteras. Desde una perspectiva económica, la aplicación del IRI conlleva beneficios potenciales, dado que el mejoramiento en la seguridad vial puede disminuir los costos relacionados con accidentes de tránsito, entre ellos los gastos médicos y la pérdida de productividad. Adicionalmente, una vialidad segura puede incidir positivamente en la promoción del turismo y el desarrollo local, incentivar inversiones y transporte eficiente, lo que finalmente se traduce en un impacto positivo en la economía, a mediano y largo plazo (Saldaña et al., 2017; Velázquez, 2024).

Para realizar la evaluación del IRI, se utilizan diversos equipos cuya diferenciación se basa en la manera como estos obtienen el perfil longitudinal para realizar el cálculo de este indicador. En este sentido, el Banco Mundial dividió estos equipos en cuatro categorías (Moreno, 2016; Saldaña et al., 2017):

- **Clase 1.** Perfiles de precisión, que representa el más alto grado de exactitud o mayor estándar de precisión para la medición y cálculo del IRI. Como base para el cálculo del IRI requiere que se realice una medición precisa del perfil longitudinal como una serie de puntos de

elevación cercanos y equidistantes a lo largo de la huella de circulación. En este grupo se ubican los métodos de Mira y Nivel, perfilómetro *TRRL Beam*, perfilómetros estáticos y algunos perfilómetros inerciales de alta velocidad.

- **Clase 2.** Otros métodos perfilométricos que incluyen aquellos en que el perfil longitudinal se mide como base para el cálculo del IRI, pero que no tienen la capacidad de lograr la precisión requerida para una medición clase 1. En este grupo se incluyen tanto perfilómetros estáticos como dinámicos, los cuales basan el cálculo del IRI en la medida del perfil longitudinal, pero no tienen la exactitud de aquellos exigidos para la clase 1; entre ellos se encuentran *APL Trailer* y *GMR type Inertial Profilometer*.
- **Clase 3.** En este caso, el IRI es estimado mediante ecuaciones de correlación; refieren métodos que dependen de la respuesta dinámica del sistema de medición para obtener propiedades de rugosidad comparables a la escala de IRI mediante ecuaciones de correlación. Dentro de esta categoría se encuentran equipos como *Bump Integrator*, *Mays Meter*, *Merlin* y *NAASRA Meter*.
- **Clase 4.** Calificaciones subjetivas y mediciones no calibradas, dado que se realizan con dispositivos no calibrados; estimaciones subjetivas con base en la experiencia en la calidad o confort del usuario durante el viaje o inspecciones visuales de la vialidad.

1.3.1 Equipos de Alto Rendimiento: Perfilómetros Láser

Para medir el IRI con precisión y eficiencia se utiliza una herramienta especializada conocida como perfilómetro láser, que de acuerdo con Saldaña et al. (2017), pertenece a la categoría de equipos clase 1, siendo ampliamente aceptado por las diferentes agencias viales para la realización del cálculo de este indicador internacional. En la actualidad es el equipo más reconocido y empleado al nivel mundial.

Según el CEDEX (2025), el perfilómetro láser es un equipo basado en la medida de distancias por medio de láser, para el registro de los perfiles longitudinales y transversales de las carreteras, permitiendo también el registro de datos de textura. Estas mediciones son realizadas con el vehículo circulando en la vialidad de forma integrada en el tráfico.

Moreno (2016) señala que el perfilómetro láser es un dispositivo que produce medidas continuas del perfil longitudinal a altas velocidades, a través de una referencia inercial integrada por un acelerómetro, colocado en un vehículo para la obtención del movimiento vertical, y un sensor óptico que mide el desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento o carretera. Este equipo comprende: sensor de altura, acelerómetro, sistema de medidor de distancia y un computador con su respectivo *software* para calcular el IRI.

Figura 2

Equipo Perfilómetro Láser



Nota: Tomado de Arriaga et al. (1998).

En la Figura 2 se muestra el perfilómetro correspondiente a un *Hawkeye series 1000*, clasificado como el de máxima precisión en su tipo, de acuerdo con el estándar ASTM E 950-94. Este perfilómetro láser mide el sentido de circulación en forma continua y sin interrumpir el tránsito; su operación se realiza conjuntamente con el sistema de posicionamiento kilométrico, que permite a la persona que lo está utilizando, definir los intervalos de muestreo, ubicando a su vez cualquier tipo de evento que se pueda detectar durante el proceso de medición en terreno.

Así mismo, el *Láser Crack Measurement System (LCMS)*, se clasifica dentro de los equipos de clase 1, debido a la manera en que se obtienen los datos. No obstante, por ser una nueva tecnología en la medición de las condiciones del pavimento, no es conocida por muchas agencias viales.

Figura 3

Equipo Laser Crack Measurement System



Nota: Tomado de Saldaña et al. (2017).

Este equipo realiza un escaneo en tres dimensiones a la superficie del pavimento, lo que adicionalmente permite la identificación del deterioro superficial, el ahuellamiento que se presenta en la carretera evaluada y la evaluación del IRI del pavimento. Destaca en su precisión y en la mínima interrupción de los carriles, evaluando a cualquier velocidad entre 0 y 120 km/hora (ver Figura 3) (Saldaña et al., 2027).

En países como Australia se han realizado algunas investigaciones con el propósito de comprobar la eficiencia de este equipo de clase 1, y al mismo tiempo, establecer comparaciones con respecto a otros dispositivos. Los resultados obtenidos señalan una correlación del 97 %, demostrando que al adicionar un acelerómetro al equipo LCMS se cumplen los requisitos para que este pueda ser empleado. Así mismo, en América del Sur, este equipo se ha utilizado ampliamente en Chile, con resultados satisfactorios con su uso (Saldaña et al., 2017).

Por otra parte, el perfilométrico láser RSP MK-III y/o IV (ver Figura 4) es un equipo de alta precisión (clase 1) que se utiliza para la medición del IRI y otros indicadores con la finalidad de evaluar el estado de las carreteras y pavimento en general, gracias a su tecnología. Así pues, este perfilómetro se desplaza a una velocidad constante sobre la carretera, obteniendo datos de forma continua que luego son procesados por el *software*, para obtener el IRI de acuerdo con los estándares internacionales. Entre las ventajas de este dispositivo se destaca que utiliza el método denominado Dakota del Sur, que combina datos de un acelerómetro y un sensor láser para el cálculo del IRI con precisión; posee la funcionalidad “pare y siga” para captar datos inclusive en semáforos y otras paradas; cumple con las normas ASTM E950 Clase 1, AASHTO R 57 y otras certificaciones internacionales, que permiten garantizar la confiabilidad de los datos (Prada, 21 de agosto de 2024).

Figura 4

Perfilómetro Láser RSP MK-III y/o IV



Nota: Tomado de Prada (21 de agosto de 2024).

1.3.2 Equipos de Respuesta: El Rugosímetro y otros Dispositivos de Contacto

El rugosímetro es un instrumento de medición que permite evaluar la rugosidad o regularidad de una superficie, como por ejemplo la vialidad, aportando datos con precisión en relación con las desviaciones o irregularidades microscópicas de una superficie con respecto a un plano ideal; por lo contrario el perfilómetro permite mediciones a escalas más amplias. Existen diferentes tipos de rugosímetro, entre ellos los dispositivos de contacto, que permiten obtener datos que al ser procesados conllevan la cuantificación de la rugosidad de carreteras o pavimento en general, trazando una punta mecánica que se desliza por la superficie (Cepeda, 2019; Yamazen Mexicana, 17 de abril de 2020).

En este sentido, los medidores de rugosidad de tipo respuesta (RTRRMS) se presentan como una alternativa económicamente viable, de sencilla operación y elevada eficiencia. Sin embargo, es fundamental destacar que estos sistemas no cuantifican el perfil longitudinal intrínseco de la superficie vial. En su lugar, evalúan el efecto dinámico resultante de las irregularidades del pavimento sobre un vehículo de prueba. Su principio operativo se fundamenta en un transductor que monitorea los desplazamientos verticales relativos entre el eje trasero (o el eje de un remolque) y la carrocería del vehículo. La información recopilada por el transductor es transmitida a un microprocesador que registra la condición superficial del pavimento, expresada en milímetros o pulgadas de movimiento relativo acumulado por unidad de distancia recorrida (Cepeda, 2019).

Según Reyes (2020, como se citó en Velázquez, 2024), el rugosímetro es uno de los equipos o herramientas más confiables para determinar el IRI, al igual que la aplicación Totalpave, representando una buena opción para realizar evaluaciones dentro de pavimentos, aportando datos confiables y resultados en intervalos considerables dentro de los 100 metros.

1.3.3 Métodos Manuales y de Menor Precisión (Clase III y IV)

En la medición del IRI, los métodos manuales y de menor precisión (pertenecientes a la Clase III y IV) son aquellos utilizados cuando no se requiere la exactitud de equipos más sofisticados. Dichos métodos ofrecen una medición limitada a un menor costo y se emplean ecuaciones de correlación; herramientas como la regla graduada y el nivel, u otros dispositivos más sencillos, que permiten el registro de variaciones en la altura de la superficie del pavimento. Así pues, el cálculo del IRI -para evaluar la rugosidad de la vialidad- se realiza con dispositivos no calibrados y estimaciones subjetivas basadas en la experiencia en la calidad o confort del usuario o inspecciones visuales de las vías (Saldaña et al., 2017).

Entre los dispositivos clase III, disponibles en el mercado, se puede mencionar el *Bump Integrator* (ver Figura 5); va ajustado sobre la carrocería de un vehículo con un dispositivo adherido al eje posterior y conectado mediante un cable. De este modo, las variaciones -o movimientos hacia arriba y hacia abajo- entre el eje posterior y la carrocería son cuantificadas para un intervalo de longitud, representando a las variaciones diferenciales de las masas m_1 y m_2 que forman parte de la teoría de la ecuación del Cuarto de Carro, mencionado anteriormente. Para la recopilación de los datos, el vehículo se desplaza sobre la superficie a evaluar, a una velocidad constante de 40 km/h; así pues, las irregularidades generarán movimientos perpendiculares, los cuales son interpretados y cuantificados mediante un dispositivo 45 contador, cuyo valor es recolectado para una posterior conversión a unidades de IRI (m/Km) mediante una ecuación de correlación (Limay, 2021).

Figura 5

Bump Integrator: Equipo de Clase III



Nota: Tomado de Limay (2021).

Así mismo, el *Roughometer II* se clasifica dentro de la clase III de dispositivos de medición de la rugosidad del pavimento. Este sistema integra varios componentes clave: un controlador portátil, encargado de gestionar la ejecución de las mediciones y el almacenamiento digital de los datos; un sensor de rugosidad; un odómetro rotatorio; y un módulo de interfaz que interconecta estos elementos. La disposición física del equipo en el vehículo es la siguiente: tanto el controlador como el módulo de interfaz se instalan en la cabina. Por otro lado, el sensor de rugosidad se sitúa en el eje trasero del vehículo, específicamente cerca de la rueda izquierda. Durante la operación, a medida que el vehículo se desplaza por la vía a una velocidad constante (generalmente entre 50 y 60 km/h), el sensor de rugosidad detecta las vibraciones inducidas en el eje. Estas vibraciones son un resultado directo de la calidad de la superficie de rodadura y son transmitidas al controlador mediante un proceso de codificación, procediendo a su almacenamiento para el análisis posterior (Limay, 2021).

Figura 6

Roughometer II: Equipo de Clase III



Nota: Tomado de Limay (2021).

Otro dispositivo diseñado para la medición de la rugosidad de la vialidad, perteneciente a la clase III, es el rugosímetro MERLIN (acrónimo de *Machine for Evaluating Roughness Using Low-cost INSTRUMENTATION*), con base en el principio del perfilómetro estático, con el objetivo de obtener un equipo de bajo costo y fácil manejo. También es denominado Bicicleta de Merlin (Hirpahuanca, 2016, como se citó en Limay, 2021; Moreno, 2016). Este equipo incluye: neumático de caucho, patín fijo y móvil, pivote y estabilizadores, tabla de trabajo que permite el registro de los datos de forma manual y manija (Chaluisa y Estévez, 2023).

Figura 7

Rugosímetro MERLIN



Nota: Tomado de Chaluisa y Estévez (2023).

Entre los métodos no sofisticados para la medición del IRI se puede destacar el Windshield que es un método de diagnóstico visual para la

evaluación de las condiciones del pavimento de una carretera o vía; esta evaluación se realiza desde el interior del vehículo. De este modo, los técnicos van observando el pavimento mientras conducen por la carretera a una velocidad uniforme y moderada de $25\text{km/h} \pm 10\text{km/h}$ (segmentos homogéneos) y toman nota de cualquier falla o defecto que interrumpa el rodamiento estable del pavimento, llevando un registro para la evaluación del estado del pavimento, que incluye el tipo de falla, frecuencia y gravedad (Cedillo y Pauta, 2023).

El método *Windshield* divide los deterioros del pavimento en dos tipos:

- a) *LDR (Load-Related Distress Rating)*, que refiere las fallas causadas por el tráfico, como agrietamiento en dirección a los ejes; y
- b) *NDR (Non Load-Related Distress Rating)*, que considera fallas debidas principalmente a factores climáticos, mala calidad de los materiales y construcción deficiente.

Cada categoría tiene un rango de valores que van del 0 al 100; un valor de 100 indica que el pavimento está en excelentes condiciones mientras que, en el otro extremo, un valor de 0 significa que la vía no ofrece seguridad para la circulación vehicular (Cedillo y Pauta, 2023).

1.3.4 Ventajas y Limitaciones de los Métodos Convencionales en el Contexto Peruano

A comienzos de la década de 1990, el Estado Peruano elaboró un Plan de Emergencia Vial para mejorar las deficiencias y transitabilidad de las carreteras nacionales, mediante la rehabilitación de las mismas. La utilización del IRI en el Perú fue implementada en 1992, tanto en la recepción de obras de construcción como en rehabilitación de la vialidad.

Entre 1992 y 2005, según lo reporta el IPE (2008), en el Perú se realizó una inversión de aproximadamente 718 millones de dólares en la rehabilitación

de carreteras, que pudo disminuir si se destinaba un monto de 98 millones en el mantenimiento periódico y adecuado de las vías; para definir el momento preciso de rehabilitación vial se debería contar con la medición del IRI de forma anual, pero incluso en la actualidad esta información no se encuentra actualizada (Callacondo, 2020; Ramírez, 2017).

El equipo empleado para la medición del IRI en el Perú, convencionalmente ha sido el rugosímetro MERLIN, que es un dispositivo económico pero poco eficiente. Por otra parte, existen los equipos tipo respuesta como los perfilómetros láser o el dispositivo Bum integrator, que son muy eficientes, pero económicamente costosos, y generalmente usados en carreteras de orden nacional; también su uso fue limitado debido a la falta de personal capacitado para la calibración adecuada del equipo, conllevando imprecisiones en las mediciones (Callacondo, 2020; Ramírez, 2017).

