

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**“EVALUACIÓN SUPERFICIAL DE LA CARPETA ASFÁLTICA  
UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON RPAS Y EL  
RUGOSIMETRO DE MERLÍN EN LA AVENIDA CELESTINO  
VARGAS TRAMO ÓVALO DE POCOLLAY – AVENIDA VILAUTA,  
TACNA 2025”**

**PARA OPTAR:**

**TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. THAIS DEL ROSARIO PARIÁ BALUARTE  
Bach. MARIA ALEXANDRA VILLAR MONTES DE OCA**

**TACNA – PERÚ**

**2025**

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS**

**“EVALUACIÓN SUPERFICIAL DE LA CARPETA ASFÁLTICA  
UTILIZANDO FOTOGRAMETRÍA CON RPAS Y EL  
RUGOSIMETRO DE MERLÍN EN LA AVENIDA CELESTINO  
VARGAS TRAMO ÓVALO DE POCOLLAY – AVENIDA VILAUTA,  
TACNA 2025”**

Tesis sustentada y aprobada el 13 de diciembre de 2025; estando el jurado calificador integrado por:

**PRESIDENTE : Dr. PEDRO VALERIO MAQUERA CRUZ**

**SECRETARIO : Mtra. ROSALÍ CRISTINA ALANA COTRADO**

**VOCAL : Mtra. MARIA ETELVINA DUARTE LIZARZABURO**

**ASESOR : Mag. OMAR ARTURO CUTIMBO TICONA**

## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotras, Thais Paria Baluarte y María Alexandra Villar Montes de Oca, egresadas, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificados con DNI 71073113 y 72222737 respectivamente, así como Omar Arturo Cutimbo Ticona con DNI 43536748; declaramos en calidad de autores y asesor que:

1. Somos los autores de la tesis titulada: *Evaluación Superficial de la carpeta asfáltica utilizando fotogrametría con RPAS y el Rugosímetro de Merlín en la avenida Celestino Vargas tramo Óvalo de Pocollay – avenida Vilauta, Tacna 2025*, la cual presentamos para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil.
2. La tesis es completamente original y no ha sido objeto de plagio, total ni parcialmente, habiéndose respetado rigurosamente las normas de citación y referencias para todas las fuentes consultadas.
3. Los datos presentados en los resultados son auténticos y no han sido objeto de manipulación, duplicación ni copia.

En virtud de lo expuesto, asumimos frente a *La Universidad* toda responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la *tesis*, así como por los derechos asociados a la obra.

En consecuencia, nos comprometemos ante *La Universidad* y terceros a asumir cualquier perjuicio que pueda surgir como resultado del incumplimiento de lo aquí declarado, o que pudiera ser atribuido al contenido de la tesis, incluyendo cualquier obligación económica que debiera ser satisfecha a favor de terceros debido a acciones legales, reclamos o disputas resultantes del incumplimiento de esta declaración.

En caso de descubrirse fraude, piratería, plagio, falsificación o la existencia de una publicación previa de la obra, aceptamos todas las consecuencias y sanciones que puedan derivarse de nuestras acciones, acatando plenamente la normatividad vigente.

Tacna, 13 de diciembre de 2025



Thais del Rosario Paria Baluarte  
DNI: 71073113



Maria Alexandra Villar Montes de Oca  
DNI: 72222737



Omar Arturo Cutimbo Ticona  
DNI: 43536748

## DEDICATORIA

A Dios porque sin él no estaría hoy aquí, a mis padres Geovanna Baluarte y Saúl Paria por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este.

Thais del Rosario Paria Baluarte

A mi querida madre Fanny Montes de Oca, por ser mi guía, mi fuerza y mi inspiración en cada etapa de mi vida, este logro es tan suyo como mío, reflejo de su amor incondicional, su sacrificio y su ejemplo de perseverancia. Todo lo que soy se lo debo a ella, quien con su apoyo y fe constante me enseñó a nunca rendirme.

Maria Alexandra Villar Montes de Oca

## **AGRADECIMIENTO**

Le doy gracias a Dios por cada de aprendizaje y por los logros que están por venir en mi vida.

A mi familia por ser mi apoyo incondicional en todo este tiempo y a mis hijos que son mi motivo de vida para salir adelante.

Thais del Rosario Paria Baluarte

En primer lugar, agradecer a Dios por brindarme sabiduría y acompañarme en cada una de mis decisiones a lo largo de este camino.

A mi familia, por acompañarme en cada momento y darme fuerzas cuando más lo necesitaba, por nunca dudar de mí y siempre alentarme a ser mejor cada día, son mi motivación más grande y mi inspiración para nunca rendirme.

Maria Alexandra Villar Montes de Oca

## ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE JURADOS.....	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	3
1.1. Descripción del problema .....	3
1.2. Formulación del problema .....	5
1.2.1. Problema general .....	5
1.2.2. Problemas específicos .....	5
1.3. Justificación e Importancia .....	5
1.3.1. Social .....	6
1.3.2. Económica.....	6
1.3.3. Ambiental .....	6
1.4. Objetivos .....	7
1.4.1. Objetivo General .....	7
1.4.2. Objetivos Específicos .....	7
1.5. Hipótesis .....	7
1.5.1. Hipótesis General.....	7
1.5.2. Hipótesis Especificas.....	8
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	9
2.1. Antecedentes de la investigación .....	9
2.1.2. A nivel internacional .....	9
2.1.3. A nivel nacional .....	10
2.1.4. A nivel local .....	11
2.2. Bases teóricas.....	12
2.2.1. Pavimento .....	12
2.2.2. Pavimento flexible .....	13
2.2.3. Rugosidad superficial del pavimento .....	14
2.2.4. Índice de rugosidad internacional (IRI) .....	14

2.2.5. Escalas y características del índice de rugosidad internacional .....	15
2.2.6. Métodos para la medición de la rugosidad .....	16
2.2.7. Metodología del Rugosímetro MERLIN .....	18
2.2.8. Sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) .....	23
2.2.9. Aplicaciones VANT utilizadas en la infraestructura vial .....	24
2.2.10. Normativa sobre el uso de los VANT .....	24
2.2.11. PROVAL.....	25
2.3. Definición de términos .....	26
2.3.1. Fotogrametría.....	26
2.3.2. Índice de Rugosidad Internacional (IRI).....	26
2.3.3. Nivel de Rugosidad .....	26
2.3.4. Rugosímetro de Merlín .....	26
2.3.5. Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS).....	27
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO .....	28
3.1. Diseño de la investigación .....	28
3.2. Acciones y actividades .....	28
3.3. Materiales y/o instrumentos.....	28
3.4. Población y/o muestra de estudio.....	29
3.4.1. Población .....	29
3.4.2. Muestra .....	29
3.5. Operacionalización de variables.....	29
3.6. Procesamiento y análisis de datos .....	30
3.6.1. Procedimiento de ensayo fotogrametría con RPAS.....	31
3.6.2. Procedimiento para el ensayo del rugosímetro de Merlín.....	35
CAPÍTULO IV: RESULTADOS .....	40
4.1. Valor del Índice de Rugosidad Internacional utilizando fotogrametría con RPAS .....	44
0	
4.2. Valor del Índice de Rugosidad Internacional a través del Rugosímetro de Merlín .....	43
4.3. Resumen de resultados del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) .....	45
4.3.1. Resumen de los resultados obtenidos mediante el rugosímetro MERLIN .....	45
4.3.2. Resumen de los resultados mediante fotogrametría RPAS utilizando el programa PROVAL .....	46
4.4. Correlación entre los valores del IRI.....	46
I. CAPÍTULO V: DISCUSIÓN .....	48
5.1. Análisis del valor IRI obtenido mediante el rugosímetro Merlín.....	48

5.2. Análisis del valor IRI obtenido mediante fotogrametría con RPAS.....	48
5.3. Análisis de la correlación entre los valores del IRI .....	49
II. CONCLUSIONES.....	52
III. RECOMENDACIONES .....	54
IV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55
ANEXOS.....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores del Índice de Rugosidad Internacional .....	15
Tabla 2. Escala de Clasificación del IRI .....	16
Tabla 3. Equipos utilizados para la medición de la rugosidad.....	18
Tabla 4. Operacionalización de variables de investigación.....	30
Tabla 5. Valores IRI obtenidos con el programa ProVAL: Carril derecho-derecho.....	41
Tabla 6. Determinación de Rugosidad - Progresiva 0+000.00 - 0+400.00.....	43
Tabla 7. Determinación de la Rugosidad - Progresiva 0+400.00 - 0+800.00 .....	44
Tabla 8. Valores del IRI obtenido con el rugosímetro MERLIN - Carril Derecho .....	45
Tabla 9. IRI promedio carril derecho .....	45
Tabla 10. Resultados obtenidos con el programa ProVAL.....	46
Tabla 11. Correlación de los datos obtenidos mediante el rugosímetro de Merlín y el programa ProVAL.....	47
Tabla 12. Resultado del IRI obtenido con el rugosímetro MERLIN .....	48
Tabla 13. Resultado del IRI obtenido con el programa PROVAL.....	48
Tabla 14. Correlación entre los valores del IRI .....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vía a intervenir, Avenida Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay – Avenida Vilauta .....	4
Figura 2. Medición de las desviaciones de la superficie del pavimento respecto a la cuerda promedio .....	17
Figura 3. Rugosímetro de Merlín .....	19
Figura 4. Escala para determinar la dispersión de las desviaciones de la superficie del pavimento respecto al nivel de referencia o cuerda promedio.....	20
Figura 5. Formato de recolección de datos de campo .....	21
Figura 6. Histograma de frecuencias 200 desviaciones .....	22
Figura 7. Sistema de aeronave pilotada a distancia – MODELO DJI Air 3S .....	24
Figura 8. Superposición de imágenes en el programa Agisoft Metashape Professional .....	31
Figura 9. Identificación de los puntos de referencia en el programa Agisoft Metashape Professional.....	32
Figura 10. Corrección de error en cada uno de los puntos de referencia.....	32
Figura 11. Fotogrametría de la zona de estudio .....	33
Figura 12. Modelo Digital de Elevaciones (MDE).....	33
Figura 13. Curvas de nivel de la zona de estudio .....	34
Figura 14. Perfiles longitudinales de la zona de estudio utilizando el programa Civil 3D .....	35
Figura 15. Equipo Rugosímetro de Merlín en campo.....	36
Figura 16. Datos de campo - progresiva 0+0.00 a 0+400.00 .....	37
Figura 17. Distribución de Frecuencias - Tramo 1 .....	38
Figura 18. Distribución de Frecuencias - Tramo .....	38

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de la carpeta asfáltica en la avenida Celestino Vargas, tramo Óvalo de Pocollay – Avenida Vilauta, en la ciudad de Tacna, utilizando dos metodologías: la fotogrametría mediante un Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente (RPAS) y el rugosímetro MERLÍN. Se desarrolló un estudio de tipo aplicado y diseño descriptivo, con una muestra correspondiente al carril derecho del tramo de 2.4 km de longitud. La metodología contempló el levantamiento de datos topográficos con dron DJI Air 3S y la medición directa con el rugosímetro MERLÍN, procesando los resultados con el software ProVAL para la determinación del IRI. Los valores obtenidos evidenciaron una condición heterogénea del pavimento, con tramos en buen estado ( $IRI < 1.5$  m/km) y otros con deterioro severo ( $IRI > 4.5$  m/km). En promedio, el carril derecho presentó un IRI de 3.61 m/km, clasificándose como mala según los estándares internacionales. Los resultados demostraron que el rugosímetro de Merlín constituye una alternativa precisa, económica y segura frente a los métodos convencionales, representando una herramienta eficaz para la gestión y mantenimiento de pavimentos urbanos mientras que el uso de la fotogrametría mediante RPAS depende de las condiciones ambientales, geográficas y estructurales de la zona, debido a que no se puede realizar un estudio a detalle por la presencia de vegetación, edificios de altura representativa y conexiones eléctricas de alumbrado público.