En el Perú hay muchas carreteras no pavimentadas y por ende existen condiciones de transitabilidad deficientes, que dificultan la movilización de vehículos y encarece los costos de transporte. En 2005, Provías Nacional en el Perú adquirió un perfilómetro láser (*Road Profile Surface - RSP*), marca *Dynatest*, para efectuar la medición de la rugosidad de las carreteras; por primera vez se utilizó un instrumento de medición del IRI de clase 1 en el Perú. Sin embargo, en general las diferentes autoridades viales de este país no cuentan con equipos de medición del IRI de buena precisión y alto rendimiento; comúnmente se utiliza el dispositivo MERLIN pero su rendimiento es bajo en el caso de carreteras de longitud considerable.

En la programación o planificación vial de algunas regiones del Perú, no se realiza el cálculo del IRI, debido a la carencia de un equipo adecuado; por tanto generalmente se intenta estimar este indicador mediante la percepción visual, conllevando una serie de errores, comenzando por una inadecuada planificación vial para la construcción, mantenimiento o rehabilitación de carreteras y otras vías, lo que se traduce en significativas erogaciones tanto para el sector público como el privado (Callacondo, 2020; Ramírez, 2017).

En consecuencia, deben proponerse alternativas viables que permitan confrontar de manera acertada la situación descrita, dado que el IRI constituye un parámetro de gran importancia para la toma de decisiones en el marco de la gestión de la infraestructura vial. De ahí se desprende que una programación de un plan vial apropiado, considerando la medición del IRI, se traduce en mantenimientos oportunos que contribuyen con la prolongación de la vida útil de la vialidad, sobre la base de fomentar una cultura preventiva y correctiva en la gestión vial (Callacondo, 2020).

1.4 Normativa Nacional e Internacional Aplicable

La normativa internacional en relación con el IRI se centra en la estandarización de los métodos de medición y cálculo de este indicador, lo que permite la evaluación y comparación de la calidad de rodadura del pavimento o la vialidad, de acuerdo con las normas o estándares ASTM, AASHTO y FWHHA, muy utilizadas para la medición de la regularidad o rugosidad del pavimento, junto con el modelo matemático denominado Cuarto de Carro (Callacondo, 2020).

En la norma internacional ASTM E 897-06 “*Standard Terminology Relating to Vehicle Pavement Systems*”, se define el término rugosidad o regularidad del pavimento como la desviación de una determinada superficie con respecto a una superficie plana, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo y calidad del manejo, cargas dinámicas y drenaje, el perfil transversal y longitudinal (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de Costa Rica, LANAMMEUCR, 2013).

Así mismo, las normas internacionales para la medición del IRI se basan principalmente en la especificación ASTM E950 “*Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference*”, que comprende la medición y almacenamiento de datos de perfil medidos sobre la base de una referencia inercial establecida por acelerómetros; la norma ASTM E 1170 “*Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal*

Profiles of Traveled Surfaces” que refiere el cálculo de la respuesta del vehículo a las regularidades de superficiales de la carretera; también debe considerarse la práctica recomendada AASHTO PP 37-04, que define los procedimientos para medir el perfil longitudinal del pavimento y el cálculo del IRI, sobre la base del modelo matemático denominado Cuarto de Carro (LANAMMEUCR, 2013).

Como se mencionó anteriormente, el IRI es un indicador internacional que mide y controla la serviciabilidad en una carretera u otra vía, dado que está relacionado con los costos de operación de transporte, la calidad o comodidad de los usuarios así como la seguridad de transitar por la vialidad. Sin embargo, no existe una norma -como Norma Técnica Peruana- que se utilice en la actualidad en Redes Viales departamentales.

Solo existe la Norma Técnica Peruana CE.010 que se centra en pavimentos urbanos en el Perú. Resulta necesaria una Norma Técnica Peruana para establecer requisitos de diseño, mantenimiento, rehabilitación, así como la definición de una metodología de medición de rugosidad o regularidad con el aval de las entidades y autoridades competentes. Actualmente, existen parámetros de IRI en la recepción de obras y se establece márgenes de valores de IRI en la mayoría de contratos de las concesiones viales. Además, se utiliza la norma internacional ASTM E950 para la utilización de equipos de clase 1, que se viene utilizando en el Perú en forma continua. (Montoya, 2013, como se citó en Ramírez, 2017).

No obstante, el marco legal vigente en materia de infraestructura vial en el Perú, comprende (Gobierno del Perú, 9 de agosto de 2023; Callacondo, 2020):

- **Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial**, aprobado mediante D.S. N° 034-2008-MTC; establece los lineamientos para la gestión de la infraestructura vial del sistema nacional de carreteras del Perú, incluyendo la planificación, ejecución, mantenimiento y operación de las vías de comunicación.

- **Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos;** constituye una guía en la ingeniería vial del Perú, siendo aprobado por Resolución Directoral N° 10-2014-MTC/14, el cual define el estudio y diseño de pavimentos, entre otros aspectos.
- **Manual de Mantenimiento de Carreteras o Conservación Vial del Ministerio de Transporte y Comunicaciones en el Perú (MTC) (2016),** aprobado mediante Resolución Directoral N° 08-2014-MTC14; define la gestión de conservación vial, como el conjunto de actividades integradas (políticas, planificación, organización, financiamiento, ejecución, control y operación), dirigidas a lograr una conservación vial que asegure la economía, fluidez, seguridad y comodidad de los transportistas y demás usuarios viales.
- **Reglamento de Jerarquización Vial,** que es un anexo del Decreto Supremo N° 015-2024-MTC; establece criterios para la declaración de áreas o vías de acceso restringido, considerando factores como la congestión, la contaminación y la seguridad.
- **Norma Técnica Peruana CE.010;** establece los requisitos mínimos para el diseño, construcción, rehabilitación, mantenimiento, rotura y reposición de pavimentos urbanos, con el propósito de asegurar su durabilidad y el uso racional de los recursos económicos.

Tabla 1
Evaluación y Valoración del IRI, según Tipo de Vía

Estado	Rugosidad	
	Vías Pavimentadas	Vías No Pavimentadas
Bueno	$0 < \text{IRI} \leq 2.8$	$\text{IRI} \leq 6$
Regular	$2.8 < \text{IRI} \leq 4.0$	$6 < \text{IRI} \leq 8$
Malo	$4 < \text{IRI} \leq 5.0$	$10 \leq \text{IRI}$
Muy malo	$5 < \text{IRI}$	$9 < \text{IRI} \leq 10$

Nota: NTP CE.010 y MTC, como se citó en Limay (2021).

De acuerdo con la Norma Técnica Peruana CE.010 y el MTC, los parámetros que se utilizan para la clasificación de un pavimento, según su rugosidad IRI, son los mostrados en la Tabla 1.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL IRI MEDIANTE TELÉFONOS INTELIGENTES

2.1. El Teléfono Inteligente como Sensor de Datos Viales

Según Zeballos y Vizcaya (2021), en 2001 el *Transportation Research Board* (TRB), ubicado en Washington, EE.UU., monitoreó un proyecto en el que las velocidades de los camiones eran reducidas debido a las condiciones deficientes de la vialidad; conllevando la medición de las vibraciones del vehículo para evaluar el estado de la carretera. Conjuntamente con el *Royal Institute of Technology* se fabricó el primer piloto en el año 2002; en ese año no existían todavía los teléfonos inteligentes, por tanto, se utilizó una PC con sistema operativo Windows integrado a un vehículo, un acelerómetro externo colocado en el eje trasero de este, un GPS y un amplificador de señal. Así mismo, se empleó un *software* para el análisis de las señales.

La aplicación para teléfonos inteligentes o *Smartphones* denominada *Roadroid* comenzó a desarrollarse en el año 2010, con la finalidad de utilizar las herramientas preinstaladas en los dispositivos móviles para la medición de la rugosidad de la vialidad con precisión; este método es muy sencillo para su puesta en práctica; incluía acelerómetro, procesador de datos, memoria y datos

móviles (Zeballos y Vizcaya, 2021). Esta aplicación permite medir la rugosidad o regularidad del pavimento tomando como datos las vibraciones medidas por los acelerómetros con los que cuentan los teléfonos inteligentes, transformándolas en unidades IRI mediante ecuaciones de correlación lineal, para un estimado, o el modelo de Cuarto de Carro, para el caso de datos más precisos; además es de fácil transporte y su implementación es de bajo costo. El IRI así estimado se considera un indicador de precisión clase 3, de acuerdo con la clasificación del Banco Mundial, por cuanto usa una ecuación lineal para la aproximación de los resultados, mientras que el IRI calculado puede considerarse un método correspondiente a la clase 2, con mayor precisión (Sayers, 1986, como se citó en Almenara, 2015).

Así mismo, *Roadroid* utiliza el GPS y los datos móviles del celular para transferir la información del estado de la vía en función de la gestión de la infraestructura vial. Esta aplicación analiza el camino 100 veces por segundo (en 90 km/h una señal cada 25 cm); toda vez obtenidos los datos, se calcula el IRI y guarda la condición de la carretera con sus respectivas coordenadas GPS; estos datos se almacenan en el teléfono y luego se transfieren a la nube. Con los datos obtenidos y a través de un sitio *web* (*Google Maps*) se puede visualizar el recorrido analizado y el estado de la vialidad mediante los siguientes colores: verde para una condición óptima; amarillo para satisfactorio; rojo para insatisfactorio y negro para un camino en pésimas condiciones (Zeballos y Vizcaya, 2021).

Según Du et al. (2020); Souza et al. (2018) y Zhao et al. (2019), como se citaron en Flores (2022), existen equipos muy sofisticados para la medición de la rugosidad de una calle, avenida o carretera, siendo sus resultados óptimos pero a un costo alto. Frente a este escenario, con el advenimiento de la tecnología de los teléfonos inteligentes o *Smartphones*, se utilizan diversas aplicaciones desarrolladas para el cálculo del IRI a un costo menor, en relación con los métodos tradicionales.

Actualmente los teléfonos celulares inteligentes permiten una gama amplia de sensores integrados a estos dispositivos -entre ellos el GPS para la geolocalización, acelerómetro, barómetro, giroscopio, magnetómetro y sensores de humedad- que facilitan la recolección de datos durante el trabajo de campo en

los procesos de gestión de la infraestructura vial, que incluyen la evaluación de las condiciones del pavimento, con una alta precisión (Suárez, 2023).

De esta manera, se utilizan sensores como el GPS y el acelerómetro, instalados directamente en vehículos para obtener y procesar datos sobre la rugosidad y el tránsito de la vialidad y se referencian también métodos que emplean la tecnología de sensores en dispositivos Smartphones, que representan un menor costo, permitiendo la detección de las condiciones de las carreteras y el pavimento en general, teniendo como objetivos fundamentales garantizar la seguridad de los usuarios y minimizar los daños a vehículos y transporte de carga, ocasionados por la vialidad en mal estado, debido a las malas condiciones climáticas, las anomalías en la construcción de las carreteras y la falta de mantenimiento, que pueden afectar negativamente la calidad de las vías, la seguridad y el *confort* de los usuarios (Suárez, 2023).

En efecto, es necesario implementar mecanismos con base en tecnología con dispositivos móviles o inteligentes para detectar el estado en el que se encuentran las carreteras y vialidad en general. Los métodos basados en teléfonos celulares inteligentes eliminan la implementación de sensores especiales en los vehículos, lo que se traduce en menores costos; estos métodos más modernos permiten monitorear y detectar las condiciones de las carreteras y el tráfico, baches, parches, grietas, frenadas, golpes y utilización de bocina mediante sensores de *Smartphone* (Suárez, 2023).

Considerando el IRI, desde mediados de la década de 1980, se han realizado diversos estudios para evaluar el estado del pavimento con diferentes tipos de medición, tales como perfiles de medición, métodos polimétricos, estimaciones de correlación de ecuaciones y clasificaciones subjetivas y medidas no calibradas. No obstante, las muestras de datos desde los dispositivos celulares inteligentes se pueden utilizar como complemento a los diferentes métodos previamente establecidos, que están evolucionando con la incorporación del uso de los *Smartphones*. En sus inicios, la recopilación de datos de rugosidad era muy lenta; en

la actualidad con el uso de los teléfonos inteligentes se pueden realizar mediciones y monitorear los datos diariamente, sin importar la época del año en que se tomen las muestras (Suárez, 2023).

Sin embargo, pese a estos avances surgieron nuevos desafíos relacionados con la medición del IRI y cómo utilizar las vibraciones del vehículo, definir las frecuencias de muestreo, conocer la sensibilidad del acelerómetro del móvil, diferenciar cada tipo de vehículo para la obtención de datos. La aplicación *Roadroid* se desarrolló para celulares con sistema operativo Android, dada la relación precio-rendimiento con respecto a otros sistemas (Ramírez, 2017).

2.2 Procesamiento de Datos del Acelerómetro para la Estimación del IRI

Según Suárez (2023), la integración de sensores como el acelerómetro y el GPS al *Smartphone* o teléfono inteligente facilita en buena medida la recolección de datos, pues previamente las muestras se realizaban colocando un sensor acelerómetro de alta resolución en el eje trasero de un vehículo de tracción delantera y este iba conectado desde el exterior a un computador portátil con sistema *Windows* dentro del vehículo. Este sistema innovador, en su momento, propició que la Administradora Nacional de Carreteras de Suecia apoyara la investigación y desarrollo del mismo incorporando el GPS y GSM, así como una placa especial A/D (analógica/digital) conectada al acelerómetro. Posteriormente se incorporó la utilización de teléfonos inteligentes para este tipo de proyectos, por lo que todos esos sensores están incorporados al *Smartphone*. No obstante, han surgido algunas interrogantes que deben ir solucionándose; por ejemplo los diversos modelos de vehículos generan diferentes señales que afectan la muestra; distintos modelos de teléfonos inteligentes implican diferentes valores de medición que se deben a la calibración y sensibilidad del sensor acelerómetro. Pese a estas limitaciones, se evidencian más ventajas para la medición del IRI con el uso de teléfonos inteligentes, como el registro y envío de datos, los cuales se pueden recopilar y enviar en línea o también se pueden obtener fuera de

la línea para su procesamiento, cuando se tenga acceso al servicio de red. Así mismo, es posible desarrollar una correlación entre los datos propios de los algoritmos de datos que identifican las condiciones o el estado de las carreteras y el IRI para obtener un valor más cercano a la realidad y con el uso de los teléfonos inteligentes se ha facilitado la recolección y procesamiento de datos.

Souza (2018, como se citó en Flores, 2022) desarrolló el estudio *Asphalt Pavement Classification Using Smartphone Accelerometer and Complexity Invariant Distance*, que presenta una aplicación de flujo de datos real relacionada con la evaluación de pavimentos asfálticos con base en datos de aceleración obtenidos mediante el sensor acelerómetro integrado en los teléfonos celulares inteligentes. La calidad del pavimento incide significativamente en el precio final de los bienes y servicios, la seguridad de los conductores y demás usuarios, así como la comodidad de los mismos. En consecuencia, es importante el uso de estas herramientas, que permiten el monitoreo permanente de las condiciones de las carreteras y pavimentos en general, por parte de las entidades correspondientes para realizar intervenciones más precisas en la planificación del mantenimiento de la vialidad a un menor costo.

2.3 Planificación y Ejecución de Campañas de Medición

Las instituciones encargadas de la gestión de la infraestructura vial deben integrar y articular los avances que vienen desarrollando los gobiernos locales y regionales, tomando en cuenta la planificación estratégica basada en el diagnóstico oportuno de las condiciones de la vialidad, así como la ejecución de campañas de medición, que permitan la obtención y procesamiento de datos confiables -con nuevas tecnologías que incorporan también el uso de teléfonos inteligentes- al mínimo costo, considerando la imagen objetivo deseable y viable de las carreteras y otras vías de comunicación, así como las estrategias y políticas para alcanzar las metas y objetivos propuestos (Ancoco, 2018).

Así mismo, los planes de vialidad deben estar orientados a garantizar la administración eficaz y eficiente de los recursos económicos, financieros, humanos y tecnológicos destinados a la construcción de vialidad y su mantenimiento, hacia la integración territorial en función del desarrollo sostenible, procurando además la transitabilidad en forma segura y cómoda, teniendo siempre presente que la infraestructura vial es el soporte fundamental de los sectores productivos y que debe incrementarse la inversión en pro de su construcción, mantenimiento y conservación. De modo que la gestión en infraestructura vial implica procesos sistemáticos de planificación, programación, ejecución de campañas de medición del IRI y otros indicadores, mantenimiento y rehabilitación de la vialidad, sin dejar de lado la construcción de carreteras y otras vías. La planificación pertinente de la gestión de infraestructura vial implica obtener información precisa que se pueda compartir al nivel interno y externo de una institución, con el propósito de lograr beneficios económicos y financieros (Ancco, 2018).

En el Perú, de acuerdo con el MTC (2006, como se citó en Ancco, 2018), la gestión de infraestructura vial comprende una serie de procesos orientados hacia una mayor eficiencia en esta materia, estableciendo procedimientos fundamentales para la planificación de la inversión en carreteras, infraestructura de seguridad vial y emergencias viales, puentes, entre otros; controlar el avance en la ejecución y, en función de los resultados obtenidos, realizar una evaluación en términos de las metas y objetivos propuestos, para reformular la planificación en caso de ser necesario.

En el marco de la gestión de infraestructura vial, es importante la planificación y ejecución de campañas de medición del IRI, entre otros procesos, que permiten identificar las condiciones en las que se encuentra el pavimento para proceder con su rehabilitación o mantenimiento. En este sentido, se requiere definir el área objeto de medición, es decir determinar la zona que se va a evaluar; definir los métodos de medición del IRI para registrar los perfiles longitudinales del pavimento, evaluando tanto sus ventajas como desventajas; considerar las medidas de seguridad

para la protección del personal y de los equipos a utilizar; obtener y procesar los datos para su posterior análisis sobre la base del IRI y otros indicadores conducentes a la evaluación de la calidad del pavimento y planificar estrategias de gestión del mantenimiento vial necesario.

2.4 Casos de Estudio y Validación en el Perú

Forslof & Jones (2015, como se citó en Saltos, 2023), explican que la aplicación *Roadroid* -para *Smartphones Android*- permite el monitoreo de las condiciones de las vías de comunicación y un mapa web para mostrar los resultados. Esta aplicación utiliza sensores incorporados del teléfono, cámara y GPS; el análisis de la aplicación aporta 100 señales por segundo (100 Hz) para la medición de la calidad de las carreteras, considerando cuatro niveles:

- a) verde para la “buena”;
- b) amarillo para “satisfactorio”;
- c) rojo para “insatisfactorio” y
- d) negro para vialidad “mala”.

Una vez iniciada la sesión en la página principal de la aplicación *Roadroid*, los usuarios pueden profundizar en los datos y monitor, plan o seguimiento de mantenimiento de carreteras. De este modo, *Roadroid* proporciona una visión del panorama actualizado de la calidad de las carreteras y otros pavimentos. Mediante la generación de mediciones precisas de una gran cantidad de datos, el sistema *Roadroid* proporciona estadísticas confiables de campo de una manera inigualable con respecto a otros métodos. *Roadroid* constituye una herramienta valiosa tanto para países desarrollados como para países no desarrollados, contribuyendo con la solución y seguimiento de los problemas de rehabilitación o mantenimiento de carreteras (Saltos, 2023).

Por su parte, la tesis de Reyes (2020, como se citó en Saltos, 2023) intitulada *Determinación del Índice de Rugosidad Internacional en la Av. La Prensa, Usando Aparatos Inteligentes y el Rugosímetro de Merlin* planteó como objetivo principal determinar la rugosidad superficial del pavimento de la av. La Prensa, ubicada en el cantón Jipijapa, Ecuador, utilizando teléfonos inteligentes y el rugosímetro de Merlin, concluyendo que las mediciones del IRI varían desde los 2 m/km con una serviciabilidad presente de 3,31 clasificando la vialidad con una transitabilidad buena, con base en resultados de alta confiabilidad.

Dong et al. (2021, como se citaron en Flores, 2022) realizaron una investigación intitulada *Smartphone Sensing of Road Surface Condition and Defect Detection*, sobre la base de una serie de experimentos de campo que permitió la recopilación de más de 36.000 puntos de datos de vibración vertical y GPS, utilizando un teléfono celular inteligente que fue instalado en un vehículo en movimiento. Estos datos fueron procesados y analizados para la detección de defectos en la superficie de la vialidad; mediante esta nueva tecnología es posible el monitoreo del estado de la superficie de la carretera en tiempo cuasi real, con el propósito de mejorar la eficiencia y seguridad del transporte, disminuyendo además los costos de inspección.

Así mismo, Zhao et al., (2017, como se citaron en Flores, 2022) en el estudio intitulado *IRI Estimation by the Frequency Domain Analysis of Vehicle Dynamic Responses*, arribaron a la conclusión que el Sistema de Monitoreo Inteligente de Respuesta Dinámica (iDRIMS), utilizando teléfonos inteligentes para la estimación del IRI a partir de la respuesta dinámica de los vehículos, ha mejorado tanto en términos de precisión como de robustez.

Análogamente, en el Perú, la medición de la rugosidad de carreteras y pavimentos en general, utilizando *Smartphones* o teléfonos inteligentes con la aplicación *Roadroid* ha sido una opción viable, en términos de costos y facilidad de implementación, para el cálculo del IRI, conectando el dispositivo móvil al interior de un vehículo para el registro de datos de

perfil longitudinal, que luego son procesados para la obtención del valor de este indicador internacional. Esta metodología ha demostrado ser una alternativa prometedora a los métodos tradicionales, especialmente en términos de costo y facilidad de implementación (Flores, 2022).

De acuerdo con Ramírez (2017, como se citó en Zeballos y Vizcaya, 2021), la tesis de grado intitulada *Cálculo del IRI Mediante Acelerómetro de Smartphone en el tramo Huarney – Casma de la Carretera Panamericana Norte*, se centró en la comparación de los resultados del IRI utilizando un perfilómetro láser (clase 1) y el *software* o aplicación *Roadroid*, realizando un análisis comparativo entre ambos equipos de medición, con el propósito de evaluar la eficiencia de la aplicación para teléfono celular inteligente. El sector seleccionado para el desarrollo de esta investigación fue el tramo de la carretera de Huarney – Casma en el Perú; es una autopista que presenta dos carriles para cada dirección, sur a norte y viceversa. Los resultados obtenidos con el software fueron de 1,2 m/km y 1,3 m/km en cada calzada de la vía y con el perfilómetro láser se obtuvo 1,11 m/km y 1,16 m/km, respectivamente. También, se verificó que al trasladarse en el vehículo para la obtención de datos, en el rango de velocidad de 75 a 90 km/h, los valores del IRI estimado e IRI calculado se correlacionan.

Según Lloclla y Sánchez (2019, como se citó en Zeballos y Vizcaya, 2021), en la tesis de grado intitulada *Análisis Comparativo del Índice de Rugosidad Internacional del Pavimento de la Av. La Cultura de la Ciudad del Cusco Mediante el Aplicativo para Smartphone ROADROID, Rugosímetro Electrónico Bump Integrator B1-100A y Rugosímetro de MERLIN*. Así pues, se pudo comparar los resultados, tanto para el carril de subida como el de bajada, luego se realizó el procesamiento y análisis de datos. Se determinó que el carril de bajada tiene los IRI medidos de 7,31 m/km; 6,75 m/km y 6,79 m/km mediante el rugosímetro de *Merlin*, rugosímetro electrónico *Bump Integrator* y *Roadroid*, sucesivamente con un promedio de 6,95 m/km; en el carril de subida los datos fueron de 3,88 m/km; 3,98 m/km y 3,04 m/km, con un IRI promedio de 3,63 m/km, lo que indica que el carril de bajada se encuentra más deteriorado con respecto al carril de subida

y en ambas vías los valores del IRI se encuentran fuera de los límites establecidos dentro de la norma NTP CE 0.10 de pavimentos urbanos, cuyo valor máximo permitido para el de IRI es de 2,5m/km para pavimentos flexibles. Además, se determinó que la variación para los resultados del IRI mediante la aplicación para *Smartphone Roadroid*, rugosímetro de Merlin y rugosímetro electrónico *Bump Integrator B1-100A*, en los carriles analizados de la avenida La Cultura, en la ciudad del Cusco en Perú, tienen un promedio de porcentaje de variación de 18,92 %.

Finalmente, se puede destacar la investigación realizada por Zeballos y Vizcaya (2021), cuyo objetivo general fue determinar la rugosidad del pavimento flexible mediante la aplicación Roadroid para teléfonos inteligentes y el rugosímetro de *Merlin* en la carretera TA-615, tramo Puente El Peligro–Emp. PE-40, Tacna, Perú – 2020. Los resultados determinaron una rugosidad en el carril derecho -mediante el cálculo del IRI- igual a 3,63 m/km y en el carril izquierdo fue igual a 3,41 m/km; el IRI ponderado es igual a 3,52 m/km, lo que se traduce en un estado regular de pavimento en toda la carretera TA-615. Para el análisis con la aplicación *Roadroid*, se utilizaron *Smartphones* de gama alta, específicamente *Samsung Galaxy S7*, obteniendo resultados del eIRI en el carril derecho igual a 3,73 m/km, mientras que para el carril izquierdo fue igual a 3,44 m/km. Para efectos de comparación, se puede destacar que con el método tradicional se obtuvo un valor de eIRI promedio igual a 3,59 m/km., por lo que se deduce que la aplicación utilizada permite obtener resultados análogos al del rugosímetro de *Merlin*.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DEL IRI PARA LA MEJORA DEL TRANSPORTE REGULAR DE PERSONAS EN EL PERÚ

3.1 Diagnóstico de la Influencia de la Rugosidad en el Sistema de Transporte

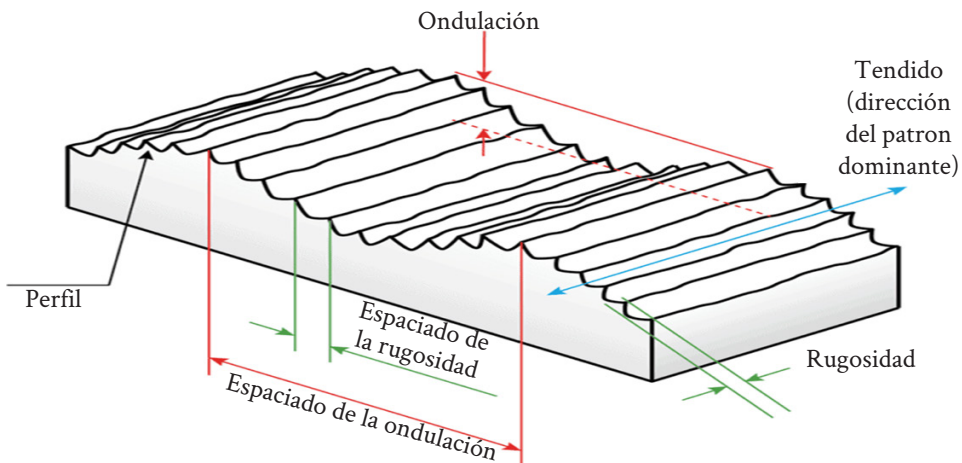
El IRI, como se mencionó anteriormente, se establece como un parámetro métrico fundamental para la cuantificación longitudinal de la irregularidad superficial en infraestructuras viales, el cual evalúa la interacción dinámica entre el perfil del pavimento y la respuesta vibratoria de un vehículo de pasajeros estándar, reflejando directamente la calidad de la rodadura. Por tal razón, el IRI es una herramienta esencial en el diagnóstico y caracterización objetiva de las condiciones operacionales de la vía, permitiendo una evaluación precisa de la confortabilidad y seguridad vehicular derivadas de las anomalías presentes en la superficie de rodamiento (Cepeda, 2019).

Por su parte, la norma ASTM E867-06 (2012, como se citó en Homero, 2021), define que el IRI diagnostica la desviación topográfica de una superficie respecto a un plano idealizado. Desde la perspectiva de la ingeniería

vial, esta característica métrica posee una influencia determinante en la interacción vehículo-pavimento, ya que específicamente, incide de manera crítica en la dinámica vehicular, la calidad de la conducción, la magnitud de las cargas dinámicas transmitidas al vehículo y la eficiencia del drenaje superficial. Parámetros como el perfil longitudinal y el perfil transversal son elementos clave en la cuantificación, caracterización y diagnóstico de esta propiedad inherente a la infraestructura vial (Ver Figura 8).

Figura 8

Textura de la Superficie vs. Rugosidad de la Superficie



Nota: Adaptado de Pradena (2006) y Homero (2021).

La regularidad superficial de la infraestructura vial es un componente de relevancia en la eficiencia operativa y la sostenibilidad de los sistemas de transporte. Diversos estudios han profundizado en el diagnóstico y la influencia de esta característica sobre el desempeño del sistema de transporte, revelando aspectos cruciales, tales como:

- a) En el ámbito del transporte terrestre, la rugosidad del pavimento incrementa la resistencia a la rodadura de los vehículos. Este fenómeno se atribuye a la deformación cíclica de los neumáticos generada por las

irregularidades del pavimento, lo que conduce a la disipación de energía en forma de calor y vibraciones. Teóricamente, este comportamiento se explica mediante los principios de la mecánica de contacto y la viscoelasticidad de los materiales, ya que un incremento en la resistencia a la rodadura conlleva un mayor consumo de combustible y, por ende, un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, impactando negativamente la sostenibilidad ambiental del sistema de transporte (Homero, 2021).