**Palabras clave:** Rugosidad del pavimento; Índice de Rugosidad Internacional; RPAS; Rugosímetro de Merlín; ProVAL.

## ABSTRACT

The present research aimed to determine the International Roughness Index (IRI) of the asphalt pavement along Celestino Vargas Avenue, between the Pocollay roundabout and Vilauta Avenue, in the city of Tacna, using two methodologies: photogrammetry through a Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) and the MERLIN roughness meter. The study was applied in nature and descriptive in design, analyzing the right lane of a 2.4 km section. The methodology involved topographic data acquisition with a DJI Air 3S drone and direct measurement using the MERLIN device, with the results processed through ProVAL software to determine the IRI. The obtained values revealed a heterogeneous pavement condition, with sections in good condition ( $IRI < 1.5$  m/km) and others showing severe deterioration ( $IRI > 4.5$  m/km). On average, the right lane presented an IRI of 3.61 m/km, classified as poor according to international standards. The results demonstrated that the MERLIN roughness meter is a precise, economical, and safe alternative to conventional methods, representing an effective tool for the management and maintenance of urban pavements. Meanwhile, the application of photogrammetry using RPAS depends on environmental, geographic, and structural conditions of the area, since detailed studies cannot be conducted in zones with vegetation, high-rise buildings, or overhead power lines.

**Keywords:** International Roughness Index; RPAS; Merlin Roughness Meter; Pavement Evaluation; ProVAL.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la infraestructura vial constituye un elemento esencial para el desarrollo económico y social de las ciudades, al facilitar el transporte de personas, bienes y servicios. En ese contexto, es una prioridad para los gobiernos locales y regionales, realizar una evaluación constante de las vías urbanas de su jurisdicción, ya que permiten garantizar condiciones adecuadas de transitabilidad, seguridad y confort para los usuarios. La gestión eficiente de los pavimentos requiere de métodos técnicos precisos que permitan diagnosticar su estado funcional y estructural, a fin de programar intervenciones oportunas y optimizar los recursos destinados a la conservación vial.

La rugosidad superficial es uno de los parámetros más importantes para evaluar el estado funcional de los pavimentos, pues se relaciona directamente con la comodidad del conductor, el consumo de combustible, el desgaste vehicular y la seguridad del tránsito. El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) es el indicador más utilizado a nivel mundial para cuantificar las irregularidades longitudinales de la superficie de rodadura, siendo adoptado por diversas entidades, como el Banco Mundial y la Federal Highway Administration (FHWA), como referencia estándar para la gestión del mantenimiento vial.

Tradicionalmente, la medición del IRI se ha realizado mediante equipos especializados como el Rugosímetro de Merlín, que proporciona resultados confiables a bajo costo y con una metodología sencilla de aplicación. Sin embargo, el avance de la tecnología ha permitido la incorporación de herramientas innovadoras como la fotogrametría aérea mediante Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS), comúnmente conocidos como drones. Estas tecnologías permiten la obtención de imágenes aéreas de alta resolución y su procesamiento a través de software especializados, posibilitando la generación de modelos digitales de superficie y perfiles longitudinales de alta precisión.

El presente estudio tiene como propósito evaluar la condición superficial de la Avenida Celestino Vargas, en el tramo comprendido entre el Óvalo de Pocollay y la Avenida Vilauta, en la ciudad de Tacna, mediante la comparación de dos métodos de medición del IRI: la fotogrametría con RPAS y el rugosímetro MERLÍN.

La investigación es de tipo aplicada y de diseño descriptivo, ya que busca analizar el comportamiento del pavimento bajo condiciones reales, empleando herramientas tecnológicas accesibles y confiables. Asimismo, pretende determinar la

diferencia entre ambos métodos y establecer la viabilidad del uso de RPAS como alternativa complementaria a los sistemas convencionales de auscultación vial. Los resultados obtenidos permitirán aportar información técnica relevante para la gestión del mantenimiento urbano en Tacna, contribuyendo al desarrollo de estrategias sostenibles que garanticen una infraestructura vial segura, eficiente y duradera.

La estructura de la investigación esta dividida en cinco capítulos principales:

- Capítulo I: Comprende la introducción, se expone el problema, la justificación e importancia, objetivos e hipótesis de la investigación.
- Capítulo II: Comprende el marco teórico, donde se explican las variables de estudio, antecedentes de investigaciones previas y la definición de los conceptos.
- Capítulo III: Es la descripción del marco metodológico, describiendo el diseño de la investigación, técnicas e instrumentos utilizados, la selección de la muestra y los procedimientos para la recolección y análisis de los datos.
- Capítulo IV: Se presentan los resultados obtenidos, mediante las metodologías de la Fotogrametría con RPAS y el rugosímetro de MERLIN para hallar el índice de rugosidad internacional.
- Capítulo V: Se realiza un análisis de los resultados obtenidos, conclusiones y se formulan recomendaciones para las futuras intervenciones y estudios.

## CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. Descripción del problema

En la ciudad de Tacna, la Avenida Celestino Vargas constituye una vía colectora de significativa importancia dentro del sistema vial urbano, al conectar el Óvalo de Pocollay con la Avenida Vilauta, facilitando el tránsito de vehículos livianos, pesados y de transporte público en el distrito de Pocollay. De acuerdo con el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018), las vías colectoras cumplen la función de articular el tránsito entre vías locales y arteriales, por lo que deben garantizar condiciones adecuadas de seguridad, fluidez y confort para los usuarios.

Sin embargo, durante más de una década, la vía no ha recibido mantenimiento periódico ni correctivo, ni ha sido incorporada en programas de rehabilitación o conservación. La conservación vial es un componente fundamental para preservar el nivel de servicio y prolongar la vida útil del pavimento (Banco Mundial, 2014). La ausencia de intervenciones oportunas acelera los procesos de deterioro estructural y funcional, incrementando los costos futuros de rehabilitación.

La Avenida Celestino Vargas forma parte de la Red Vial Nacional PE-040, bajo la administración de Provías Nacional, entidad adscrita al Ministerio de Transportes y Comunicaciones, responsable de la gestión, mantenimiento y conservación de la infraestructura vial nacional (MTC, 2018). No obstante, la falta de intervenciones preventivas ha generado un deterioro progresivo de la carpeta asfáltica.

Actualmente se observan patologías superficiales como fisuración longitudinal y transversal, baches, deformaciones plásticas, desprendimiento de agregados y pérdida de textura. Según el Instituto del Asfalto (2010), estas fallas superficiales inciden directamente en el desempeño funcional del pavimento, afectando la seguridad y el confort de circulación.

Uno de los principales indicadores para evaluar la condición funcional del pavimento es el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), el cual mide la regularidad superficial y el nivel de confort de marcha (Sayers & Karamihas, 1998). Valores elevados de IRI están asociados con mayor incomodidad para los usuarios y aumento en los costos de operación vehicular (Banco Mundial, 2014).

Tradicionalmente, la medición del IRI se ha realizado mediante equipos especializados que requieren mayor inversión y logística operativa. En este contexto, el uso de tecnologías emergentes como la fotogrametría mediante Sistemas de Aeronaves

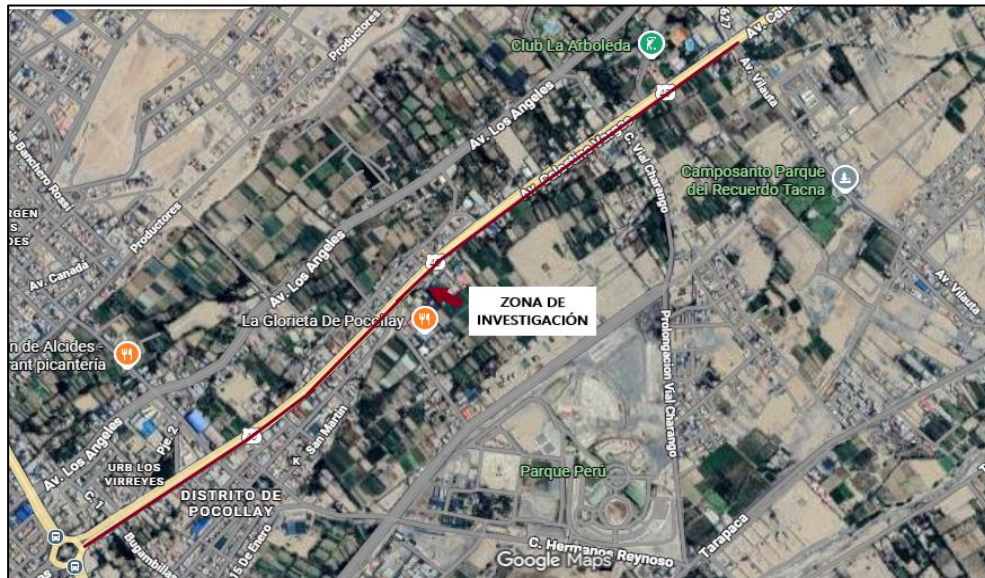
Pilotadas Remotamente (RPAS) representa una alternativa eficiente para el levantamiento de información superficial de alta resolución (Colomina & Molina, 2014). Estas tecnologías permiten obtener modelos digitales detallados del pavimento, facilitando la identificación de deterioros con mayor cobertura y menor tiempo de ejecución.

De manera complementaria, el rugosímetro de Merlín constituye un instrumento práctico y de bajo costo para la estimación del IRI en campo, especialmente en vías urbanas (Sayers & Karamihas, 1998). Sin embargo, en la Avenida Celestino Vargas no se han desarrollado estudios que integren ambas metodologías para evaluar comparativamente la condición superficial del pavimento, lo que limita la generación de evidencia técnica para la toma de decisiones.

Por lo expuesto, la presente investigación se orienta a evaluar el estado superficial de la carpeta asfáltica del tramo comprendido entre el Óvalo Pocollay y la avenida Vilauta, tal como se visualiza en la Figura 1, mediante fotogrametría con RPAS y mediciones con el rugosímetro de Merlín, con el propósito de generar información técnica confiable que respalde futuras intervenciones y contribuya a la mejora de la transitabilidad y seguridad vial.

### Figura 1

*Vía a intervenir, Avenida Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay – Avenida Vilauta*



*Nota.* En la figura se muestra la zona de estudio.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

¿Cuál es el índice de rugosidad internacional utilizando fotogrametría con RPAS y el rugosímetro de Merlín en la avenida Celestino Vargas tramo Óvalo de Pocollay – avenida Vilauta, Tacna 2025?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- a. ¿Cuál es el índice de rugosidad internacional del pavimento utilizando la fotogrametría con RPAS en la avenida Celestino Vargas tramo Óvalo de Pocollay – avenida Vilauta, Tacna 2025?
- b. ¿Cuál es el índice de rugosidad internacional del pavimento utilizando el rugosímetro de Merlín en la Avenida Celestino Vargas tramo Óvalo de Pocollay – Avenida Vilauta, Tacna 2025?
- c. ¿Cuál es la diferencia o correlación entre los resultados del índice de rugosidad internacional utilizando la fotogrametría con RPAS y el rugosímetro de Merlín en la avenida Celestino Vargas tramo Óvalo de Pocollay – avenida Vilauta, Tacna 2025?

## **1.3. Justificación e Importancia**

La evaluación oportuna de la infraestructura vial es esencial para garantizar condiciones adecuadas de transitabilidad y seguridad para los conductores. En ese sentido, el análisis de la carpeta asfáltica en pavimentos flexibles permite detectar el grado de deterioro en la avenida Celestino Vargas, en el tramo comprendido entre el Óvalo de Pocollay y la avenida Vilauta, una de las vías principales de la ciudad de Tacna, que presenta un alto flujo vehicular diariamente.

La presente investigación se justifica en la necesidad de evaluar de manera técnica el estado superficial de dicha vía, mediante la aplicación de dos metodologías complementarias: la fotogrametría aérea a través del uso de un Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente (RPAS) y el rugosímetro de Merlín, instrumento homologado internacionalmente para la determinación del índice de rugosidad internacional (IRI). Esta comparación permitirá analizar la eficacia, precisión y viabilidad de la tecnología RPAS como una alternativa innovadora y menos invasiva frente a los métodos convencionales de auscultación vial.

### **1.3.1. Social**

Desde el enfoque social, el adecuado estado de la infraestructura vial incide directamente en la seguridad y calidad de vida de la población. Un pavimento deteriorado incrementa el riesgo de accidentes de tránsito, afecta la movilidad urbana y genera incomodidad en los usuarios (Banco Mundial, 2014). En ese sentido, la evaluación técnica de la Avenida Celestino Vargas permitirá identificar oportunamente fallas superficiales que comprometan la seguridad vial, contribuyendo a la reducción de riesgos y a la mejora del nivel de servicio.

Además, una infraestructura vial en condiciones óptimas favorece la accesibilidad a servicios básicos, centros educativos, establecimientos de salud y actividades comerciales, fortaleciendo la integración urbana y el bienestar social. Por tanto, el estudio adquiere relevancia al aportar información técnica que respalde decisiones orientadas a garantizar una movilidad segura y eficiente para la población de Tacna.

### **1.3.2. Económica**

En el ámbito económico, la conservación preventiva de pavimentos resulta significativamente más rentable que las intervenciones correctivas o reconstrucciones totales (Banco Mundial, 2014). El deterioro progresivo de la carpeta asfáltica incrementa los costos de operación vehicular, tales como consumo de combustible, desgaste de neumáticos y mantenimiento mecánico (Sayers & Karamihas, 1998).

La aplicación de metodologías modernas como los RPAS permite optimizar tiempos y recursos en la recolección de datos, reduciendo costos asociados al trabajo de campo tradicional y minimizando la interferencia con el tránsito vehicular (Colomina & Molina, 2014). En consecuencia, la investigación no solo contribuye a mejorar la eficiencia en la gestión del mantenimiento vial, sino que también promueve una asignación más racional de los recursos públicos destinados a infraestructura.

### **1.3.3. Ambiental**

Desde la perspectiva ambiental, el mantenimiento oportuno de pavimentos contribuye a disminuir emisiones contaminantes asociadas al tránsito vehicular en superficies irregulares, ya que un mayor nivel de rugosidad incrementa el consumo de combustible y, por ende, las emisiones de gases de efecto invernadero (Banco Mundial, 2014).

Asimismo, el empleo de tecnologías RPAS reduce la necesidad de desplazamientos prolongados de equipos pesados para la auscultación vial, disminuyendo el impacto ambiental generado por las actividades de evaluación convencional. En este sentido, la incorporación de herramientas tecnológicas innovadoras favorece prácticas más sostenibles en la gestión de infraestructura urbana.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Determinar el índice de rugosidad internacional utilizando fotogrametría con RPAS y el rugosímetro de Merlín en la avenida Celestino Vargas tramo óvalo de Pocollay – avenida Vilauta, Tacna 2025.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- a. Determinar el índice de rugosidad internacional del pavimento utilizando la fotogrametría con RPAS en la avenida Celestino Vargas tramo óvalo de Pocollay – avenida Vilauta
- b. Determinar el índice de rugosidad internacional del pavimento mediante el uso del rugosímetro Merlín en la avenida Celestino Vargas tramo óvalo de Pocollay – avenida Vilauta
- c. Determinar la correlación de los resultados del índice de rugosidad internacional obtenidos mediante a fotogrametría con RPAS y el rugosímetro Merlín en la avenida Celestino Vargas tramo óvalo de Pocollay – avenida Vilauta

## **1.5. Hipótesis**

### **1.5.1. Hipótesis General**

La aplicación de la fotogrametría con RPAS y el rugosímetro de Merlín permiten obtener resultados validos del índice de rugosidad internacional del pavimento en la avenida Celestino Vargas tramo óvalo de Pocollay – avenida Vilauta.

### **1.5.2. Hipótesis Específicas**

- a. La fotogrametría con RPAS permite obtener valores del índice de rugosidad internacional del pavimento en la avenida Celestino Vargas tramo ovalo de Pocollay – avenida Vilauta
- b. El Rugosímetro MERLÍN determina datos representativos del índice de rugosidad internacional del pavimento en la avenida Celestino Vargas tramo ovalo de Pocollay – avenida Vilauta
- c. Existe correlación entre los valores obtenidos mediante la fotogrametría con RPAS y el Rugosímetro MERLÍN en la avenida Celestino Vargas tramo ovalo de Pocollay – avenida Vilauta.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de la investigación

#### 2.1.2. A nivel internacional

Reyes (2020) desarrolló un estudio denominado “Determinación del Índice de Rugosidad Internacional en la Av. La Prensa, usando aparatos inteligentes y el Rugosímetro MERLIN”, orientado a evaluar y comparar los valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) obtenidos mediante diferentes herramientas de medición. En la investigación se emplearon el rugosímetro Merlín, las aplicaciones móviles TotalPave IRI e IRI Calculator, así como el software vial ProVal. Los resultados evidenciaron variaciones entre los métodos, registrándose un IRI de 2,00 m/km con el MERLIN, 3,30 m/km con TotalPave IRI, 0,783 m/km con IRI Calculator y 3,82 m/km al utilizar ProVal.

Martínez y Narváez (2023), en su tesis titulada: “Potencial del uso de equipos VANT convencionales para identificar el ciclo de vida útil de vías mediante el método IRI” nos dice que el potencial de los equipos VANT en la identificación del ciclo de vida útil se sitúa en un 80% en comparación con la metodología tradicional, evidenciando que esta técnica es viable para determinar dicho ciclo. En lo que respecta al tiempo dedicado al levantamiento y procesamiento de datos, los dispositivos VANT presentan una ventaja significativa ya que el tiempo estimado por kilómetro de 3.25 horas, además de obtener el valor IRI se adquieren datos adicionales como perfiles longitudinales, ortomosaicos, opciones de registro y medición de fallas, las mismas que son aprovechadas en parámetros como es el PCI, a diferencia de que con el equipo Merlín se requieren 3 horas por cada kilómetro y solo se obtiene el valor del IRI, siendo así efectivo el uso de los VANT para poder calcular el índice de rugosidad en los pavimentos.

Wang, Li, Ouyang y Zhang (2023) desarrollaron una investigación orientada a validar la integración de vehículos aéreos no tripulados (UAV) con técnicas fotogramétricas, como alternativa a los métodos convencionales de auscultación vial para la evaluación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI). El estudio se centró en analizar la precisión del Modelo Digital de Superficie (DSM) generado a partir de imágenes aéreas de alta resolución capturadas mediante UAV, contrastando los perfiles longitudinales obtenidos con los registrados por un perfilómetro láser de alta velocidad, considerado equipo de referencia en la industria. Los resultados evidenciaron una elevada correlación entre los valores de IRI derivados de la fotogrametría y los del

perfilómetro, alcanzándose un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.92, así como un margen de error inferior al 5%, siempre que la planificación de vuelo y el procesamiento de imágenes cumplieran parámetros óptimos. Asimismo, se evidenció una reducción del 75% en el tiempo de levantamiento de datos respecto de los métodos tradicionales, demostrando la eficiencia operativa de los sistemas RPAS.

### **2.1.3. A nivel nacional**

Sachun (2016), en su tesis titulada: “Estudio del índice de rugosidad internacional de la Panamericana Norte – Zona Trujillo, para su mantenimiento”, en su tesis titulada Estudio del índice de rugosidad internacional de la Panamericana Norte – Zona Trujillo, para su mantenimiento, desarrolló una investigación orientada a determinar la rugosidad del pavimento mediante una metodología que compara las desviaciones de la superficie existente respecto a una superficie plana ideal. Para ello, empleó el rugosímetro MERLIN como instrumento principal para la recolección de datos en campo, siguiendo las normas técnicas establecidas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Su estudio permitió obtener mediciones precisas del estado funcional del pavimento y constituyó una base técnica para la toma de decisiones en mantenimiento vial.

Quispe (2024), en su tesis titulada “Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en pavimentos flexibles mediante el uso de dron a diferentes alturas de vuelo y el rugosímetro de Merlín en la vía MO-590-Moquegua”, desarrolló un estudio experimental en un tramo de 400 metros con el objetivo de comparar y correlacionar los valores de IRI obtenidos mediante dos métodos de medición: el rugosímetro Merlín y un dron Phantom 4 Pro. Los resultados mostraron que, a una altura de vuelo de 20 metros, el IRI promedio para el carril derecho osciló entre 8.39 y 10.71 m/km, mientras que para el carril izquierdo se registraron valores entre 6.50 y 7.93 m/km. A una altura de 10 metros, los valores disminuyeron significativamente, obteniéndose promedios de 3.93 a 4.33 m/km para el carril derecho y de 3.09 a 3.33 m/km para el carril izquierdo. En comparación, las mediciones con el rugosímetro Merlín arrojaron valores menores: entre 1.13 y 1.40 m/km para el carril derecho y entre 0.90 y 1.10 m/km para el carril izquierdo. El análisis concluyó que los valores captados a 10 metros de altura presentaron la mayor aproximación a los obtenidos con Merlín, con porcentajes de similitud de 35.62% y 35.60%, respectivamente.

Chambilla y Ramos (2021), en su tesis titulada “Evaluación de pavimento flexible mediante el método del rugosímetro de Merlín y el aplicativo IRICalcFree en la avenida Simón Bolívar, Puno”, evaluaron el índice de rugosidad internacional (IRI) del pavimento

flexible empleando dos metodologías de medición. Con el rugosímetro Merlín obtuvieron en el primer carril un IRI de 3.28, clasificado como regular, mientras que en el segundo carril registraron un valor promedio de 3.51, también clasificado como regular. Mediante el aplicativo IRI-Calc-Free, los valores obtenidos fueron de 3.85 para el primer carril, igualmente clasificado como regular, y de 4.21 para el segundo carril, considerado malo. El análisis comparativo evidenció una similitud promedio del 83.16%, lo cual permitió concluir que ambos métodos presentan resultados cercanos y son herramientas confiables para la estimación del IRI en pavimentos flexibles.

#### **2.1.4. A nivel local**

Medina y Farro (2017) desarrollaron el estudio titulado “Evaluación superficial y de rugosidad del pavimento en la Av. Circunvalación Oeste, tramo Óvalo Transportes – Óvalo Cuzco, distrito de Tacna”, con el propósito de analizar la correspondencia entre los resultados obtenidos mediante dos métodos de evaluación del pavimento. Para ello, aplicaron el Rugosímetro MERLIN para determinar el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el método PCI (Pavement Condition Index) para valorar el estado superficial. El análisis permitió comparar el nivel de regularidad de ambos carriles y evidenciar las diferencias en los valores registrados por cada técnica. Cabe señalar que el equipo MERLIN es ampliamente utilizado en la región de Tacna y, de acuerdo con el Banco Mundial, se considera uno de los instrumentos más precisos y recomendados para la calibración de otros dispositivos de medición.

Choque y Pilco (2023), en su tesis titulada “Análisis comparativo entre aplicación de rugosímetro Merlín y aplicativo celular para el cálculo del índice de rugosidad internacional en la Avenida Collpa, tramo Óvalo Cuzco – Avenida Educadores, Tacna – 2023”, realizaron una comparación entre dos métodos de medición: la aplicación móvil Roadroid y el rugosímetro Merlín. Con el uso del rugosímetro Merlín obtuvieron un índice de rugosidad internacional ponderado de 6.36 m/km, clasificando el estado del pavimento como “malo”. Por otro lado, mediante la aplicación Roadroid se obtuvo un valor ponderado de 6.15 m/km para el IRI. La similitud entre ambos resultados permitió concluir que ambos métodos son efectivos y confiables para la evaluación del estado superficial del pavimento, constituyendo herramientas útiles para futuros proyectos de mantenimiento y mejora vial.