- b) La estabilidad de los vehículos de transporte público es significativamente comprometida por la rugosidad del pavimento, especialmente en relación con la tendencia al vuelco. La transferencia de carga entre las ruedas de un mismo eje, un indicador clave de la estabilidad lateral, se ve notablemente afectada, ya que se ha observado que transitar de pavimentos regulares a superficies rugosas puede provocar un incremento del 80 % al 120 % en los coeficientes de transferencia de carga. Este impacto es comparable al efecto de un aumento de la velocidad de 70 km/h a 120 km/h en vehículos de transporte público (Secretaría de Comunicaciones y Transporte y el Instituto Mexicano de Transporte, 2000).
- c) La estabilidad direccional de los vehículos de transporte público al verse comprometida por las irregularidades del pavimento, llega a provocar otro problema importante como la inducción a periodos transitorios de inestabilidad direccional, susceptibles de desencadenar fenómenos como el plegamiento debido a la introducción de perturbaciones adicionales (Secretaría de Comunicaciones y Transporte y el Instituto Mexicano de Transporte, 2000).
- d) La rigurosidad superficial del pavimento se identifica como una fuente primordial de ruido de tráfico, constituyendo una de las externalidades negativas más reconocidas en el sector del transporte. Por consiguiente, este factor debe considerarse fundamental en la fase de diseño y construcción de infraestructuras viales (Cepeda, 2019).

- e) En cuanto a las deformaciones dinámicas en el transporte público, estas no refieren alteraciones físicas de los vehículos, sino desafíos y dinámicas adaptativas que enfrenta el sector, especialmente en entornos urbanos y globales, las cuales se exacerban por la rugosidad del pavimento, lo que repercute directamente en la serviciabilidad de la vía, entendida como la condición óptima que posee un pavimento para cumplir con las exigencias del tipo de tránsito al que está destinado (Homero, 2021). Una rugosidad excesiva no solo incide en la comodidad del viaje y la seguridad vial al generar vibraciones que disminuyen el *confort* del usuario, sino que también puede acelerar la fatiga en los conductores y el desgaste prematuro de los componentes del vehículo.
- f) La rugosidad superficial del pavimento incide directamente en la seguridad vial, la eficiencia operativa y la durabilidad de la infraestructura. Una textura inadecuada, ya sea por exceso de lisura o deficiencia de macrotextura, compromete la adherencia neumático-pavimento, especialmente bajo lluvia o nieve, incrementando el riesgo de *aquaplaning* y reduciendo la capacidad de frenado. Esto se fundamenta en principios de la tribología, disciplina que analiza la fricción, el desgaste y la lubricación de las superficies en interacción (Pradena, 2006).
- g) En los sistemas de transporte de fluidos, como oleoductos o gasoductos, la rugosidad interna de la tubería genera un incremento sustancial en las pérdidas por fricción del fluido en movimiento. La mecánica de fluidos establece, a través de ecuaciones fundamentales como las de *Darcy-Weisbach* y *Colebrook-White*, establece una correlación directa entre la rugosidad equivalente de la tubería y el factor de fricción. Este último, a su vez, determina la caída de presión a lo largo del conducto, resultando un aumento en las pérdidas por fricción que demanda una mayor energía de bombeo o compresión, lo que se traduce en un incremento de los costos operativos y una mayor huella energética del sistema (White, 2016).

- h) Finalmente, la rugosidad es crucial para la vida útil de la infraestructura. Variaciones topográficas pueden concentrar tensiones, acelerar fatiga y erosión, y favorecer la acumulación de detritos, conllevando un deterioro prematuro, que exige mantenimiento más frecuente y costoso, impactando negativamente la inversión y la disponibilidad del servicio de transporte fluido (Homero, 2021).

3.2 Integración de Datos de IRI en los Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS)

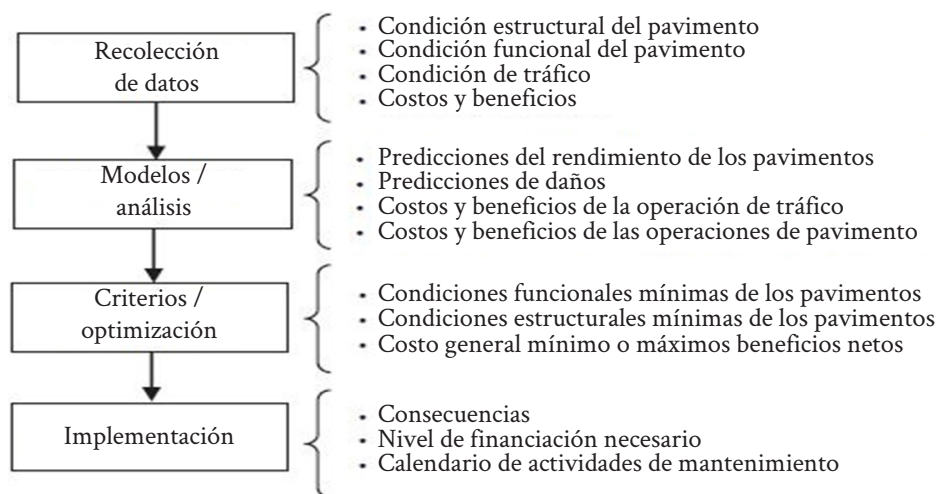
El término Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS, por sus siglas en inglés) evolucionó desde una referencia general a las actividades de construcción y mantenimiento de pavimentos hasta una definición más específica y técnica. En este contexto, la *Organization of Economic and Cooperative Development* (OCDE) lo conceptualizó como un proceso sistemático, centrado en la coordinación y el control de las actividades de mantenimiento y optimización del uso de los recursos, proporcionando las herramientas analíticas, tanto económicas como de ingeniería necesarias para tomar decisiones costo-efectivas en relación con las estrategias de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción de pavimentos (Porras, 2014).

El proceso de gestión de pavimentos se estructura en cuatro etapas principales: adquisición de datos, modelado y análisis, establecimiento de criterios y optimización, e implementación. Dentro de este ciclo, la recolección de datos constituye una etapa de relevancia, ya que su objetivo es documentar de forma precisa y objetiva el estado actual de la infraestructura vial. La información recopilada (data) a lo largo del tiempo permite el desarrollo de modelos predictivos que simulan el comportamiento futuro del pavimento. Tradicionalmente, la recolección de datos se basaba en inspecciones visuales manuales, realizadas por equipos de ingenieros que evaluaban el deterioro *in situ*. Sin embargo, el avance tecnológico ha transformado este método (Porras, 2014).

La integración de datos del IRI en los PMS constituye un avance significativo en la optimización de la toma de decisiones y la asignación de recursos para el mantenimiento de infraestructuras viales. El IRI, como medida objetiva y reproducible de la rugosidad longitudinal de una superficie de pavimento, se ha establecido como un parámetro clave para evaluar la calidad del rodaje y, por ende, el *comfort* del usuario, permitiendo a los gestores de carreteras pasar de un enfoque reactivo, basado en quejas o fallas visuales, a uno proactivo y predictivo, sustentado en datos cuantitativos y en el estado real del pavimento (Porrás, 2014; Cepeda, 2019) (ver Figura 9).

Figura 9

Etapas de un Sistema de Gestión de Pavimentos (PMS)



Nota: Tomado de Porrás (2024).

De acuerdo con el estudio de Lavaud (2011, como se citó en Porrás, 2014), la integración del IRI en los PMS ha contribuido a mejorar los procesos de construcción de pavimentos, dado que ha optimizado la calidad y el rendimiento de las vías, debido a que:

- a) La rugosidad inicial del pavimento, medida a través del IRI, influye en la vida útil de la infraestructura vial, ya que llega a producir una reducción

del 50 % en el IRI inicial, extendiendo la durabilidad del pavimento hasta en un 27 %.

- b) Un IRI inicial bajo, alrededor de 1,2 m/km, se traduce en una disminución significativa de los costos asociados al mantenimiento vial.
- c) Desde la perspectiva del usuario, la percepción de *confort* se correlaciona directamente con las vibraciones que experimentan los conductores y pasajeros, lo que está intrínsecamente ligado a la regularidad superficial del pavimento.
- d) La rugosidad de los pavimentos, cuantificada a través del IRI, impacta variables relacionadas con el tránsito y el medio ambiente. Por un lado, la irregularidad o rugosidad de la superficie de rodamiento contribuye a un incremento en los niveles de ruido, tanto en el interior como en el exterior de los vehículos; por otro lado un aumento en el IRI de 1,56 m/km a un rango de 1,61 a 3,20 m/km se correlaciona con un incremento de 1,6 veces en la probabilidad de accidentes de tránsito. Se cuenta que por cada unidad de IRI adicional, la resistencia a la rodadura del pavimento se eleva en un rango que va del 3 % al 6 %; y además un incremento de una unidad en el IRI resulta en un aumento del consumo de combustible que oscila entre el 0,6 % y el 2,5 % (Lavaud, 2011, como se citó en Porras, 2014).

Porras (2014); Cepeda (2019) y Homero (2021), refieren que la principal contribución de esta integración radica en la capacidad de los PMS para modelar la tasa de deterioro de la red vial con mayor precisión, ya que al correlacionar los valores de IRI con otros parámetros de desempeño del pavimento, como el agrietamiento, el ahuellamiento y la capacidad estructural (medida, por ejemplo, mediante la deflexión), las notaciones de los PMS pueden predecir con mayor certeza el momento óptimo para la intervención, traducándose en una planificación más eficiente de las estrategias de mantenimiento y rehabilitación. La modelización de

la progresión del IRI a lo largo del tiempo, bajo diferentes condiciones de tráfico y ambientales, es esencial para la elaboración de planes de mantenimiento a largo plazo, asegurando la sostenibilidad de la red vial.

Así mismo, la integración de datos de IRI respalda la aplicación de modelos de deterioro empírico-mecanísticos, los cuales combinan la experiencia de campo con la teoría de la mecánica de materiales y utilizan el IRI como una variable de entrada y de salida crucial, ya que permite simular el comportamiento del pavimento bajo diferentes escenarios de carga y clima, ayudando a los ingenieros a entender las causas fundamentales del deterioro y a diseñar soluciones más duraderas (Badilla, 2009; Porras, 2014).

La uniformidad y estandarización del IRI como métrica global (conforme a la norma ASTM E1926-08) facilitan la comparación del desempeño de las redes viales a nivel internacional, promoviendo la transferencia de conocimiento y las mejores prácticas en la gestión de pavimentos. La integración del IRI en los PMS no solo optimiza la gestión de activos viales, sino que también eleva la disciplina de la ingeniería de pavimentos a un nivel más cuantitativo, predictivo y científicamente riguroso (Badilla, 2009; Porras, 2014).

3.3 Metodología de Priorización para el Mantenimiento y Rehabilitación Vial

La funcionalidad y servicialidad óptima de la infraestructura vial es un factor importante para el desarrollo y el crecimiento económico de una región. Sin embargo, la gestión global de estas redes se enfrenta al desafío constante de mantener en condiciones óptimas una infraestructura sometida a un uso continuo y a un deterioro progresivo (Silva-Balaguera et al., 2018). Para abordar esta problemática, se han desarrollado las metodologías de priorización para el mantenimiento y rehabilitación vial.

Según Huallpa-Martínez (2015), estas metodologías consisten en un conjunto de procedimientos y modelos matemáticos diseñados para evaluar, clasificar y jerarquizar los tramos de una red vial, donde la priorización se basa en el análisis de su estado actual, importancia estratégica y criterios económicos para llevar a cabo su mantenimiento y rehabilitación. El objetivo principal es optimizar la asignación de recursos limitados, dirigiéndolos de manera eficiente hacia las intervenciones que generen el mayor beneficio, el cual se mide en términos de seguridad, funcionalidad y extensión de la vida útil de la vía.

Vitillo (2013, como se citó en Silva-Balaguera et al., 2018) señala que las metodologías de priorización de mantenimiento y rehabilitación son herramientas estratégicas para mejorar la toma de decisiones en la gestión de pavimentos, con la finalidad de mantener una condición servicial durante un período de diseño específico y al menor costo posible, ofreciendo a los usuarios comodidad, seguridad y economía. Estas metodologías cambian el enfoque de uno reactivo (reparar cuando falla) a uno proactivo y predictivo, ya que al basarse en datos objetivos y modelos de deterioro, estas herramientas minimizan la subjetividad y el riesgo de realizar inversiones subóptimas (Huallpa Martínez, 2015; Silva-Balaguera et al., 2018).

El mantenimiento y la rehabilitación de los pavimentos en uso, se llevan a cabo por varias razones principales:

- a) **Mejorar la seguridad vial**, teniendo como prioridad corregir las deficiencias del pavimento que ponen en riesgo a los conductores, mediante la reparación de defectos superficiales que causan incomodidad y restaurar la adherencia entre la calzada y los neumáticos, con el fin de evitar accidentes (Silva-Balaguera et al., 2018).
- b) **Prolongar la vida útil de la vía**, mediante la rehabilitación y el mantenimiento adecuado en el momento justo, se llega a prevenir

un deterioro mayor, retrasando la necesidad de una reconstrucción completa y costosa (Hualpa Martínez, 2015).

- c) **Asegurar la sostenibilidad económica de la vía.** El mantenimiento preventivo permite a las entidades a cargo justificar la inversión pública con un análisis técnico y económico sólido, pues al mantener las vías en buen estado, se reducen los costos operativos para los conductores (Hualpa Martínez, 2015; Arias y Rodríguez, 2018).
- d) **Maximizar el retorno de la inversión (ROI).** Al intervenir de manera oportuna en tramos específicos, se puede evitar que el deterioro avance rápidamente, con lo cual se previene la necesidad de una rehabilitación mayor y costosa en el futuro, optimizando el uso de los recursos (Arias y Rodríguez, 2018).

A partir de lo expuesto, las metodologías de priorización se clasifican y estructuran en función de los criterios y modelos que emplean, siendo las más utilizadas en la ingeniería vial, las siguientes:

- a) **Metodologías Basadas en el Estado Físico.** Se cimentan en la evaluación de la condición superficial y estructural del pavimento, contándose dos métodos principales: La evaluación visual y el índice de condición del pavimento (PCI) (Porrás, 2014).

La evaluación visual, es una metodología fundamentada en la evaluación y observación visual y directa de deterioros superficiales como grietas, baches y ahuellamientos; este procedimiento se realiza manualmente mediante dos estrategias:

- 1) **Inspecciones a pie,** registrando el tipo, la extensión y la severidad de cada daño en un formulario; este método ofrece una precisión superior en la identificación de fallas, pero es lento y laborioso;

- 2) **Inspecciones a través del parabrisas**, que se realizan desde un vehículo en movimiento, permitiendo cubrir distancias más largas en menos tiempo y reduciendo los riesgos asociados con caminar por la vía. No obstante, la observación es menos detallada en comparación con las inspecciones a pie (Porras, 2014).

Dentro de las metodologías de priorización centradas en el estado físico, una de las más importantes es el índice de condición del pavimento (PCI), que es una metodología de uso prioritario desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers*), ampliamente utilizada a nivel internacional para la evaluación y clasificación de daños en pavimentos, ya que evalúa de manera objetiva y ponderada el estado de una superficie, cuantificando los tipos, severidad y densidad de las fallas presentes tipo (Silva-Balaguera et al., 2018). El PCI se expresa en una escala numérica de 0 a 100, donde 0 representa una falla total del pavimento y 100 indica una condición óptima. Su aplicación se realiza en tramos de pavimento predeterminados, seleccionados en función de su tipo (Silva-Balaguera et al., 2018).