Acero y Yanapa (2025), en su trabajo de investigación titulado “Análisis comparativo del índice de rugosidad internacional del pavimento mediante imágenes de dron y el Abakal IRI en la carretera TA-635, progresiva km 0+000 a km 3+000, Tacna

2024”, analizaron el IRI utilizando dos métodos de evaluación: imágenes captadas mediante dron y el aplicativo ABAKAL IRI. Los resultados mostraron una correlación positiva entre ambos procedimientos, obteniéndose valores promedio de 5.14 m/km para el método fotogramétrico y 5.62 m/km para el aplicativo. Si bien se evidenciaron diferencias en la precisión de las mediciones, los autores concluyeron que ambos métodos son complementarios y permiten una evaluación eficiente y accesible del estado del pavimento. Finalmente, reportaron un grado de similitud del 91.08% entre las dos metodologías, lo que respalda su aplicabilidad en estudios de evaluación vial.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Pavimento**

Un pavimento se define como una estructura compuesta por diversas capas dispuestas sobre la subrasante, cuya finalidad es absorber y distribuir los esfuerzos generados por el tránsito vehicular, además de proporcionar condiciones adecuadas de seguridad y confort durante la circulación (Manual de Carreteras, 2013).

Generalmente, el sistema estructural del pavimento está constituido por las siguientes capas:

- a. Capa de rodadura: Corresponde al estrato superior del pavimento, diseñado para recibir directamente las cargas del tráfico. Puede estar conformada por materiales bituminosos (pavimento flexible), concreto de cemento Portland (pavimento rígido) o adoquines.
- b. Base: Se ubica inmediatamente debajo de la capa de rodadura y tiene la función principal de sostenerla y distribuir las cargas inducidas por los vehículos hacia las capas inferiores. Usualmente está conformada por material granular con propiedades drenantes ( $\text{CBR} \geq 80\%$ ) o tratada con ligantes como asfalto, cal o cemento.
- c. Subbase: Constituye el soporte de la base y de la carpeta de rodadura. Cumple un papel importante en el drenaje y en el control de la capilaridad del agua. Su inclusión depende del tipo y diseño del pavimento, pudiendo omitirse en algunos casos. Está formada por material granular ( $\text{CBR} \geq 40\%$ ) o tratada con aditivos estabilizadores como asfalto, cal o cemento.

### **2.2.2. Pavimento flexible**

El pavimento flexible se caracteriza por estar conformado por una serie de capas granulares (subbase y base), sobre las cuales se dispone una capa de rodadura elaborada con materiales bituminosos que actúan como agentes aglutinantes. Estos materiales pueden incluir mezclas de agregados pétreos y, en algunos casos, aditivos que mejoran su desempeño estructural y su durabilidad (Manual de Carreteras, 2013).

La capa superficial o de rodadura asfáltica puede presentarse en diversas formas, tales como mortero asfáltico, tratamiento superficial bicapa, micropavimento, macadam asfáltico, mezclas asfálticas en frío o mezclas asfálticas en caliente, dependiendo de las condiciones de diseño y las necesidades funcionales del pavimento.

#### **2.2.2.1. Pavimento Flexible Convencional (Mezcla Asfáltica en Caliente)**

Es el tipo más utilizado en vías urbanas y carreteras de alto tránsito. Está conformado por una carpeta asfáltica elaborada con mezcla asfáltica en caliente (HMA), base y subbase granular.

Según el Instituto del Asfalto (2010), las mezclas en caliente ofrecen mayor cohesión y desempeño estructural en comparación con mezclas en frío.

#### **2.2.2.2. Pavimento Flexible con Mezcla Asfáltica en Frío**

Se construye utilizando emulsiones asfálticas sin necesidad de calentar los agregados. Es común en trabajos de mantenimiento y vías de tránsito moderado.

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018) recomienda su uso en intervenciones de mantenimiento rutinario y periódico dentro de la red vial nacional y urbana.

#### **2.2.2.3. Pavimento Flexible Semiestructural**

Se emplea principalmente en vías de bajo tránsito. Puede estar conformado por tratamientos superficiales bituminosos (TSB) o monocapas asfálticas delgadas sobre base granular.

#### **2.2.2.4. Pavimento Flexible Reforzado**

Incluye elementos adicionales como geomallas, geotextiles o estabilización química de la base o subrasante para mejorar la capacidad portante.

Según Huang (2004), la incorporación de refuerzos mejora la distribución de esfuerzos y reduce el agrietamiento por fatiga.

#### **2.2.3. Rugosidad superficial del pavimento**

La rugosidad superficial del pavimento es una propiedad funcional que describe las irregularidades longitudinales presentes en la superficie de rodadura, las cuales inciden directamente en la comodidad del usuario, la seguridad del tránsito y el desempeño operacional de la vía. Uno de los principales indicadores para su medición es el índice de rugosidad internacional (IRI, por sus siglas en inglés), establecido como el parámetro estándar a nivel mundial para cuantificar la regularidad longitudinal de los pavimentos.

El IRI representa el promedio acumulado de las desviaciones verticales que experimenta un vehículo típico sobre una trayectoria determinada, expresado en metros por kilómetro (m/km). Valores bajos del IRI indican una superficie más uniforme y confortable, mientras que valores altos reflejan mayores niveles de deterioro y afectan la seguridad vial y la eficiencia del transporte (FHWA, 2006).

La evaluación de la rugosidad se puede realizar mediante métodos mecánicos y digitales. Uno de los métodos mecánicos más utilizados en zonas de difícil acceso o con recursos limitados es el rugosímetro de Merlín (Machine for Evaluating Roughness Using Low-cost Instrumentation), el cual permite obtener estimaciones del IRI a partir de mediciones manuales del perfil longitudinal de la vía (Sayers y Karamihias, 1998).

#### **2.2.4. Índice de rugosidad internacional (IRI)**

El Índice de rugosidad internacional (IRI) es un parámetro estandarizado a nivel mundial que se utiliza para cuantificar la irregularidad longitudinal de la superficie de los pavimentos. Su principal función es medir la comodidad del usuario al transitar por una vía y, por ende, se considera un indicador clave para la evaluación funcional del estado de los pavimentos (Sayers, Gillespie & Queiroz, 1986).

El IRI se expresa en metros por kilómetro (m/km) y se obtiene a partir del análisis del perfil longitudinal del pavimento, mediante el uso de dispositivos mecánicos o sistemas avanzados de captura y procesamiento de datos. Este índice simula el

comportamiento de una unidad vehicular estándar al recorrer una superficie determinada, registrando los desplazamientos verticales que se producen debido a las irregularidades del terreno (Sayers & Karamihas, 1998).

La Tabla 1 muestra que el valor del IRI puede clasificarse según estándares internacionales:

**Tabla 1**  
*Valores del Índice de Rugosidad Internacional*

Condición del Pavimento	IRI (m/km)
Muy buena	< 1,5
Buena	1,5 – 2,5
Regular	2,5 – 3,5
Mala	> 3,5

*Nota.* Tomado de (FHWA.2006).

En contextos urbanos y rurales, el IRI permite identificar tramos con condiciones deficientes, los cuales requieren mantenimiento o rehabilitación. Además, está correlacionado con los costos de operación vehicular, el desgaste de los vehículos, el consumo de combustible y la seguridad vial (MTC, 2014).

El IRI ha sido adoptado por numerosos países como parte de sus sistemas de gestión vial debido a su reproducibilidad, facilidad de interpretación y compatibilidad con diferentes métodos de medición, como el rugosímetro MERLIN, perfilómetros láser o sistemas basados en fotogrametría aérea (García-Palomares et al., 2021).

### **2.2.5. Escalas y características del índice de rugosidad internacional**

El índice de rugosidad internacional (IRI) es una medida cuantitativa de las irregularidades longitudinales de la superficie de un pavimento, expresada en metros por kilómetro (m/km). Su valor representa el desplazamiento acumulado de la suspensión de un vehículo tipo al transitar sobre una vía determinada, simulando las condiciones reales de circulación y el confort del usuario (Sayers, Gillespie & Queiroz, 1986).

El IRI permite clasificar los pavimentos en función de su nivel de comodidad y funcionalidad. Las escalas de referencia para interpretar sus valores han sido adoptadas por diversas agencias internacionales, como la Federal Highway Administration (FHWA), el Banco Mundial y organismos nacionales como el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (MTC.2013).

La escala de clasificación del índice de rugosidad internacional, se presenta en la Tabla 2, en la cual se indica la condición del pavimento de acuerdo al valor que se obtiene.

**Tabla 2**  
*Escala de Clasificación del IRI*

Condición del pavimento	IRI (m/km)	Descripción
Muy buena	< 1,5	Pavimento liso, sin irregularidades perceptibles
Buena	1,5 – 2,5	Superficie ligeramente irregular, confortable
Regular	2,5 – 3,5	Incomodidad perceptible, inicio de deterioro funcional
Mala	3,5 – 5,0	Alta rugosidad, afecta la seguridad y confort
Muy mala	5,0	Pavimento severamente deteriorado, requiere intervención

*Nota.* FHWA, 2006; MTC, 2014.

### 2.2.6. Métodos para la medición de la rugosidad

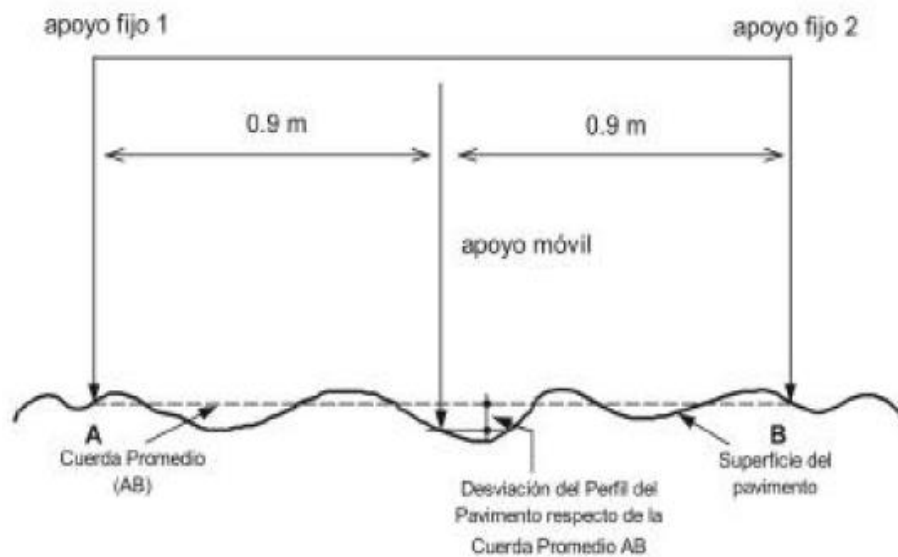
La evaluación de la rugosidad en un pavimento se fundamenta en el principio de analizar las variaciones o desviaciones de la superficie respecto a una línea de referencia

promedio. Dicho procedimiento permite cuantificar las irregularidades longitudinales del camino

En la Figura 2 se representa el funcionamiento del equipo MERLIN, el cual determina el desplazamiento vertical existente entre la superficie del pavimento y el punto medio de una línea imaginaria de longitud constante. Este desplazamiento corresponde a la diferencia o desviación con relación a la cuerda de referencia promedio, la cual se utiliza como parámetro base para estimar la rugosidad del pavimento.

### Figura 2

*Medición de las desviaciones de la superficie del pavimento respecto a la cuerda promedio*



*Nota.* Tomado del Manual del Usuario Merliner.

El cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) se basa en la aplicación de métodos matemáticos, estadísticos y computacionales que permiten cuantificar el grado de regularidad superficial de una vía. Para obtener resultados confiables, es necesario seguir rigurosamente los procedimientos establecidos en la metodología correspondiente.

El paso fundamental para determinar el valor del IRI consiste en medir las alturas o elevaciones del tramo de pavimento evaluado, información que refleja el estado actual del perfil longitudinal de la superficie. En este sentido, el IRI no depende de un único

método de cálculo, sino que su valor está directamente relacionado con las características reales del perfil del pavimento analizado (Badilla, 2011).

Los distintos equipos que se utilizan para medir la rugosidad del pavimento se presentan en la Tabla 3, en la cual se detalla la descripción de cada uno de ellos.

**Tabla 3**

*Equipos utilizados para la medición de la rugosidad*

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>
Levantamientos topográficos con mira y nivel	El levantamiento topográfico mediante el uso de mira y nivel constituye uno de los métodos más tradicionales para determinar la rugosidad de un perfil longitudinal. Este procedimiento requiere la participación de al menos dos operarios: uno encargado de realizar las lecturas con el instrumento de nivel y registrar las mediciones respecto a una cota de referencia, y otro responsable de desplazar la mira en intervalos regulares, generalmente cada 25 a 30 centímetros, a lo largo del tramo evaluado.
Face Dipstick	El equipo consta de un acelerómetro y una estructura con pequeños apoyos separados 30 cm. Asimismo, posee un mango que facilita realizar las mediciones y guiar al dipstick por el tramo que se quiere recorrer
Perfilómetro Inercial	Este equipo cuenta con sensores laser instalados en la parte frontal del vehículo y el pavimento. Las mediciones que realiza este instrumento son cada 2,5 cm y son realizadas mientras el vehículo se encuentra en movimiento con hasta 120 km/h.

*Nota.* En la Tabla podemos observar los distintos métodos que existen para la medición de la rugosidad en el pavimento.

### **2.2.7. Metodología del Rugosímetro MERLIN**

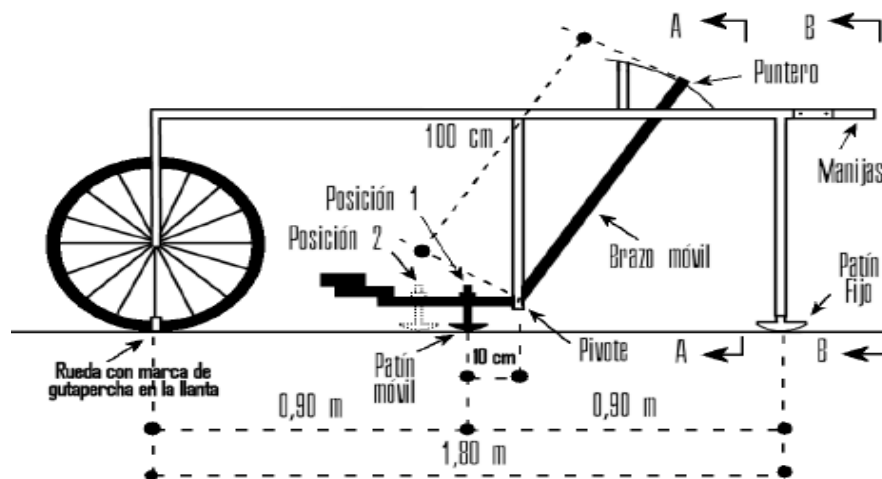
El Transport and Road Research Laboratory (TRRL) desarrolló el rugosímetro Machine for Evaluating Roughness (MERLIN), basado en el principio del perfilómetro estático para obtener un método de análisis de bajo costo, fácil de usar, simple y con resultados confiables. Este equipo pertenece a la Clase de precisión 3 definida por el Banco Mundial, que permite obtener el IRI a través de correlaciones matemáticas. El funcionamiento del equipo se basa en el concepto de utilizar la distribución de desviaciones de la superficie a partir de una cadena promedio imaginaria (Prosser-Contreras, 2020)

Es un dispositivo de diseño sencillo conformado por un marco con componentes verticales y horizontales. Su estructura incluye una rueda frontal que facilita el

desplazamiento y dos soportes traseros: uno que permite estabilizar el equipo durante las mediciones y otro que sirve de apoyo al momento de detenerlo, tal como se aprecia en la Figura 3.

El elemento horizontal cuenta con dos manijas en la parte posterior que permiten manipularlo y moverlo de manera similar a una carretilla (Del Águila Rodríguez, 1999)

**Figura 3**  
*Rugosímetro de Merlín*



*Nota.* En la figura observamos las partes del equipo del Rugosímetro de Merlín.

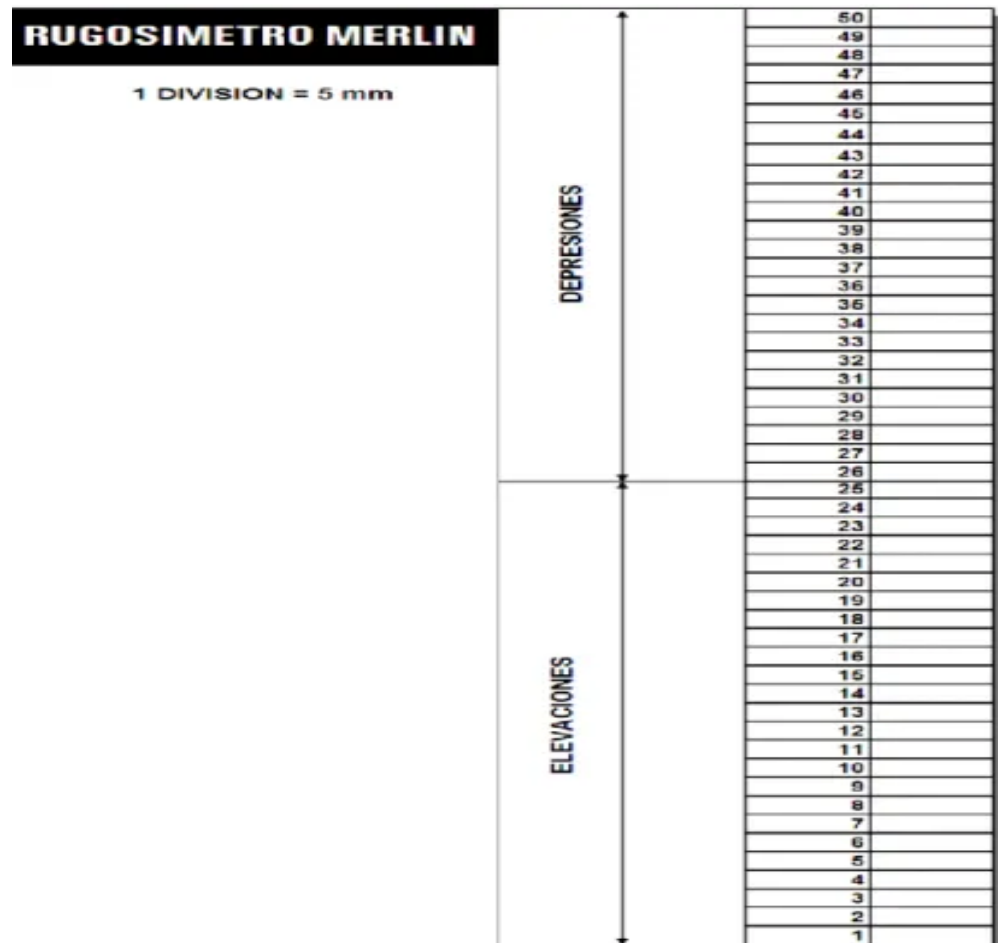
La longitud de la cuerda promedio utilizada en el método Merlín es de 1.80 metros, ya que este valor ofrece mejores resultados en las correlaciones de medición. El procedimiento consiste en registrar 200 desviaciones consecutivas respecto a dicha cuerda, manteniendo un intervalo constante entre cada punto a lo largo del tramo evaluado. A medida que la superficie presenta mayor irregularidad, también aumenta la variabilidad de los desplazamientos. Al representar los datos en un histograma de frecuencias, se puede analizar la dispersión de las desviaciones y relacionarla con una escala estándar de rugosidad. El parámetro que define esta dispersión es el rango de la muestra (D), obtenido tras eliminar el 10% de los valores extremos; dicho rango representa la rugosidad del pavimento expresada en unidades

En cuanto a su estructura, el dispositivo cuenta con un bastidor horizontal y una barra vertical central articulada a un brazo móvil. Este brazo finaliza en un patín ajustable que se adapta a las irregularidades del terreno, mientras que su extremo superior porta un indicador mecánico que marca las variaciones de nivel sobre una escala, permitiendo registrar las desviaciones del pavimento con gran exactitud.

La Figura 4 muestra el desplazamiento del puntero del rugosímetro, el cual se registra mediante una escala graduada compuesta por 50 divisiones de 5 mm cada una, fijada en el borde del tablero donde se desliza el indicador. Este sistema permite medir con precisión las variaciones verticales detectadas durante la evaluación del pavimento.

**Figura 4**

*Escala para determinar la dispersión de las desviaciones de la superficie del pavimento respecto al nivel de referencia o cuerda promedio*



*Nota.* En la figura se observa la escala para determinar la dispersión de desviaciones

**2.2.7.1. Modo de Uso**

Para realizar los ensayos con el equipo MERLIN se requiere la participación de dos operarios: uno encargado de manejar el instrumento y registrar las lecturas, y otro responsable de anotar los valores obtenidos. El tramo de evaluación debe tener una longitud aproximada de 400 metros, siguiendo preferentemente la huella exterior del carril de circulación.

Durante el ensayo se registran 200 mediciones consecutivas que reflejan las variaciones del pavimento respecto a la cuerda promedio. Estas desviaciones son captadas por el patín móvil del MERLIN, cuyo movimiento se traduce en lecturas a través del puntero que se desplaza sobre la escala graduada del tablero.

Las mediciones se realizan deteniendo el equipo a intervalos regulares, usualmente cada dos metros, distancia que coincide aproximadamente con el perímetro de la rueda del instrumento. En consecuencia, cada lectura se obtiene tras completar una rotación completa de la rueda durante el recorrido del equipo.

En cada medición, el equipo debe colocarse sobre tres puntos de apoyo estables, conformados por la rueda delantera y los soportes posteriores que garantizan su equilibrio durante la prueba. La posición del puntero determina la lectura correspondiente, con valores comprendidos entre 1 y 50, los cuales se consignan en un formato de registro de campo.

En la Figura 5, se observa el formato que se encuentra estructurado en una cuadrícula de 20 filas por 10 columnas, donde las lecturas se registran de manera secuencial, iniciando en la celda (1,1) y avanzando de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, según el orden de las observaciones realizadas (Del Águila Rodríguez, 1999).

**Figura 5**

*Formato de recolección de datos de campo*

ENSAYOS PARA MEDICION DE LA RUGOSIDAD CON MERLIN (HOJA DE CAMPO)									
PROYECTO :	_____				OPERADOR :	_____			
SECTOR :	_____				SUPERVISOR :	_____			
TRAMO :	_____				FECHA :	_____			
CARRIL :	_____								
ENSAYO N°	<input type="text"/>	KM	<input type="text"/>	+	<input type="text"/>	HORA	<input type="text"/>	:	<input type="text"/>
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
TIPO DE PAVIMENTO :									
AFIRMADO <input type="checkbox"/>									
BASE GRANULAR <input type="checkbox"/>									
BASE IMPRIMADA <input type="checkbox"/>									
TRAT. BICAPA <input type="checkbox"/>									
CARPETA EN FRO <input type="checkbox"/>									
CARP. EN CALIENTE <input type="checkbox"/>									
RECARGO ASFALTICO <input type="checkbox"/>									
SELLO <input type="checkbox"/>									
OTROS <input type="checkbox"/>									
OBSERVACIONES : _____									
_____									
_____									

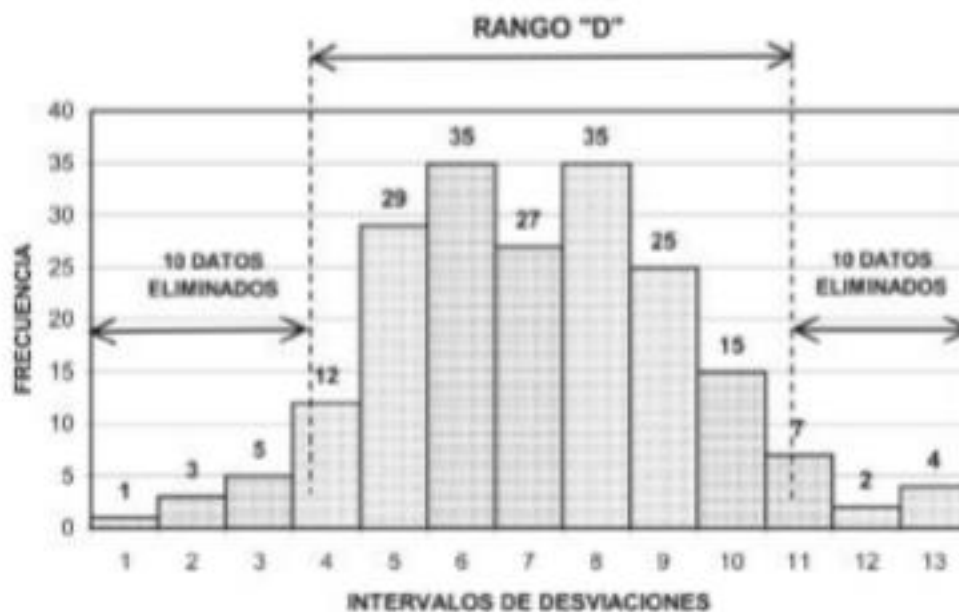
*Nota.* Extraído del manual de Usuario MERLINER.