Tabla 2

Daños Comunes en el Pavimento Flexible Evaluados con Metodologías de Priorización Basadas en el Estado Físico del Pavimento

Categoría	Tipos de daño
Grietas	Longitudinal, transversal, bloque, borde, reflectiva y fatiga
Deformación	Ahuellamiento, corrugado, depresiones y empuje
Deterioro	Baches, parches, pulimento, descascaramiento, fragilidad (piel de cocodrilo inicial) y bombeo
Material inadecuado	Segregación y sangrado

Nota: Tomado de Silva-Balaguera et al. (2018).

b) **Metodologías Basadas en el Costo-Beneficio.** Son estrategias metodológicas que trascienden el análisis del estado físico de las estructuras, incorporando por ejemplo, criterios ambientales y socioeconómicos para evaluar la viabilidad de las intervenciones y considerando la relación entre el costo de la intervención y los beneficios generados (Arias y Rodríguez, 2018). Un ejemplo de estas técnicas es el Análisis de Valor Presente Neto (VPN). Este método compara los costos de mantenimiento y rehabilitación con los beneficios económicos proyectados, como la reducción de los costos de operación vehicular (combustible y desgaste de neumáticos) y la disminución de los tiempos de viaje. Los proyectos con un VPN más elevado se priorizan, ya que representan la opción económicamente más rentable (Caicedo et al., 2018).

En esta metodología se consideran:

- 1) **La condición de los pavimentos**, mediante una evaluación combinada de datos técnicos, es decir, se utiliza el IRI, que cuantifica la rugosidad superficial, y el Índice de Condición del Pavimento (PCI), el cual provee una evaluación estructural. El análisis de estos datos permite clasificar el estado del pavimento y asociarlo a las estrategias de intervención más adecuadas, las cuales incluyen preservación, rehabilitación menor, rehabilitación mayor, reconstrucción menor o reconstrucción total, cada una con sus respectivos costos de operación (Arias y Rodríguez, 2018);
- 2) **La optimización lineal del plan de inversiones en pavimentos**, se ejecuta con herramientas informáticas como *Woodstock de Remsoft Inc.*, simulando escenarios de inversión. La priorización se basa en índices específicos, que incluyen el de progreso social (que mide la traducción del éxito económico en bienestar) y el de competitividad

cantonal (que evalúa la capacidad productiva y factores de desarrollo, identificando necesidades de intervención).

Se consideran restricciones presupuestarias (minimizando costos y maximizando condición) y de plazo (eliminando pavimentos deficientes). Un criterio clave es el impacto ambiental, cuantificando, por ejemplo, las emisiones de CO₂ de cada tratamiento como costo (Caicedo et al., 2018; Arias y Rodríguez, 2018).

- c) **Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS)**. Es una herramienta técnica usada para prolongar la vida útil de las vías, cuya metodología sistemática es la inspección y evaluación de las condiciones del pavimento, lo que permite un análisis detallado de su estado. El sistema integra un análisis de costo-beneficio para diversas estrategias de mantenimiento y rehabilitación, priorizando las intervenciones que maximicen la eficiencia del presupuesto disponible (Sarsam, 2016).

De acuerdo con Sarsam (2016), durante la ejecución de los trabajos, el PMS rastrea los recursos utilizados, incluyendo mano de obra, materiales y equipo, para optimizar su uso, mediante la información obtenida a través de inspecciones visuales o automatizadas, que son registradas en una base de datos para su posterior análisis. Mediante el uso de *software* especializado o juicio de expertos, el sistema genera una curva de deterioro para cada segmento de pavimento, permitiendo por un lado, proyectar su condición futura; y por el otro, facilita la asignación de la estrategia de mantenimiento más rentable, considerando el estado actual, el tipo de superficie, la clasificación funcional y el presupuesto. La aplicación efectiva de un PMS asegura que el tratamiento adecuado se aplique al pavimento correcto en el momento óptimo, maximizando así su vida útil a un costo aceptable.

- d) **Metodologías Multi-Criterio**. La priorización de proyectos de mantenimiento o rehabilitación de pavimentos a menudo requiere la consideración de múltiples factores, tanto cualitativos como

cuantitativos, que no son fácilmente monetizables. En este contexto, las metodologías multi-criterio se han consolidado como herramientas de toma de decisiones eficientes, permitiendo integrar una variedad de criterios, como el estado estructural del pavimento, los niveles de tráfico, la seguridad vial y el impacto ambiental (Moreno, 2011).

Técnicas específicas, como el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP), facilitan la asignación de ponderaciones a cada criterio, permitiendo una evaluación más integral y objetiva. Este enfoque sistemático establece un orden de prioridad equilibrado entre las secciones de pavimento que requieren intervención, especialmente después de que se ha determinado la necesidad de trabajos específicos y se ha asegurado la disponibilidad de fondos. La aplicación de estas metodologías, tal como se discute en la literatura técnica (Moreno, 2011), es un paso relevante para optimizar la asignación de recursos y garantizar el nivel de servicio deseado en la infraestructura vial.

La elección de una metodología u otra dependerá de la disponibilidad de datos, los recursos financieros y la complejidad de la red vial a gestionar. En la práctica, a menudo se utilizan enfoques híbridos para capitalizar las fortalezas de cada método y lograr una gestión más robusta y eficiente de la infraestructura vial.

3.4 Hacia un Sistema de Transporte Público más Eficiente y Sostenible

El transporte es un componente esencial de las sociedades modernas, actuando como un catalizador para la expansión económica y el progreso social, debido a su capacidad para movilizar personas y bienes de manera eficiente, mediante el establecimiento de conexiones vitales entre regiones geográficas, ya sean ciudades, países o continentes. Económicamente, un sistema de transporte estructurado y organizado incrementa la productividad, optimizando la distribución de materias primas y bienes finales, facilitando el acceso a mercados y recursos a gran

escala. El desarrollo de un sistema de transporte eficiente y sostenible no solo es indispensable para el crecimiento económico y la prosperidad, sino que también es relevante para la cohesión social y el progreso general de la humanidad, al reducir la barrera de la distancia (Javed y Ashraf 2024).

Por su parte, Suin-Guaraca y Feijoo-Criollo (2024), refieren que la eficiencia en el transporte se caracteriza por su capacidad para optimizar la relación entre los recursos invertidos (tiempo, combustible, capital) y los resultados obtenidos (velocidad, fiabilidad, rentabilidad). Este concepto no solo se define por la rapidez del servicio, sino también por la capacidad de establecer una conexión efectiva entre la oferta y la demanda, lo que constituye un factor de importancia para el desarrollo.

Actualmente, la implementación de avances tecnológicos, como el *software* de planificación de rutas, ha revolucionado la eficiencia técnico-operativa de los sistemas de transporte, por ser herramientas que permiten minimizar las ineficiencias al reducir la longitud y el tiempo de los trayectos, lo que se traduce directamente en una disminución significativa de los costos laborales y del consumo de combustible (Suin-Guaraca y Feijoo-Criollo, 2024; Franco y Estupiñan, 2023).

Dichas mejoras de costos tienen un efecto en cascada, ya que pueden ser transferidas a los consumidores, fomentando la satisfacción y la fidelización del cliente, lo que es clave para el crecimiento de la base de clientes del sistema de transporte. Desde el punto de vista logístico, la eficiencia del transporte también impacta positivamente la utilización del espacio de almacenamiento y la rentabilidad del negocio, ya que la coordinación eficiente entre el transporte y el almacenamiento permite optimizar al máximo el espacio disponible, reduciendo así los gastos asociados y mejorando los márgenes de beneficio combustible (Suin-Guaraca y Feijoo-Criollo, 2024).

La relación entre la eficiencia del transporte y la sostenibilidad del mismo, se observa en que la mejora en la eficiencia del transporte impacta

directamente en la reducción del impacto ambiental, principalmente al disminuir el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes. Desde una perspectiva empresarial, la implementación de prácticas eficientes en el sector del transporte no solo incrementa la rentabilidad y minimiza el desperdicio de recursos, sino que también se presenta como determinante para el desarrollo regional sostenible y la construcción de un futuro económicamente viable (Pérez et al., 2025).

Actualmente, las políticas gubernamentales y de organismos internacionales promueven una integración entre el transporte urbano y el concepto de ciudad sostenible, debido a que este enfoque se alinea con el principio de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer las de las futuras generaciones. En este contexto, una ciudad sostenible se caracteriza por una gestión integral que incluye la recuperación de espacios urbanos, el control de la expansión urbana, la gestión sostenible de recursos y residuos, la protección del patrimonio natural y cultural, y una mejora significativa en la accesibilidad y la eficiencia del transporte. Es importante destacar que el transporte no opera de manera aislada, sino que actúa como un instrumento clave para la consecución de objetivos estratégicos en diversas políticas sectoriales (Pérez et al., 2025).

En este contexto, el Banco Interamericano de Desarrollo (2014, como se citó en Celi, 2018) en un esfuerzo por fomentar la movilidad sostenible en entornos urbanos, ha destacado la importancia de una planificación urbana integrada, que debe estar centrada en la coordinación del transporte público, el desarrollo de sistemas masivos de tránsito y la promoción de alternativas no motorizadas, como el ciclismo o caminar; sumado a la implementación de políticas de gestión de la demanda para optimizar el flujo de personas y vehículos. Una gestión eficiente y una cobertura de transporte amplia son cruciales para asegurar la movilidad de la población, reducir la congestión vehicular y contribuir a la formación de metrópolis más compactas y eficientes. En esencia, la calidad del sistema de transporte de una ciudad refleja su capacidad para ser funcional, sostenible y habitable.

CAPÍTULO IV

DETERMINACIÓN DEL VALOR IRI CON LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN BASADAS EN TELÉFONOS INTELIGENTES PARA LA MEJORA DEL TRANSPORTE REGULAR DE PERSONAS EN LA AV. INTERNACIONAL, TACNA – 2024

4.1. Introducción

La evaluación y el mantenimiento de la infraestructura vial son factores relevantes para garantizar la seguridad y la eficiencia del transporte urbano y el IRI es una métrica imprescindible para cuantificar la calidad del pavimento. La evolución tecnológica ha posibilitado el surgimiento de aplicaciones móviles que ofrecen una alternativa prometedora y

económica para la medición del IRI, donde aplicaciones como: Roadroid, Totalpave y Abakal, contribuyen para el análisis de la condición superficial de los pavimentos, así como en la determinación de la transitabilidad de una infraestructura vial (Cardoza y Paucara, 2024).

El Informe de Competitividad Global 2018 del Foro Económico Mundial (WEF) subraya la relevancia de la infraestructura vial como sostén importante para el desarrollo y la productividad. Este informe, que evaluó a 138 países, destacó el avance de la infraestructura vial en Perú, posicionándola favorablemente en comparación con la de países vecinos como Paraguay, Venezuela y Colombia (Cardoza y Paucara, 2024). Este reconocimiento resalta la importancia de las inversiones y las políticas públicas destinadas a rehabilitar y mejorar la red de carreteras, contribuyendo directamente a la competitividad del país.

En el Perú, la infraestructura vial ha experimentado un notable avance en los últimos años, con una expansión y mejora sustancial de las carreteras a nivel nacional y departamental, facilitando significativamente dicho progreso y en donde la movilidad y la accesibilidad, se traducen en importantes beneficios socioeconómicos para las regiones interconectadas. La evidencia sugiere una correlación directa entre el bienestar social y el desarrollo eficiente y sostenible del sistema vial, necesitando la optimización de las vías existentes y la construcción de nuevas rutas, como elementos decisivos para fortalecer la conectividad y garantizar un servicio vial de alta calidad (Pillpe, 2018; Pérez et al., 2025).

Sin embargo, el crecimiento urbano desorganizado a menudo produce impactos negativos que afectan la calidad de vida de los habitantes, haciéndose necesario un modelo de movilidad sostenible que emerge como relevancia para el desarrollo de ciudades y sociedades contemporáneas. Igualmente, la estructuración eficiente del transporte público de pasajeros se considera determinante para el progreso de áreas urbanas, ya que fomenta la reducción de la congestión vehicular y la disminución de emisiones contaminantes (Pérez et al., 2025).

Actualmente, el incremento en el volumen de vehículos que transitan entre la ciudad de Tacna y el área de Ciudad Nueva, en el Perú, ha intensificado la congestión vial, contribuyendo al deterioro prematuro de la capa de rodadura, acortando su vida útil y provocando fallas estructurales en la infraestructura vial. Específicamente, la avenida Internacional, objeto de estudio, presenta daños significativos, que al no implementarse medidas de reparación oportunas, se prevé que el pavimento continúe su degradación hasta un punto crítico, lo que eventualmente demandaría una rehabilitación o reconstrucción completa en un plazo considerablemente menor al de su vida útil esperada (Cardoza y Paucara, 2024).

En este orden de ideas, el IRI es un indicador clave para el mantenimiento de pavimentos, ya que su seguimiento desde la puesta en servicio de una vía facilita la identificación oportuna de las intervenciones de conservación o rehabilitación. Esto ha llevado a que el IRI sea ampliamente adoptado a nivel global como el parámetro internacional esencial para evaluar la regularidad de la superficie y como herramienta fundamental en la gestión de infraestructura vial (Bonilla, 2009; Badilla-Vargas, 2011).

Por otro lado, la evaluación continua de la capa superficial del pavimento es un determinante para la transitabilidad y la seguridad vial, por lo cual, se han implementado metodologías de bajo costo y alta accesibilidad que aprovechan la tecnología de los teléfonos inteligentes, como las aplicaciones Roadroid, Totalpave y Abakal, las cuales se emplean para determinar el valor de la rugosidad de la vía.

El progreso en las metodologías de evaluación ha simplificado la resolución de problemas relacionados con el IRI, y mediante el empleo de herramientas como Roadroid, Totalpave y Abakal, tanto los ingenieros viales y de transporte, pueden determinar con precisión los valores de IRI.

Al hacer públicos los valores de IRI, se facilita a la ciudadanía la comprensión del estado de la carretera, lo que a su vez impulsa la formulación de soluciones que buscan mejorar las condiciones de seguridad y *comfort*

durante el transporte, especialmente en arterias viales críticas como la avenida Internacional (Cardoza y Paucara, 2024).

4.2 Aspectos Metodológicos

4.2.1 Objetivo General y Específicos

El objetivo general de esta investigación es evaluar la aplicabilidad de metodologías de evaluación basadas en teléfonos inteligentes para el cálculo del IRI del pavimento en la av. Internacional, Tacna, para que las condiciones del transporte público de pasajeros sean óptimas durante el año 2024 (Cardoza y Paucara, 2024).