### 2.2.7.2. Cálculo de la rugosidad

Como se ha explicado, para la generación de los 200 datos que se requieren para determinar un valor de rugosidad, se emplea una escala arbitraria de 50 unidades colocada sobre el tablero del rugosímetro, la que sirve para registrar las doscientas posiciones que adopta el puntero del brazo móvil. La división N° 25 debe ser tal que corresponda a la posición central del puntero sobre el tablero cuando el perfil del terreno coincide con la línea o cuerda promedio. En la medida que las diversas posiciones que adopte el puntero coincidan con la división 25 o con alguna cercana (dispersión baja), el ensayo demostrará que el pavimento tiene un perfil igual o cercano a una línea recta (baja rugosidad).

Por el contrario, si el puntero adopta repetitivamente posiciones alejadas a la división N° 25 (dispersión alta), se demostrará que el pavimento tiene un perfil con múltiples inflexiones (rugosidad alta). La dispersión de los datos obtenidos con el MERLIN se analiza calculando la distribución de frecuencias de las lecturas o posiciones adoptadas por el puntero, la cual puede expresarse, para fines didácticos, en forma de histograma. Posteriormente se establece el rango de los valores agrupados en intervalos de frecuencia (D), luego de descartarse el 10% de datos que correspondan a posiciones del puntero poco representativas o erráticas. En la práctica se elimina 5% (10 datos) del extremo inferior del histograma y 5% (10 datos) del extremo superior, tal como se observa en la Figura 6. (Del Águila Rodríguez, 1999)

**Figura 6**  
*Histograma de frecuencias 200 desviaciones*



*Nota.* Tomado del Manual del Usuario MERLINER.

Después de eliminados los datos, el ancho del histograma se procede a calcular el rango "D", por ejemplo, en la figura 9 en el extremo inferior se eliminaron los datos de las columnas 1, 2 y 3, debido al descarte de 10 datos, y 1 de los 12 datos pertenecientes a la columna 4, por lo cual el resultado es igual a 11/12. Lo mismo sucede en el extremo superior se descartan las columnas 12 y 13 y 4/7 de la columna 11, por lo que el resultado es igual a 3/7. Por lo tanto, el rango D es igual a  $11/12 + 6 + 3/7 = 7,35$  unidades.

Seguidamente se procede a realizar los siguientes cálculos para hallar el IRI:

$$\text{Rango D} = 7.35 \times 5 \text{ mm} = 36.75 \text{ mm}$$

Factor de corrección

$$\text{F.C.} = (\text{EP} \times 10) / (\text{Li} - \text{Lf}) \times 5$$

Donde:

EP = Espesor de la pastilla

Li = Punto inicial del puntero

Lf = Punto final del puntero

Cálculo del Rango D corregido

$$\text{Dc} = \text{D} \times \text{FC}$$

Cálculo del IRI

$$\text{IRI} = 0.593 + 0.047\text{Dc}$$

### **2.2.8. Sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS)**

En el Perú, el uso de los sistemas de aeronave pilotada a distancia (RPAS) está regulado por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. En la Figura 7 se observa un RPAS o dron como comúnmente se conocen, los cuales son controlados mediante softwares o de manera remota, estos equipos son utilizados en el área de la ingeniería civil para la toma de fotografías que pueden convertirse en modelos 3D para su procesamiento.

### Figura 7

*Sistema de aeronave pilotada a distancia – MODELO DJI Air 3S*



*Nota.* En la figura se observa una imagen referencial el equipo utilizado.

#### **2.2.9. Aplicaciones VANT utilizadas en la infraestructura vial**

Los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), también conocidos como drones o UAV (Unmanned Aerial Vehicles), se han consolidado como una herramienta tecnológica de gran utilidad en el ámbito de la infraestructura vial. Su capacidad para recopilar información aérea de alta resolución, junto con la posibilidad de incorporar diferentes tipos de sensores, ha permitido optimizar los procesos de planificación, monitoreo y mantenimiento de vías terrestres (Duque et al., 2018).

Entre las principales aplicaciones de los VANT en infraestructura vial se encuentran la inspección y monitoreo del estado de los pavimentos, el levantamiento topográfico y generación de modelos digitales del terreno, así como el seguimiento del tráfico y la seguridad vial (Outay et al., 2020).

En cuanto a la inspección de pavimentos, los drones permiten capturar imágenes aéreas detalladas de la capa de rodadura, posibilitando la detección de fisuras, baches, deformaciones y otras fallas superficiales sin necesidad de interrumpir el tránsito vehicular (Zaman et al., 2025). Estas imágenes, procesadas mediante técnicas de fotogrametría o Structure from Motion (SfM), permiten generar ortomosaicos y modelos tridimensionales precisos que facilitan el análisis del deterioro y la toma de decisiones para la conservación vial (Sugiarto et al., 2025).

#### **2.2.10. Normativa sobre el uso de los VANT**

El uso de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), también conocidos como drones o RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems), se encuentra regulado por normas

específicas en la mayoría de los países, debido a los riesgos asociados con la seguridad aérea, la privacidad y la responsabilidad civil. En el caso del Perú, la normativa vigente busca establecer un marco legal que permita el desarrollo seguro y responsable de las operaciones con drones, tanto para uso recreativo como profesional.

La Ley N.º 30740, promulgada el 13 de noviembre de 2019, regula el uso y las operaciones de los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia en el territorio nacional. Esta ley establece las disposiciones generales para la operación, registro, control y sanción en el uso de drones, definiendo las categorías de aeronaves y las responsabilidades de los operadores y pilotos. Asimismo, otorga al Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) la autoridad competente para supervisar su cumplimiento y emitir reglamentos complementarios (Congreso de la República del Perú, 2019).

En el marco de esta ley, el MTC ha desarrollado mecanismos administrativos que simplifican el registro de drones y la acreditación de pilotos. En 2024, la entidad implementó un sistema digital para el registro automático de drones, con el fin de agilizar los procedimientos y fomentar el cumplimiento normativo por parte de los usuarios civiles y comerciales (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2024a). Además, el MTC dispone de procesos de acreditación oficial para pilotos de drones, garantizando que las operaciones se realicen de manera segura, bajo condiciones controladas y conforme a estándares internacionales (MTC, 2024b).

### **2.2.11. PROVAL**

ProVAL (Profile Viewing and Analysis) es un software especializado para la visualización y el análisis de perfiles longitudinales de pavimento. Desarrollado originalmente para apoyar a agencias de transporte, permite la importación de datos de perfil en múltiples formatos, el cálculo de indicadores de regularidad como el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), el filtrado de señales, la simulación de tratamientos de mejora del perfil y la generación de informes exportables (Transtec Group, s. f.; Federal Highway Administration, 2018).

Las funcionalidades de ProVAL, lo hacen especialmente útil en estudios de condición superficial de carreteras y calles urbanas, ya que facilita convertir mediciones de campo (perfilometría) en indicadores aplicables a la gestión del mantenimiento. Entre sus aportes destacan: (a) estandarizar el cálculo del IRI y otros parámetros de rugosidad, (b) permitir el análisis comparativo entre tramos y fechas, y (c) modelar el

impacto de intervenciones de fresado o rehabilitación sobre la regularidad (Transtec Group, s. f.; Transtec Group, 2016).

## **2.3. Definición de términos**

### **2.3.1. Fotogrametría**

La fotogrametría es una técnica que permite obtener mediciones precisas y generar modelos tridimensionales a partir de imágenes fotográficas, mediante el análisis geométrico de las mismas. Esta metodología es ampliamente utilizada en ingeniería y topografía para el levantamiento de información del terreno y de infraestructuras. Asimismo, puede emplearse para evaluar la superficie de pavimentos y estimar parámetros como el índice de rugosidad mediante el uso de Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS) (Wolf, Dewitt & Wilkinson, 2014).

### **2.3.2. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)**

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) es un indicador estandarizado que cuantifica el grado de irregularidad longitudinal de una superficie de pavimento, expresado en metros por kilómetro (m/km). Su cálculo se basa en el análisis del perfil longitudinal de la vía y representa el comportamiento dinámico de un vehículo al transitar sobre ella, siendo ampliamente utilizado para evaluar la calidad funcional de las carreteras (Sayers, Gillespie & Queiroz, 1986).

### **2.3.3. Nivel de Rugosidad**

El nivel de rugosidad se refiere al grado de irregularidad presente en la superficie de rodadura de un pavimento, el cual influye directamente en el confort de los usuarios, la seguridad vial y los costos de operación vehicular. Este parámetro permite evaluar el estado funcional del pavimento mediante la medición de las variaciones verticales que experimentan los vehículos al desplazarse sobre la vía. Un mayor valor de rugosidad indica una superficie más deteriorada o irregular, mientras que valores bajos representan un pavimento en buenas condiciones y con desplazamiento uniforme (Huang, 2004).

### **2.3.4. Rugosímetro de Merlín**

El Rugosímetro MERLIN (Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation) es un dispositivo mecánico diseñado para medir la rugosidad superficial de los pavimentos mediante un método estático de alta precisión. Su

funcionamiento se basa en registrar las desviaciones verticales del perfil del pavimento respecto a una línea de referencia o cuerda promedio, permitiendo obtener un valor que se correlaciona con el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) (Cundill, 1991).

#### **2.3.5. Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS)**

Un Sistema de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS) es un conjunto compuesto por una aeronave no tripulada, una estación de control en tierra y los sistemas de comunicación necesarios para su operación. Este tipo de sistema permite la captura de imágenes y datos desde el aire mediante el control remoto de un operador humano (Eisenbeiss, 2009).

## CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

### 3.1. Diseño de la investigación

El diseño de investigación es no experimental, podría definirse como la investigación que se realiza sin manipular deliberadamente variables. Es decir, se trata de estudios que no buscan variar de forma intencional las variables, garantizando que los resultados reflejen la realidad de una manera precisa. (Hernandez, 2010).

#### 3.1.1. Tipo de Investigación

La investigación se enmarca como un estudio de carácter aplicado y con enfoque cuantitativo, ya que pretende resolver una problemática concreta vinculada a la medición de la rugosidad superficial del pavimento.

### 3.2. Acciones y actividades

A continuación, se detallan las acciones y actividades previstas para llevar a cabo este estudio:

- Se desarrolló el plan de trabajo de investigación
- Se recopiló información secundaria para la problemática y el marco teórico
- Se recopiló la información para el diagnóstico
- Se procesó la información en gabinete para la estructura de la investigación
- Se desarrollaron los capítulos de problemática y marco teórico
- Se desarrolló el capítulo de metodología de la investigación
- Se recolectaron los resultados en campo (resultados y discusión)
- Se integro la investigación

### 3.3. Materiales e instrumentos

Los materiales y equipos que se utilizaron utilizados para la realización de la tesis fueron:

- Rugosímetro Merlín
- Dron
- Conos de seguridad
- Flexómetro

- Cuaderno de apuntes
- USB
- Cámara fotográfica
- Regla
- Lapiceros

### **3.4. Población y/o muestra de estudio**

#### **3.4.1. Población**

La población de estudio estuvo conformada por la avenida Celestino Vargas, en el tramo comprendido entre el Óvalo de Pocollay y la avenida Vilauta, en el distrito de Pocollay. Esta población incluyó la totalidad del tramo vial objeto de análisis. Dicho segmento fue elegido debido a que presentaba características que reflejaban de manera adecuada las condiciones generales del pavimento, tales como la rugosidad superficial, el flujo vehicular y la tipología constructiva predominante.

#### **3.4.2. Muestra**

Para el desarrollo de la investigación se trabajó con una muestra constituida por un tramo específico de 2,400.00 metros (2.4 kilómetros) en la avenida Celestino Vargas, comprendido entre el Óvalo de Pocollay y la avenida Vilauta. Este sector fue delimitado debido a que reunía condiciones que permitían obtener una representación adecuada del comportamiento del pavimento en la zona de estudio. En particular, presentaba variaciones notorias en la rugosidad, un flujo vehicular significativo y características constructivas homogéneas, aspectos que hicieron posible recopilar datos pertinentes y coherentes con los objetivos de la investigación.

### **3.5. Operacionalización de variables**

#### **3.5.1. Identificación y caracterización de las variables**

En la Tabla 4, se explica la variable dependiente e independiente ambas se miden en una escala ordinal. Asimismo, en el anexo 1, el cual corresponde a la matriz de consistencia se observa la relación lógica entre el problema, objetivo e hipótesis.

**Tabla 4**  
*Operacionalización de variables de investigación*

Variable	Definición conceptual	Indicador	Escala	Técnicas o métodos
Variable Independiente (X)		Medición estática de desviaciones longitudinales.	Nominal	Ensayo de Campo
X1. Fotogrametría con RPAS	Procedimientos técnicos utilizados para determinar la rugosidad superficial del pavimento.	Generación de perfiles longitudinales mediante fotogrametría	Nominal	Levantamiento aéreo y procesamiento digital
X2. Rugosímetro de Merlín				
Variable dependiente (Y)	Parámetro internacional que mide la irregularidad longitudinal del pavimento, expresado en m/km, que refleja el nivel de confort y estado funcional de la vía.	Valor del IRI por tramo	Nominal	Cálculo matemático
Y1. Índice de Rugosidad Internacional del pavimento				

### 3.6. Procesamiento y análisis de datos

El análisis de los datos recolectados fue una etapa esencial dentro del proceso metodológico, ya que, permitió verificar el cumplimiento de los objetivos de la investigación y contrastar las hipótesis formuladas, este procedimiento aseguro la obtención de resultados válidos y conclusiones fundamentadas, que a su vez sirvieron de base para plantear recomendaciones prácticas y sustentadas.

Teniendo en cuenta los datos de campo obtenidos mediante el rugosímetro de Merlín, estos fueron procesados mediante una hoja de cálculo para poder determinar el IRI promedio. Asimismo, se empleó un vehículo aéreo no tripulado (VANT) modelo DJI Air 3S, cuya aplicación permitió registrar y procesar los datos obtenidos en el tramo evaluado de la avenida Celestino Vargas.

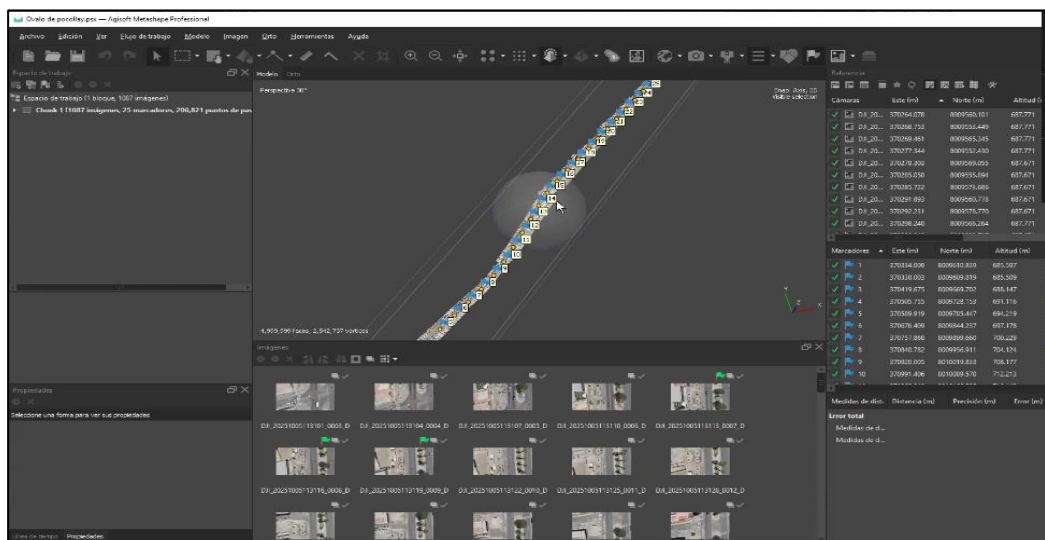
Finalmente, con los datos obtenidos mediante el rugosímetro de Merlín y la fotogrametría con RPAS determinamos el estado superficial del pavimento en la avenida Celestino Vargas tramo ovalo de Pocollay – avenida Vilauta.

### 3.6.1. Procedimiento de ensayo fotogrametría con RPAS

- Se diseñó un plan de vuelo con un software especializado, en el cual se configuro el dron DJI Air 3S para realizar la captura de imágenes del tramo seleccionado, se identificó el tramo de la vía a evaluar, teniendo en consideración las progresivas correspondientes de la zona de estudio.
- Se estableció una altura de vuelo de 15 metros de altura, debido a las características del terreno y condiciones ambientales de la zona, se ejecutó el vuelo en condiciones de luz optima, para minimizar sombras y reflejos en las imágenes.
- Se utilizaron puntos de control terrestre georreferenciados mediante GPS, los cuales permitieron ajustar el modelo topográfico a coordenadas reales
- La Figura 8 muestra el funcionamiento del programa Agisoft Metashape Professional para el procesamiento de las tomas obtenidas por el dron DJI Air 3S, generando los siguientes datos:
- 

**Figura 8**

*Superposición de imágenes en el programa Agisoft Metashape Professional*

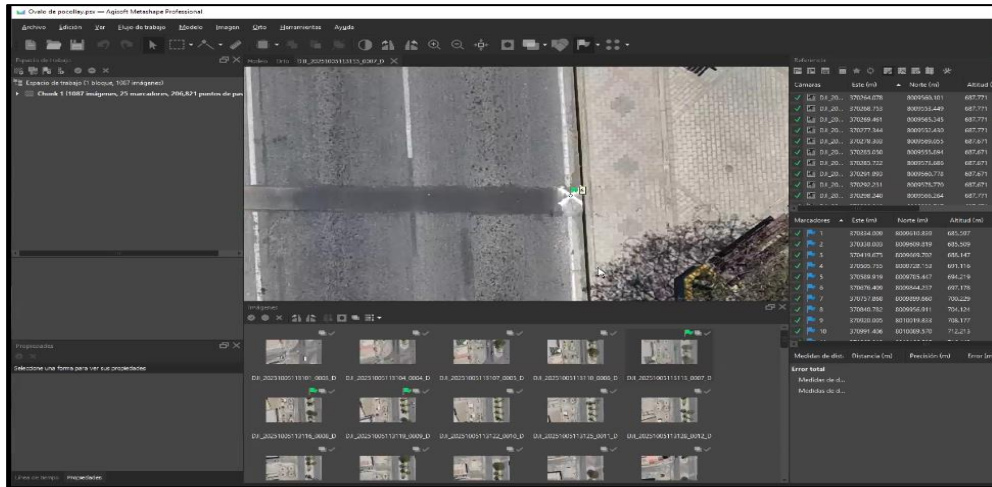


*Nota.* Imagen extraída del programa Agisoft Metashape Professional.

- Se realizó la superposición de las imágenes obtenidas por el dron y a su vez se aplicaron algoritmos matemáticos, tal como se visualiza en la Figura 9, con el fin de visualizar los puntos tomados a lo largo de la Avenida Celestino Vargas, en el tramo de estudio respectivo.

**Figura 9**

*Identificación de los puntos de referencia en el programa Agisoft*

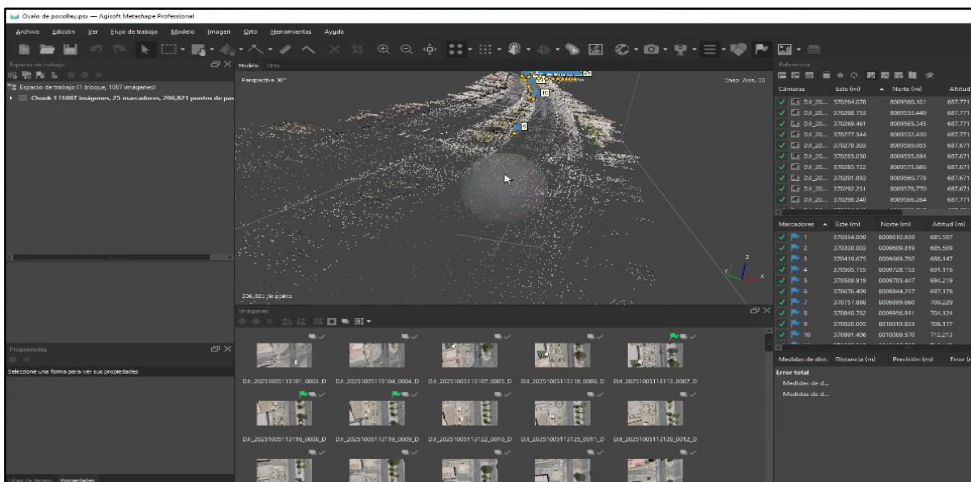


*Nota. Imagen extraída del programa Agisoft Metashape Professional.*

- g. Una vez que se identificaron los puntos, se procedió a identificar las “X” que fueron marcadas cada 100 metros a lo largo del tramo de estudio, obteniendo un total de 25 puntos de referencia desde el inicio del tramo de estudio, como se puede observar en la Figura 10. Luego de verificar los puntos de referencia se procedió a orientar la fotogrametría de la zona de estudio, el programa realizó las correcciones matemáticas respectivas para rectificar el error en cada uno de los puntos

**Figura 10**

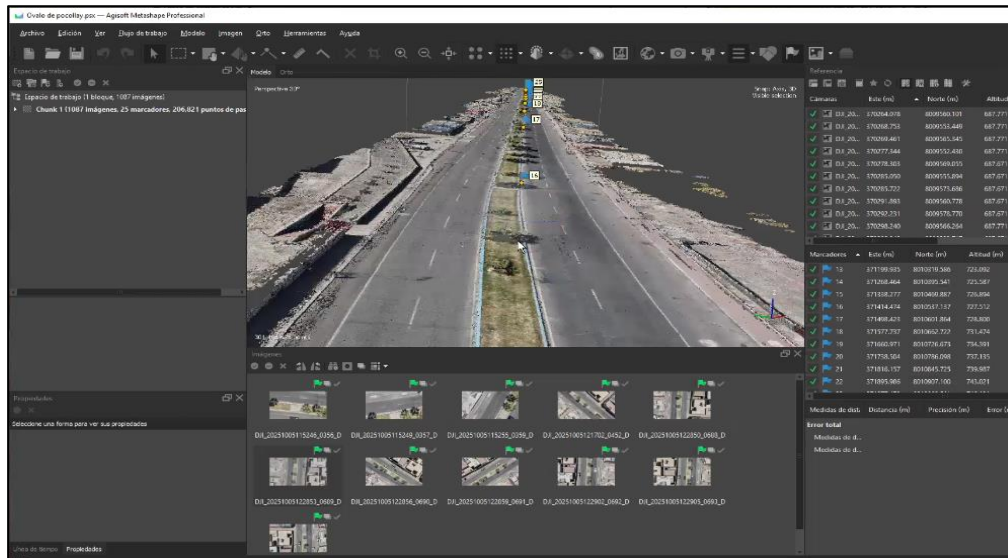
*Corrección de error en cada uno de los puntos de referencia*



- h. En la Figura 11 se muestran las correcciones matemáticas en cada uno de los puntos de referencia, se obtuvo una nube de puntos general, con el fin de que la fotogrametría sea más nítida. Asimismo, se realizaron algunas correcciones y se aplicó un suavizado de puntos.