Los objetivos específicos son los siguientes:

- 1) Determinar la rugosidad superficial del pavimento de la av. Internacional, Tacna, en el año 2024, mediante el cálculo del IRI utilizando la aplicación Roadroid, con el fin de obtener datos que contribuyan con la mejora del transporte de personas (Cardoza y Paucara, 2024).
- 2) Calcular el IRI de la av. Internacional, Tacna, en el año 2024, empleando la aplicación Totalpave, identificando la condición del pavimento y su impacto en la calidad del servicio de transporte regular de personas (Cardoza y Paucara, 2024).
- 3) Determinar la rugosidad de la av. Internacional, Tacna, en el año 2024, utilizando la aplicación Abakal para el cálculo del IRI, proporcionando una base de datos para la toma de decisiones sobre el mantenimiento y rehabilitación de la vía y la optimización del transporte público (Cardoza y Paucara, 2024).
- 4) Establecer la condición de transitabilidad de la av. Internacional, Tacna, en el año 2024, a partir de la comparación y análisis de los valores IRI obtenidos con las aplicaciones Roadroid, Totalpave y Abakal, con el

propósito de proponer estrategias para mejorar la seguridad y eficiencia del transporte regular de personas (Cardoza y Paucara, 2024).

4.2.2. Metodología aplicada

El diseño de esta investigación se sustenta en un enfoque descriptivo-exploratorio. Se considera descriptivo debido a que se centra en la observación y caracterización sistemática de fenómenos para la generación de nuevos conocimientos teóricos (Baena, 2017). A su vez, el componente exploratorio busca profundizar en el estudio del problema, permitiendo establecer prioridades y orientar futuras investigaciones (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018). La base metodológica para la recolección de datos se apoya en el uso de aplicaciones móviles, debido a que estas herramientas tecnológicas facilitan la captura de información directamente en el campo, presentando los valores del IRI a través de formatos de cálculo y visualizaciones gráficas como diagramas circulares y de barras (Cardoza y Paucara, 2024).

- a) **Tipo de Investigación:** Es un estudio con un enfoque aplicado, es decir, la investigación busca emplear los conocimientos teóricos existentes para abordar y resolver problemas prácticos, ya que este enfoque se distingue por su objetivo de generar soluciones directas y tangibles a desafíos específicos. Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), la investigación aplicada es un método sistemático que utiliza principios científicos para encontrar respuestas a necesidades concretas, enriqueciendo así el conocimiento en un área particular mientras se trabaja hacia una resolución.
- b) **Diseño de Investigación:** El diseño metodológico de la investigación es no experimental, lo que implica que el estudio se enfoca en describir y analizar fenómenos en su entorno natural. Este enfoque se sustenta en la consulta de fuentes documentales y, en menor medida, en el trabajo de campo, para profundizar en el conocimiento de investigaciones previas, ya que en lugar de generar datos primarios a través de la

intervención, se recopila y examina información existente de diversas fuentes (impresas, audiovisuales o electrónicas), siguiendo la definición estratégica propuesta por Hernández-Sampieri y Mendoza (2018). Este tipo de diseño se caracteriza por su naturaleza observacional, lo que permite una comprensión más integral del problema de investigación a partir de evidencia ya establecida.

- c) **Ámbito y tiempo social de la investigación:** Esta investigación se llevó a cabo en el segundo trimestre de 2024 en la jurisdicción de la Región Tacna en el Perú, abarcando los distritos de Alto de la Alianza y Ciudad Nueva; la misma se centró en la evaluación de pavimentos y la recopilación de datos sobre las variables pertinentes. Para ello, se utilizaron aplicaciones de *software* en dispositivos móviles, enfocándose específicamente en la avenida Internacional (Cardoza y Paucara, 2024).

d) Población y Muestra

- 1) **Unidad de Estudio:** Se centra en un tramo de la avenida Internacional, que abarca desde la avenida Jorge Basadre Grohmann hasta el camino vecinal TA-621. Este segmento vial, que se extiende a lo largo de 3.475 metros, conecta el distrito de Alto de la Alianza con el distrito de Ciudad Nueva en la Región Tacna. La infraestructura de la vía se caracteriza por poseer dos calzadas, cada una compuesta por dos carriles de circulación (Cardoza y Paucara, 2024).
- 2) **Población de estudio:** El total de las principales vías arteriales que sirven como acceso al distrito de Ciudad Nueva (Cardoza y Paucara, 2024). Según la conceptualización de Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), una población se refiere a la totalidad de elementos o unidades de análisis que poseen características comunes y que son objeto de interés en una investigación científica. Esta definición asegura que el universo de estudio esté claramente delimitado y sea representativo para la investigación.

- 3) **Muestra de Estudio:** Se centró en la avenida Internacional, abarcando la totalidad de su longitud, que es de 3.475 metros, la misma compuesta por dos calzadas, cada una con dos carriles de circulación. Geográficamente, el tramo de interés se extiende desde la avenida Jorge Basadre Grohmann en el distrito de Alto de la Alianza hasta el camino vecinal TA-621 en el distrito de Ciudad Nueva. Para la selección de los segmentos a analizar, se empleó un muestreo no probabilístico intencional. Este método fue seleccionado por su idoneidad para identificar y estudiar tramos específicos que exhiben características distintivas, como diferentes grados de deterioro estructural o variaciones en las condiciones del flujo vehicular, permitiendo un análisis más enfocado y relevante (Cardoza y Paucara, 2024).

e) Procedimiento, Técnicas e Instrumentos

- 1) **Procedimientos:** Para determinar las condiciones de transitabilidad en la avenida Internacional, se implementó un procedimiento de análisis basado en el IRI. A partir de los datos recopilados por las aplicaciones Roadroid, Totalpave y Abakal, se procesó la información utilizando hojas de cálculo de Excel para obtener los valores del IRI en un tramo específico de la avenida, que conecta los distritos de Alto de la Alianza y Ciudad Nueva (Cardoza y Paucara, 2024).

Las mediciones se realizaron cada 100 metros en ambas calzadas, la izquierda y la derecha, para asegurar una cobertura completa del segmento vial. Posteriormente, se realizó el tratamiento y ponderación de los datos obtenidos para calcular un valor final del IRI que refleja la condición global del pavimento. Este resultado ponderado permitió evaluar de manera integral el estado de la infraestructura vial y su impacto en la transitabilidad a lo largo de toda la avenida Internacional (Cardoza y Paucara, 2024).

- 2) **Técnicas:** Se implementó una metodología de evaluación de la rugosidad del pavimento utilizando dispositivos móviles inteligentes con sistema operativo Android. Específicamente, se emplearon las aplicaciones ROADROID, TOTALPAVE y ABAKAL para la medición y cálculo del IRI (Cardoza y Paucara, 2024).

A partir de los datos del IRI obtenidos, se realizó una evaluación integral de la transitabilidad de la vía. Este análisis permitió determinar las intervenciones necesarias para optimizar las condiciones de transporte en la avenida Internacional, garantizando así un flujo vehicular más eficiente y seguro. Para la recopilación de datos se utilizaron los siguientes formatos: Fichas de campo, registros de observación, informes digitales generados por las aplicaciones Roadroid, Totalpave y Abakal (Cardoza y Paucara, 2024).

- 3) **Instrumentos:** Teléfono inteligente, odómetro manual, vehículo para evaluación, cámara fotográfica, soporte de teléfono (Cardoza y Paucara, 2024).

4.3 Hallazgos

El hallazgo principal, relacionado con el objetivo general de esta investigación, refiere que: Se ha comprobado que el uso de sensores inerciales integrados en dispositivos móviles, como el acelerómetro y el giroscopio, permite una medición precisa y reproducible del IRI del pavimento en la avenida Internacional de Tacna. Este hallazgo validó la aplicabilidad de una metodología de evaluación de bajo costo, accesible y de alta eficiencia para la gestión de infraestructuras viales, en consonancia con los principios de la ingeniería de pavimentos moderna y la gestión de activos. Por otro lado, los resultados obtenidos se fundamentan en la relación física entre las vibraciones y aceleraciones experimentadas por un vehículo y las irregularidades superficiales del pavimento, que de acuerdo con el modelo teórico de respuesta de vehículos, las irregularidades

longitudinales de la superficie de la vía excitan las masas suspendidas y no suspendidas del vehículo, generando un movimiento vertical que puede ser capturado y cuantificado (Cardoza y Paucara, 2024).

1) El hallazgo que se obtuvo en relación al primer objetivo específico:

Determinar la rugosidad superficial del pavimento de la av. Internacional, Tacna, en el año 2024, mediante el cálculo del IRI utilizando la aplicación Roadroid, con el fin de obtener datos que contribuyan con la mejora del transporte de personas, se explica de la siguiente manera: La evaluación de la rugosidad superficial del pavimento de la avenida Internacional en la ciudad de Tacna, Perú, ese llevó a cabo en ambas calzadas, izquierda y derecha, a lo largo de una extensión de 3.400 metros, donde para la recolección de datos, se utilizó la aplicación Roadroid, permitiendo registrar variables clave como latitud, longitud, distancia, velocidad, altitud y pendiente, además de los valores del IRI (Cardoza y Paucara, 2024).

Los resultados del estudio revelaron que la velocidad promedio del vehículo durante la medición fue de 50 km/h, con fluctuaciones entre 34 y 60 km/h. Por otro lado, se observó un aumento progresivo en la altitud, pasando de 633 a 751 metros sobre el nivel del mar, con una pendiente máxima del 6%. En cuanto a la rugosidad del pavimento, se registraron variaciones significativas, es decir, los valores del IRI estimado (eIRI) oscilaron entre 3,01 y 5,95 m/km, mientras que los valores del IRI calculado (cIRI) mostraron un rango más amplio, de 3,52 a 8,41 m/km (Cardoza y Paucara, 2024).

Es importante destacar que el eIRI es una estimación basada en el análisis de vibración, que proporciona una valoración del *confort* que ofrece la vía a los usuarios, indicando qué tan suave o rugosa es dicha vía; mientras que el cIRI se calcula con mayor precisión mediante una simulación de Cuarto de Carro, lo que explica la diferencia en los rangos de valores (Cardoza y Paucara, 2024).

Estos resultados permiten identificar puntos con problemas estructurales en la superficie de rodamiento, especialmente en aquellos segmentos donde los valores de eIRI y cIRI son elevados. Así mismo, las variaciones abruptas de la velocidad sugieren la existencia de problemas de seguridad en puntos específicos de la vía, lo que demuestra la variabilidad de la rugosidad a lo largo del tramo estudiado, proporcionando información crucial para la toma de decisiones en cuanto a mantenimiento, rehabilitación y mejoras de la infraestructura vial (Cardoza y Paucara, 2024).

- 2) **Con respecto al segundo objetivo específico:** Calcular el IRI de la av. Internacional, Tacna, en el año 2024, empleando la aplicación Totalpave, identificando la condición del pavimento y su impacto en la calidad del servicio de transporte regular de personas, el principal hallazgo fue el siguiente: El estudio de la condición de la calzada en la avenida Internacional se llevó a cabo en ambas vías (derecha e izquierda), utilizando el IRI como parámetro de evaluación. Las mediciones, tomadas en tramos de 100 metros a lo largo de 3,4 kilómetros, revelaron que los valores del IRI oscilan entre 3,00 y 8,15, resultando en una variabilidad que evidencia la existencia de tramos en buen estado, con valores de IRI por debajo de 4,0, así como secciones con una superficie de rodadura significativamente irregular, donde los valores superan el 6,0 (Cardoza y Paucara, 2024).

El análisis longitudinal del IRI a lo largo de la avenida no mostró una tendencia lineal, sino una serie de fluctuaciones, por ejemplo, los valores más altos se registraron en los primeros 200 metros (IRI de 6,26 y 8,15). Posteriormente, entre los kilómetros 0+300 y 1+100, se observó una mejora en la regularidad, con valores bajos que oscilan entre 3,00 y 4,25. Sin embargo, a partir del kilómetro 1+600, se identificó un incremento gradual en el IRI, alcanzando un valor de 4,93 en el tramo final. Estos tramos con valores de IRI superiores a 6,0 se clasifican como puntos críticos, ya que la irregularidad de la superficie de rodadura podría comprometer la seguridad y el confort de los usuarios de la vía. En

particular, los segmentos entre los kilómetros 0+000 y 0+200, y entre los kilómetros 1+600 y 1+800, presentan los valores más elevados del IRI. Estos hallazgos sugieren que dichos tramos deben ser priorizados para labores de rehabilitación y mejora de la infraestructura vial (Cardoza y Paucara, 2024).

- 3) **Los hallazgos, en relación al tercer objetivo específico:** Determinar la rugosidad de la av. Internacional, Tacna, en el año 2024, utilizando la aplicación Abakal para el cálculo del IRI, proporcionando una base de datos para la toma de decisiones sobre el mantenimiento y rehabilitación de la vía y la optimización del transporte público, revelaron que: En la evaluación de la superficie vial de la avenida Internacional, se aplicó la herramienta Abakal para determinar el IRI en ambas calzadas. Las mediciones se extendieron a lo largo de 3.200 metros, abarcando variables como longitud, altitud, velocidad y el IRI de las calzadas derecha e izquierda. Los hallazgos revelaron una altitud progresiva de 633 a 755 metros, con variaciones mínimas a lo largo de la vía, donde la velocidad promedio registrada fue de aproximadamente 50 km/h, con fluctuaciones entre 40 y 58 km/h. Con base en estos datos, se obtuvieron valores de IRI que oscilaron entre 2,55 m/km y 6,00 m/km, lo que evidencia una heterogeneidad en el estado de la superficie de rodadura de la avenida (Cardoza y Paucara, 2024).

Se identificaron dos segmentos específicos con valores de IRI notablemente elevados, indicativos de una mayor irregularidad en la superficie. Estos tramos se localizan entre los kilómetros 0+900 y 1+000, así como entre los kilómetros 2+200 y 2+300, donde el IRI alcanzó un máximo de 6,00 m/km. La alta rugosidad en estos puntos sugiere que requieren una atención prioritaria para la rehabilitación y mejora de la calzada, en aras de optimizar las condiciones de circulación, así como la eficiencia y el *confort* en el servicio del sistema de transporte público (Cardoza y Paucara, 2024).

4) **Con respecto al cuarto objetivo específico:** Establecer la condición de transitabilidad de la av. Internacional, Tacna, en el año 2024, a partir de la comparación y análisis de los valores IRI obtenidos con las aplicaciones Roadroid, Totalpave y Abakal, con el propósito de proponer estrategias para mejorar la seguridad y eficiencia del transporte regular de personas, los principales hallazgos fueron los siguientes: Se realizó un análisis comparativo de la condición del pavimento en la avenida Internacional mediante la medición del IRI y el Índice de Serviciabilidad del Pavimento (PSI). Estas mediciones se efectuaron a lo largo de segmentos de 100 metros utilizando tres aplicaciones móviles: Roadroid, Totalpave y Abakal (Cardoza y Paucara, 2024).

Estos hallazgos revelaron que, al emplear Roadroid, el Índice de Rugosidad Estimado (eIRI) en la calzada derecha varió entre 3,01 y 5,95, mientras que en la calzada izquierda se registraron valores entre 4,01 y 9,58. Paralelamente, los valores de PSI para la misma aplicación oscilaron entre 2,03 y 2,89 en la calzada derecha y entre 0,88 y 2,34 en la izquierda (Cardoza y Paucara, 2024).

Al utilizar Totalpave, los valores de IRI se situaron entre 3,00 y 8,15 para la calzada derecha y entre 3,63 y 6,26 para la izquierda. Los valores de PSI, por su parte, se encontraron en el rango de 1,14 a 2,90 en la calzada derecha y de 1,60 a 2,30 en la calzada izquierda (Cardoza y Paucara, 2024).

Finalmente, con Abakal, los valores de IRI fluctuaron entre 2,55 y 6,00 en la calzada derecha y entre 3,08 y 6,00 en la izquierda. Los valores de PSI se establecieron entre 1,68 y 3,09 para la calzada derecha y entre 1,68 y 2,86 para la calzada izquierda (Cardoza y Paucara, 2024).

El análisis de los datos obtenidos de las tres aplicaciones demostró que todas proporcionaron mediciones de IRI y PSI consistentemente similares, lo que valida su eficacia como herramientas para la evaluación de la rugosidad y el estado funcional del pavimento. La convergencia de

estos resultados sugiere que la condición de transitabilidad de la avenida Internacional en Tacna, durante el año 2024, es de regular a mala y la capa superficial del pavimento se califica como mala (Cardoza y Paucara, 2024).

En consecuencia, se propone la necesidad de una intervención de rehabilitación en la vía para mitigar los riesgos asociados a la seguridad vial y mejorar la eficiencia del transporte. Estas acciones son esenciales para establecer estrategias que garanticen una circulación más segura y efectiva para los usuarios reglados del transporte (Cardoza y Paucara, 2024).

4.4 Discusión y Conclusiones

4.4.1 Discusión

En respuesta a la complejidad del mantenimiento vial, la comunidad científica y de ingeniería ha enfocado sus esfuerzos en llevar a cabo estudios que evalúan y mejoran la rehabilitación y el mantenimiento de pavimentos. Dichos estudios se basan en indicadores tradicionales como el IRI, el PCI y el SDI, entre otros, que mediante la integración de tecnologías emergentes han permitido optimizar los métodos de evaluación, facilitando la identificación de estrategias de evaluación de vías que sean más eficientes y rentables. Esto no solo contribuye a la longevidad de la infraestructura, sino que también garantiza la seguridad y la eficiencia del transporte.

Silva-Balaguera, Daza-Leguizamón y López-Valiente (2018), realizaron un estudio intitulado *Gestión de pavimentos basado en sistemas de información geográfica (SIG): Una revisión*, cuyo objetivo general fue identificar mejoras prácticas para el mantenimiento de la red vial, reconociendo los principales cambios y sugerencias en los sistemas de gestión de pavimentos (SGP) para asfalto flexible, observados en el desarrollo internacional. La metodología se sustentó en un análisis cualitativo-documental.

Este estudio refiere que los métodos convencionales para la gestión de carreteras presentaban deficiencias en el acceso a la información, limitando la ejecución de proyectos de infraestructura y para resolver este problema Colombia implementó a Hermes, un Sistema de Información Geográfica (SIG) para inventariar su red vial. Este sistema, junto con los Sistemas de Gestión de Pavimentos (SGP), optimiza la toma de decisiones en lo que respecta a las políticas de mantenimiento, rehabilitación y mejoras del sistema de carreteras del país.

Los resultados de dicha investigación, refieren que los SGP basados en los SIG, ofrecen una solución técnica y económica para la administración de redes viales, ya que esta metodología permite una evaluación del estado de los pavimentos más ágil y eficiente, lo que se traduce en una selección y ejecución de intervenciones viales más rápida y rentable. La clave de esta eficacia radica en la recolección, organización, verificación, procesamiento y presentación estructurada de la información (Silva-Balaguera et al., 2018).

Finalmente, la investigación concluye que la integración de una base de datos espacial en un SGP facilita la optimización de los recursos financieros al priorizar las inversiones en la red vial. Esto, a su vez, reduce significativamente los tiempos de procesamiento de datos y mejora la accesibilidad a la información histórica y espacialmente zonificada del pavimento, posibilitando una evaluación detallada de su evolución a lo largo del tiempo (Silva-Balaguera et al., 2018).

Otro estudio en esta misma línea de investigación fue desarrollado por Castro et al. (2021), intitulado *Tecnologías empleadas en la evaluación de pavimentos e impacto que han generado*. Este artículo expone que los pavimentos son infraestructuras esenciales para el desarrollo de un país, ya que garantizan la transitabilidad de vehículos de manera segura y eficiente; para asegurar su rendimiento óptimo y durabilidad, se aplican diversos métodos de evaluación que analizan sus fallas y su desempeño a lo largo

del tiempo, siendo estos análisis cruciales para formular recomendaciones de mantenimiento efectivas.

Esta investigación se enfoca en una comparativa de métodos de evaluación de pavimentos, contrastando técnicas tradicionales como el IRI, el PCI y el SDI, con el uso de nuevas tecnologías. El objetivo general es conocer los diferentes métodos de evaluación de pavimentos que permitan conocer las típicas fallas de estos y tiempo de vida útil, dando un debido mantenimiento en el tiempo que estas lo requieran y evitar fallas difíciles de controlar.

La metodología se fundamentó en una revisión bibliográfica exhaustiva para investigar los métodos de evaluación del estado de los pavimentos. La búsqueda inicial de información se centró en la recopilación de estudios que detallaran las metodologías aplicadas para obtener resultados precisos y, a partir de ellos, establecer recomendaciones y prioridades de reparación (Castro et al., 2021).

Los autores hacen hincapié en el sistema LiDAR (*Light Detection and Ranging*) como herramienta clave para la evaluación de pavimentos; gracias a sus sensores ópticos crea modelos 3D de alta precisión de las superficies de la carretera, permitiendo a los ingenieros medir deflexiones y evaluar el estado del pavimento. Esta tecnología funciona con los mismos principios en los iPhones que en los usos comerciales a gran escala; entre los móviles que usan esta metodología se pueden mencionar Samsung Galaxy S21 Ultra, OnePlus 9 Pro, Xiaomi Mi 11 Ultra, entre otros. LiDAR es una tecnología móvil que ofrece ventajas significativas sobre los métodos tradicionales, como la reducción de costos y tiempo, y una mayor seguridad al realizar las inspecciones a velocidad de tráfico. Al combinar los datos LiDAR con imágenes RGB, se puede mejorar la detección de defectos y la clasificación de las carreteras, optimizando el mantenimiento urbano (Castro et al., 2021).

La investigación concluye que la implementación de tecnologías modernas en los métodos de evaluación de pavimentos tradicionales optimiza la detección de fallas y la clasificación de su gravedad. Este enfoque no solo acelera el proceso y mejora su eficacia, sino que también reduce los costos asociados a los materiales, debido a que la integración de estas herramientas permite una mejora en la precisión de los resultados, facilitando la determinación del tipo de mantenimiento adecuado para cada pavimento, según su nivel de deterioro. Además, se destaca la utilidad de aplicaciones móviles gratuitas que simplifican la evaluación de los pavimentos, haciéndola accesible y económica para cualquier usuario (Castro et al., 2021).

Por su parte, Al-Sabaei et al. (2024) realizaron un estudio intitulado *Smartphone applications for pavement condition monitoring: A review*, que resalta que los sistemas de monitorización del estado del pavimento (PCM) son esenciales para tomar decisiones sobre el mantenimiento y la rehabilitación de carreteras, con el fin de preservar los activos de carreteras y aeropuertos en buen estado durante más tiempo. En este contexto, los teléfonos inteligentes están equipados con propiedades adecuadas de almacenamiento, computación y comunicación, además de sensores integrados que muestran una excelente capacidad para capturar información por los usuarios de los sistemas de carreteras y el entorno que los rodea. Por lo tanto, vale la pena utilizarlos para un PCM eficiente y rentable (Al-Sabaei et al., 2024).

El objetivo general de esta investigación fue estudiar los esfuerzos de los investigadores en la aplicación de los teléfonos inteligentes para el PCM. Para ello, la metodología aplicada se centró en la recopilación de las opiniones de los investigadores; investigación y análisis de la bibliografía en debates coherentes, donde se destaca las motivaciones y los retos del uso de dicha tecnología para la detección de defectos en el pavimento (Al-Sabaei et al., 2024).

Entre los hallazgos de dicha investigación se ha descubierto que la tecnología de las aplicaciones para teléfonos inteligentes es viable y precisa hasta cierto punto, como alternativa a las tecnologías convencionales para el PCM en zonas rurales, autopistas y aeropuertos. Sin embargo, esta tecnología aún se encuentra en una fase inicial y es necesario estudiar y desarrollar muchos factores, calibraciones y estándares en futuras investigaciones en diferentes países, en diversos entornos y con diferentes características de los teléfonos inteligentes. Por ejemplo, una de las deficiencias del uso de la tecnología de sensores basada en teléfonos inteligentes es que los datos recopilados no se obtienen directamente de la superficie del pavimento, sino que se deducen a partir de los datos resultantes de la interacción entre el vehículo, el conductor y el pavimento (Al-Sabaei et al., 2024).

Para estos autores, este procesamiento de datos podría limitar la precisión de dicha tecnología. También se prevé que los datos generados por los sensores varíen en función de las propiedades del teléfono inteligente, las condiciones del sensor, el comportamiento de los conductores, la dinámica del vehículo y las condiciones que dan lugar a diferencias en los datos registrados. Por lo tanto, esta tecnología aún requiere más investigaciones y evaluaciones, especialmente en lo que respecta a la precisión en la recopilación de datos (Al-Sabaei et al., 2024).

4.4.2 Conclusiones

En la avenida Internacional, se ha evaluado el IRI del pavimento mediante metodologías de bajo costo que emplean aplicaciones de teléfonos inteligentes. Los resultados, obtenidos a través de las aplicaciones Roadroid, Totalpave y Abakal, revelaron discrepancias. Específicamente, el análisis ponderado del IRI para la avenida arrojó valores de 4,65 m/km (Roadroid), 4,44 m/km (Totalpave) y 4,50 m/km (Abakal). Estos valores indican de manera consistente un estado de pavimento deficiente, calificándolo como malo y resaltando la urgencia de intervenciones para optimizar las condiciones de rodadura y la seguridad vial (Cardoza y Paucara, 2024).

En este estudio se determinó el valor del IRI, utilizando la aplicación Roadroid instalada en teléfonos inteligentes Samsung Galaxy S9. Los cálculos se realizaron a velocidades que oscilaron entre 40 y 60 km/h, observándose que a medida que la velocidad de medición aumentaba, los valores del IRI calculado (cIRI) se aproximaban más a los del IRI estimado (eIRI), siendo la similitud más notable a velocidades superiores a 60 km/h. En el análisis de las vías deterioradas, se evidenció una mayor disparidad entre el eIRI y el cIRI, ya que, los valores obtenidos en esta investigación fueron de 4,17 m/km y 5,12 m/km para el carril derecho, y 5,12 m/km y 7,63 m/km para el carril izquierdo. A partir de estos resultados, se concluyó que los valores de eIRI se ajustan de manera más precisa a la realidad de la avenida Internacional, lo que permitió determinar un IRI promedio de 4,65 m/km para toda la avenida. Este valor clasifica la condición del pavimento superficial como “malo” (Cardoza y Paucara, 2024).

Mediante la utilización de la aplicación móvil Totalpave, se llevó a cabo una evaluación de la irregularidad longitudinal del pavimento a lo largo de un tramo de 3,4 km en la avenida Internacional. Los datos obtenidos revelaron un IRI promedio de 4,19 m/km para la calzada derecha y 4,69 m/km para la calzada izquierda. El valor ponderado del IRI para toda la sección analizada se situó en 4,44 m/km. De acuerdo con los parámetros de clasificación técnica, estos valores demuestran que el estado de la capa de rodadura del pavimento en la avenida Internacional es deficiente, lo que indica la necesidad de una intervención de rehabilitación para mejorar su funcionalidad y seguridad (Cardoza y Paucara, 2024).

La evaluación de la calidad de la superficie de rodadura de la avenida Internacional se realizó utilizando la aplicación Abakal para dispositivos móviles. El análisis, que cubrió una distancia de 3,4 km, se basó en la medición del IRI, un parámetro para la evaluación del estado del pavimento. Los resultados revelaron un IRI de 4,04 m/km en el carril derecho y 4,95 m/km en el carril izquierdo, arrojando un promedio de 4,50 m/km. Esta cifra promedio evidencia que el estado del pavimento es deficiente, lo

que lo cataloga como “malo” según los criterios de clasificación técnica (Cardoza y Paucara, 2024).

El análisis de la transitabilidad de la superficie de rodadura se llevó a cabo utilizando el IRI, el cual fue determinado mediante las aplicaciones móviles Roadroid, Totalpave y Abakal. Los resultados obtenidos a través de estas herramientas tecnológicas demostraron una notable coherencia entre sí, tanto en la calificación del estado del pavimento como en la evaluación de la transitabilidad. Este hallazgo sugiere que dichas aplicaciones pueden ser consideradas como alternativas viables y significativamente más económicas en comparación con los métodos tradicionales de evaluación.

Al comparar los valores promedio del IRI (IRI promedio = 4,53 m/km), se evidencia una consistencia en la clasificación del pavimento como “malo”, lo que resalta la similitud en el diagnóstico proporcionado por las tres aplicaciones. Por otra parte, la evaluación de la transitabilidad, con un valor promedio del PSI de 2,20, se ubica ligeramente por debajo del umbral para ser calificada como “regular”, aproximándose a la categoría “mala”. Esta clasificación resulta crucial para la toma de decisiones, ya que proporciona una base sólida para la proposición de un plan de intervención de rehabilitación adecuado para la av. Internacional, garantizando la seguridad y optimizando la gestión de la infraestructura vial.

REFLEXIONES FINALES

La presente investigación pone de manifiesto la posibilidad de utilizar herramientas tecnológicas accesibles para la evaluación de la condición superficial de la infraestructura vial, donde la integración de aplicaciones móviles como Roadroid, Totalpave y Abakal en la gestión de redes de transporte representa un avance importante al democratizar el acceso a datos cruciales. Los resultados obtenidos, que permiten cuantificar la rugosidad superficial y calificar la transitabilidad, subrayan la capacidad de estas plataformas para generar información precisa y accionable, optimizando la planificación de intervenciones como el mantenimiento, la rehabilitación o la reconstrucción y minimizando la dependencia de equipos especializados y personal altamente calificado para la determinación del IRI (Cardoza y Paucara, 2024).

Con base en lo anterior, se invita a las entidades gubernamentales al nivel regional y local, considerar la implementación de estas herramientas en sus protocolos de evaluación vial, ya que su uso en futuras investigaciones se propone como un catalizador para el desarrollo de estrategias de gestión de pavimentos más eficientes y costo-efectivas, sentando las bases para una infraestructura vial más segura y sostenible (Cardoza y Paucara, 2024).

La investigación ha validado la aplicación Roadroid como una herramienta confiable y económica para la evaluación de la condición superficial de los pavimentos. Mediante esta metodología, se obtuvo un IRI promedio de 4,65 m/km, lo que califica el estado del pavimento como “malo”. Por tal razón, se exhorta que entidades como la Municipalidad Distrital Alto

de la Alianza y la Municipalidad Distrital de Ciudad Nueva adopten esta tecnología para la priorización eficiente de metodologías y actividades de mantenimiento y reconstrucción. Además, futuras investigaciones podrían enfocarse en integrar estos datos con sistemas de información geográfica (SIG) para una gestión más completa y estratégica de la red vial (Silva-Balaguera et al., 2018).

La evaluación exhaustiva de la avenida Internacional, mediante el *software* Totalpave, arrojó un IRI de 4,44 m/km. Este valor, que clasifica el pavimento como “malo” y su transitabilidad de “regular a mala”, justificando la necesidad de intervención. Por tanto, se propone la rehabilitación con carpeta asfáltica en frío como una solución viable y costo-efectiva para restaurar la capa de rodadura (Cardoza y Paucara, 2024).

La implementación de aplicaciones móviles especializadas representa una optimización apreciable en la evaluación y gestión de pavimentos, ya que elevan la confiabilidad y eficiencia del proceso, reduciendo costos y tiempo. Se valida su uso como un método fiable para determinar la serviciabilidad y transitabilidad vehicular, recomendándose a los especialistas su adopción; y como proyección, se propone investigar su validación y estandarización en una gama más amplia de carreteras, incluyendo tramos de alta velocidad (> 80 km/h), para consolidar su uso en la metodología de inspección vial (Cardoza y Paucara, 2024).

REFERENCIAS

- Almeida, J. (2023). *Aplicación del Índice de Regularidad Internacional para la seguridad vial en el paso lateral El Carmen-Manabí* [Tesis de grado, Universidad Estatal de Manabí, Jipijapa, Ecuador]. <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/5169/1/ALMEIDA%20GILER%20JOS%C3%89%20REINALDO.pdf>
- Almenara, C. (2015). *Aplicación de teléfonos inteligentes para determinar la rugosidad de pavimentos urbanos en Lima* [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/6fc05542-e36c-45f4-a88c-6b8653336992/content>
- Al-Sabaei, A., Souliman, M. & Jagadeesh, A. (2024). Smartphone applications for pavement condition monitoring: A review. *Construction and Building Materials*, 410 (5). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134207>
- Ancco, S. (2018). *Gestión de la infraestructura vial y desarrollo turístico sostenible del Distrito de San Pedro de Cachora – Abancay - Apurímac, 2018* [Tesis doctoral, Universidad César Vallejo, Trujillo, Perú].
- Arias, R. y Rodríguez, J. (2018). Criterios ambientales y socioeconómicos para priorizar inversiones en la red vial de Costa Rica. *Revista Infraestructura Vial / LanammeUCR*, 20 (35). <https://archivo.revistas.ucr.ac.cr//index.php/vial/article/view/34830>

- Arriaga, M., Garnica, P. y Rico, Alfonso. (1998). *Índice Internacional de Rugosidad en la red carretera de México. Publicación Técnica 108*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano de Transporte. <http://imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnicapt108.pdf>
- Baena, G. (2017). *Metodología de la investigación*. Grupo Editorial Patria. http://www.biblioteca.cij.gob.mx/archivos/materiales_de_consulta/drogas_de_abuso/articulos/metodologia%20de%20la%20investigacion.pdf
- Badilla-Vargas, G. (2011). Aspectos y consideraciones importantes en el cálculo del índice de regularidad internacional IRI. *Ingeniería*, 20 (1-2), 155-168.
- Bonilla, G. (2009). Aspectos y consideraciones importantes: Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI). *Infraestructura Vial*, (21).
- Caicedo, A., Fierro, A. y Vidal, N. (2018). *VPN Igual a Cero como validador de proyectos sociales* [Artículo de reflexión, Universidad Cooperativa de Colombia]. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/21624775-fd3f-49a9-8889-7b88d4cf08af/content>
- Callacondo, J. (2020). *Análisis de la rugosidad superficial en carretera no pavimentada a partir de información derivada de método estático directo y sistema de aeronaves pilotadas a distancia Phantom 4 Rtk, carretera Dv. Isla Esteves – Emp. Pe 3S Puno* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano, Perú] https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/14472/Callacondo_Perez_Jose_Luis.pdf;jsessionid=C372416E345E1BC3EE6533A7EF9D15B9?sequence=1
- Cardozo, W. y Paucara, M. (2024). *Metodologías de Evaluación del Pavimento Basado en el Teléfono Inteligente para Mejorar el Transporte Regular de Personas en la*

-
- Av. Internacional, Tacna – 2024* [Tesis de Maestría, Universidad Privada de Tacna, Perú]. <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/3949>
- Castro, L., Muñoz, S., Paucar, J. y Ramírez, R. (2021). Tecnologías empleadas en la evaluación de pavimentos e impacto que han generado. *Revista de Investigación Científica y Tecnológica Llamkasum Trabajemos*, 2(1).
- CEDEX. (2025). *Perfilómetro Láser*. <https://www.cedex.es/centros-laboratorios/centro-de-estudios-del-transporte-cet/equipos-de-auscultacion/perfilometro-laser>
- Cedillo, L. y Pauta, W. (2023). *Diseño de un sistema de gestión de infraestructura vial para el oeste del centro urbano de Santa Isabel* [Tesis de grado, Universidad de Cuenca, Ecuador]. <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/59c9cd0b-ea13-4ca2-a99b-09dc3d9994cb/content>
- Celi, S. (2018). Análisis del comportamiento del transporte público a nivel mundial. *Revista Espacios*, 39 (18), 10. <https://www.researchgate.net/publication/325130617>
- Cepeda, M. (2019). *Determinación de la relación entre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y la generación de ruido vehicular* [Tesis de maestría, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. <https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/ba998c33-44cc-4a04-98bf-9eced1efb69d/content>
- Chaluiza, E. y Estévez, D. (2023). *Diseño, elaboración e implementación de un “Rugosímetro Merlin” en el laboratorio de pavimentos de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Sur* [Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/25106/1/TTS1316.pdf>

- Chinchay, M. (2023). *Proyectos de inversión pública en infraestructura vial y desarrollo social en Lima Este, 2013-2022* [Tesis doctoral, Universidad César Vallejo, Lima, Perú]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/122420/Chinchay_%20HMH-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=
- Crispin, N. y Estrada, J. (2025). *Influencia de la geometría en el cálculo del Índice de Regularidad Internacional obtenido con el perfilómetro láser en un proyecto de conservación vial* [Tesis de grado, Universidad San Ignacio de Loyola, Lima, Perú]. <https://repositorio.usil.edu.pe/server/api/core/bitstreams/0b79e80e-61f8-4255-b128-fa4961e93216/content>
- Espinoza, C., Osorio, A. y Araya, F. (2025). Exploración de la integración de parámetros socioeconómicos en la gestión de infraestructura vial. *Revista Ingeniería de Obras Civiles*, 13(01), 01-010. <https://rioc.ufro.cl/index.php/rioc/article/view/3378/2429>
- Flores, L. (2022). *Análisis comparativo del IRI entre el teléfono inteligente y el rugosímetro de Merlin, dando propuesta de solución en la av. Los Ángeles del Distrito de Pocollay, Tacna-2022* [Tesis de grado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú]. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/2f1f54b9-6f43-4c45-a406-d63f5102db34>
- Franco, J. y Estupiñan, E. (2023). Movilidad y transporte inteligente: Una revisión de aplicaciones y tecnologías emergentes en el contexto de una ciudad inteligente. *Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, 10 (20), 79-87. DOI: <http://dx.doi.org/10.21017/rimci.2023.v10.n20.a142>
- Gobierno del Perú. (9 de agosto de 2023). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Normas vigentes en materia de infraestructura vial.

<https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/4504137-normas-vigentes-en-materia-de->

Hernández-Sampieri, R. y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Interamericana. <https://bellasartes.upn.edu.co/wp-content/uploads/2024/11/metodologia-de-la-investigacion-Sampieri-Mendoza-2018.pdf>

Homero, T. (2021). *Análisis del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de la superficie del pavimento flexible de la vía Cajamarca – Baños del Inca, utilizando el rugosímetro de Merlín* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú]. <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/4366/tesis%20-%20Sustentacion%20Publica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Huallpa-Martínez, S. (2015). *Criterios de priorización de actividades para una conservación vial efectiva*. Publicaciones de la Universidad Nacional del Centro del Perú. https://www.academia.edu/19123433/_Criterios_de_Priorización_de_Actividades_para_una_Conservación_Vial_Efectiva_

Huamán, N. (28 de enero de 2025). Importancia del Índice de Regularidad Internacional (IRI) y sus implicancias en el servicio de una carretera. *Revista Vial*. <https://revistavial.com/importancia-del-indice-de-regularidad-internacional-iri-y-sus-implicancias-en-el-servicio-de-una-carretera/>

Javed, M. & Ashraf, A. (2024). Smart and Sustainable Public Transportation - A Need of Developing Countries. *International Journal of Networked and Distributed Computing*, 12, 144–152. <https://doi.org/10.1007/s44227-024-00023-2>

- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de Costa Rica. (2013). *Propuesta para la definición de un procedimiento de medición y análisis del Índice de Regularidad Internacional (IRI)*. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/399/LM-PI-002-2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Limay, T. (2021). *Análisis del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de la superficie del pavimento flexible de la vía Cajamarca – Baños del Inca, utilizando el rugosímetro de Merlin* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú]. <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/4366/TESIS%20-%20Sustentacion%20Publica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- López- López, M. (2024). La Infraestructura Vial en Costa Rica: del Enfoque Centrado en el Rezago, al Enfoque Prospectivo. *Revista Espiga*, 23(48), 227-244. <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/espiga>
- Moreno, F. (2011). *Metodología para la Determinación de Estrategias para la Conservación de Pavimentos*. Publicado por la Compañía de Alta Tecnología en Ingeniería de Pavimentos y Seguridad Vial, S.A. de C.V., México. fjmorfi6@prodigy.net.mx. <https://proceedings-mexico2011.piarc.org/ressources/files/4/0775-es.pdf>
- Moreno, L. (2016). *Influencia de la velocidad en la medición de IRI con el equipo perfilómetro láser* [Tesis de grado, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia] <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/0010cb57-946d-41a2-a06d-1673c05a8d92/content>
- Pérez, L., Ortecho, Z. y Alas, D. (2025). Movilidad urbana y desarrollo sostenible: Implicaciones para el progreso social. *Clio. Revista de Historia, Ciencias Humanas y Pensamiento Crítico*, 5 (10), 516-539. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14982971>

- Pillpe, L. (2018). *Aplicación de un sistema de gestión de pavimentos urbano local a nivel de red mediante el Índice de Rugosidad Internacional IRI como variable de condición en la red vial del distrito de Concepción* [Tesis de Grado, Universidad Continental, Huancayo-Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/5118>
- Porras, H., Ramón, J., Mejía, Y. y Parra, J. (2014). Sistemas automáticos para la adquisición de datos enfocados a examinar pavimentos flexibles. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24 (1), pp. 79 - 98.
- Prada, J. (21 de agosto de 2024). *Dominando el IRI con el perfilómetro láser RSP MK-III y/o IV – Guía Práctica*. https://www.dynatestlatam.com/iri_rsp_mk_guia/
- Pradena, M. (2006). Análisis de regularidad superficial en caminos pavimentados. *Revista de la Construcción*, 5 (2), 16-22. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127619380002>
- Ramírez, B. (2017). *Cálculo del IRI mediante acelerómetro de Smartphone en el tramo Huarmey – Casma de la Carretera Panamericana Norte* [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/532b3783-7c90-4633-8747-6fd1160f83de/content>
- Saldaña, D., Díaz, R., Márquez, W. y Garrido, R. (2017). *Evaluación comparativa de la medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) empleando tecnología láser de tres dimensiones (lcms) y perfilómetro láser*. Congreso Iberoamericano del Asfalto, Medellín.
- Saltos, E. (2023). *Determinación del Índice de Rugosidad Internacional de la vía de Los Angeles-Andil* [Tesis de grado, Universidad Estatal del Sur

- de Manabí, Jipijapa, Ecuador]. <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/5444/1/Saltos%20Zavala%20Erick%20Leonardo.pdf>
- Sarsam, S. (2016). Pavement maintenance management system: *A Review. Trends in Transport Engineering and Applications*, 3 (2), 19-30. <https://www.researchgate.net/publication/307976894>.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte y el Instituto Mexicano de Transporte (2000). *Influencia de la rugosidad del pavimento sobre la respuesta direccional de vehículos de cargas articulados*. Publicación Técnica N° 57-Sanfadila, Qro.
- Silva-Balaguera, A., Daza-Leguizamón, O. y López-Valiente, L. (2018). Gestión de pavimentos basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG): Una revisión. *Revista Ingeniería Solidaria*, 14, (26). DOI: <https://doi.org/10.16925/in.v14i26.2417>
- Suárez, R. (2023). *Sistemas para analizar señales de sensores en celulares que permitan identificar y analizar la mala calidad del pavimento en las vías* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia]. <https://apidspace.javeriana.edu.co/server/api/core/bitstreams/28e1b2c6-ad6b-45cc-975d-a475bc75a58b/content>
- Suin-Guaraca, L. y Feijoo-Criollo, P. (2024). Eficiencia técnica en el servicio de transporte público de pasajeros: Estudio de caso Cuenca, Ecuador. *Transporte y Territorio*, 30,190-204. doi: 10.34096/rtt.i30.12454
- Velázquez, H. (2024). *Aplicación del Índice de Regularidad Internacional para la seguridad vial en la avenida 3 de Julio El Carmen-Manabí* [Tesis de grado, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador]. <https://repositorio.>

unesum.edu.ec/bitstream/53000/6866/1/Vel%c3%a1squez%20Zambrano%20Hervin%20Rodolfo.pdf

Yamazen Mexicana. (17 de abril de 2020). *El rugosímetro, parte de los instrumentos de medición, Metrología*. <https://yamazen.com.mx/blog/metrology-gdt-and-lab-test/el-rugosimetro-parte-de-los-instrumentos-de-medicion-metrologia.html>

White, F. M. (2016). *Fluid mechanics*. McGraw-Hill Education.

Zeballos, G. y Vizcaya, C. (2021). *Aplicación de teléfonos inteligentes y el rugosímetro de Merlin para la determinación de la rugosidad del pavimento flexible en la carretera Ta-615, tramo: Puente El Peligro – Emp. Pe-40, Tacna – 2020* [Tesis de grado, Universidad Privada de Tacna, Perú]. <https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/1864/Zeballos-Zegarra-Vizcarra-Arocutipa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>



EDITORIAL
NAVEGANTE