**Figura 11**

*Fotogrametría de la zona de estudio*



- i. Después de obtener la nube de puntos, se procedió a realizar el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), como se observa en la Figura 12, cada uno de los colores que se visualizaron representaban la diferencia de altura que se identificó a lo largo del tramo de estudio.

**Figura 12**

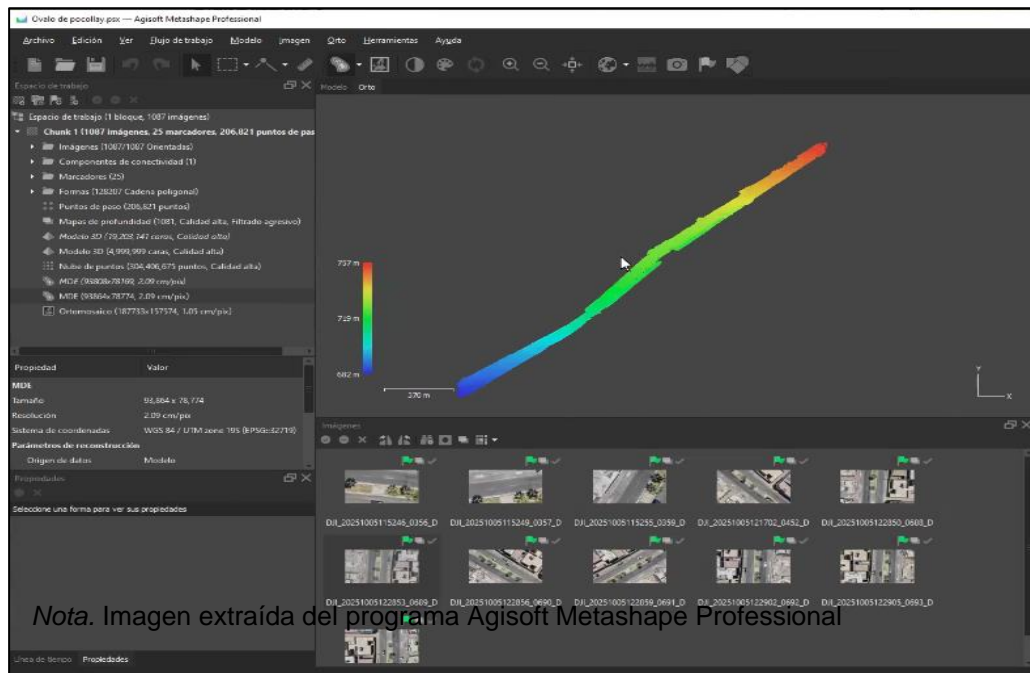
*Modelo Digital de Elevaciones (MDE)*



- j. Se procedió a obtener las curvas de nivel en la zona de estudio, las cuales se encontraban cada 10 centímetros, como se aprecia en la Figura 13. Cabe indicar que, el presente procesamiento de datos utilizando el programa Agisoft Metashape Professional fue desarrollado por el especialista certificado y que cuenta con la licencia respectiva para el uso de dicho software.

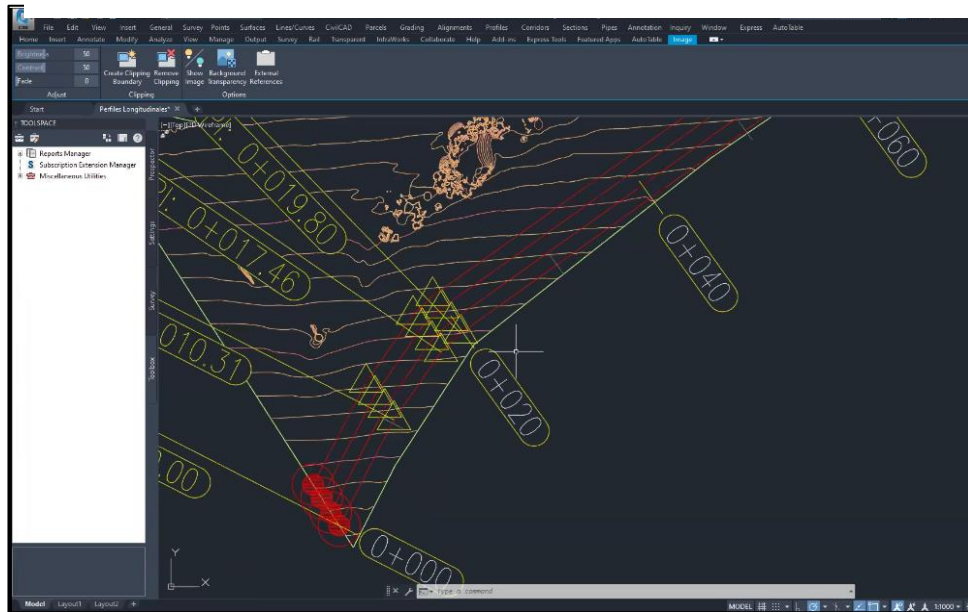
**Figura 13**

*Curvas de nivel de la zona de estudio*



- k. Una vez que obtuvimos la totalidad de datos de las curvas de nivel, los exportamos al programa Civil 3D para realizar los perfiles longitudinales correspondientes, para el presente trabajo se realizaron 4 perfiles longitudinales: Carril Derecho-Derecho, Carril Derecho-Izquierdo, Carril Izquierdo-Derecho, Carril Izquierdo-Izquierdo, tal como se observa en la Figura 14, se ubicaron los perfiles en esa posición con el fin de simular los carriles por donde pasa la rueda de los vehículos.

**Figura 14**  
Perfiles longitudinales de la zona de estudio utilizando el programa Civil 3D



- I. Luego del procesamiento inicial, se procedió a la exportación de los datos topográficos a una hoja de cálculo, con el fin de obtener el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) mediante el uso del software PROVAL. Se emplearon 38,744.00 registros, los cuales fueron distribuidos en cuatro grupos equivalentes de 9,686.00 datos cada uno. Finalmente, los datos fueron exportados en formato .txt, posibilitando su análisis en el software mencionado.
- m. Para el cálculo del índice de rugosidad internacional (IRI) se empleó el software PROVAL, se importó un archivo en formato .txt que contenía los datos de elevación y el espaciamiento entre puntos de medición para la evaluación de la condición superficial del tramo.

### 3.6.2. Procedimiento para el ensayo del rugosímetro de Merlín

En la Figura 15 se puede observar que se utilizó el rugosímetro MERLIN para la toma de datos en la calzada derecha, sentido de subida de la avenida Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay – avenida Vilauta teniendo una longitud de 2400.00 metros lineales aproximadamente, razón por la cual se dividió en 6 tramos la zona de estudio.

Durante la ejecución del ensayo se realizó la toma 200 datos de forma continua a lo largo de la vía, las cuales son detectadas por el patín móvil del MERLIN por un tramo de 400 metros lineales, este procedimiento se repitió en cada uno de los seis

tramos seleccionados, la toma de datos se realizó posicionando el equipo a intervalos regulares generalmente a cada 2 metros de distancia que es un equivalente a un giro de 360° de la rueda del equipo.

### **Figura 15**

*Equipo Rugosímetro de Merlín en campo*



*Nota.* Puesta del Equipo MERLIN en la av. Celestino Vargas. Elaboración propia.


Posteriormente, el registro de estos datos nos permitió calcular el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) para cada uno de los tramos intervenidos.

#### **3.6.3. Procesamiento de datos obtenidos mediante el Rugosímetro MERLIN en gabinete**

Después de realizado el ensayo en campo de los 6 tramos, procedimos a realizar los cálculos de gabinete con el apoyo de hojas Excel, como se puede observar en la Figura 16, para obtener los valores del índice de rugosidad internacional del pavimento.

- a. Se realizó la transcripción de los datos obtenidos en campo a una hoja de Excel para su posterior procesamiento.

**Figura 16**  
**Datos de campo - progresiva 0+0.00 a 0+400.00**

		UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA					
		CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD					
Vía:		Avenida Celestino Vargas					
PAVIMENTO FLEXIBLE CARPETA ASFÁLTICA						Carril	
Evaluador:	Paría Baluarte, Thais		Abscisa inicial:	0+0.00 km	Abscisa final:	0+400.00 km	Derecho
	Villar Montes de Oca, María Alexandra						
Fecha:	19/09/2025						

LECTURAS DE CAMPO										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	32	10	20	24	23	25	16	24	30	8
2	24	24	16	19	21	32	13	21	27	18
3	21	31	15	18	19	12	30	18	22	20
4	6	18	29	21	30	20	25	21	20	18
5	26	22	32	18	26	20	12	23	18	20
6	29	20	13	24	16	21	19	14	43	12
7	16	23	18	15	15	24	20	14	8	14
8	34	27	23	26	15	14	19	22	32	22
9	30	9	18	25	24	24	24	17	1	30
10	25	7	13	25	16	13	12	25	33	19
11	22	13	24	27	26	15	21	30	13	18
12	20	29	33	20	29	27	23	13	13	21
13	19	26	26	20	17	18	25	31	20	17
14	19	15	18	14	20	24	21	22	21	17
15	23	19	23	25	15	26	28	16	16	22
16	11	23	50	19	25	16	19	33	27	17
17	22	34	8	32	16	18	19	11	25	24
18	22	27	21	23	22	15	13	15	17	16
19	8	29	22	14	22	19	15	19	12	18
20	26	19	6	18	18	19	18	25	12	26

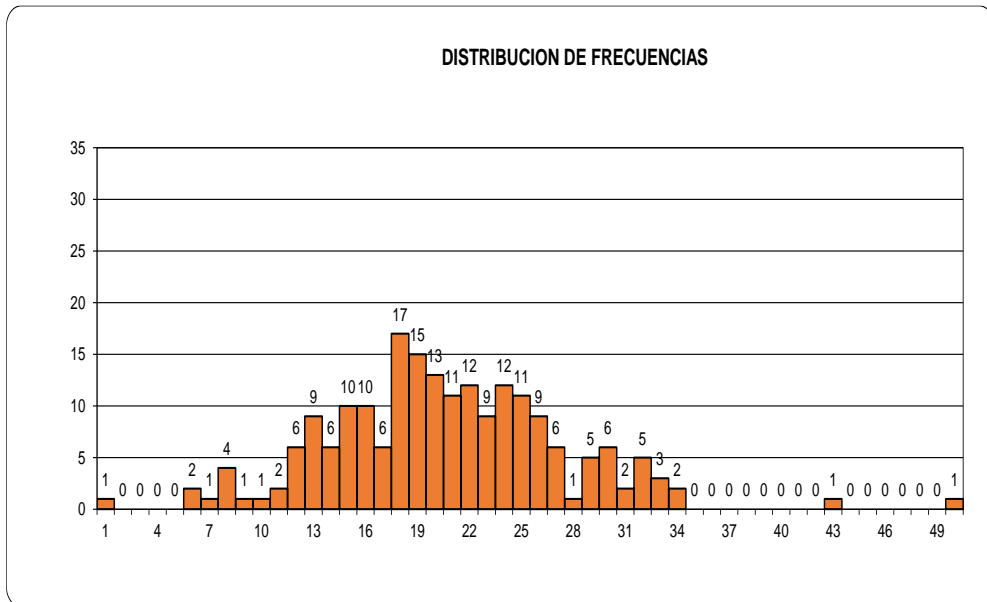
  

TIPO DE PAVIMENTO	
AFIRMADO	<input type="checkbox"/>
BASE GRANULAR	<input type="checkbox"/>
BASE IMPRIMADA	<input type="checkbox"/>
TRAT. BI CAPA	<input type="checkbox"/>
CARPETA EN FRIO	<input checked="" type="checkbox"/>
CARPETA EN CALIENTE	<input type="checkbox"/>
RECAPEO ASFÁLTICO	<input type="checkbox"/>
SELLO	<input type="checkbox"/>
OTROS	<input type="checkbox"/>

*Nota.* En la figura 45 se muestran los datos recolectados en campo, mediante el uso del rugosímetro de Merlín.

- b. En la Figura 17 se muestra la distribución de frecuencias de los datos obtenidos en campo en una escala del 1 al 50.

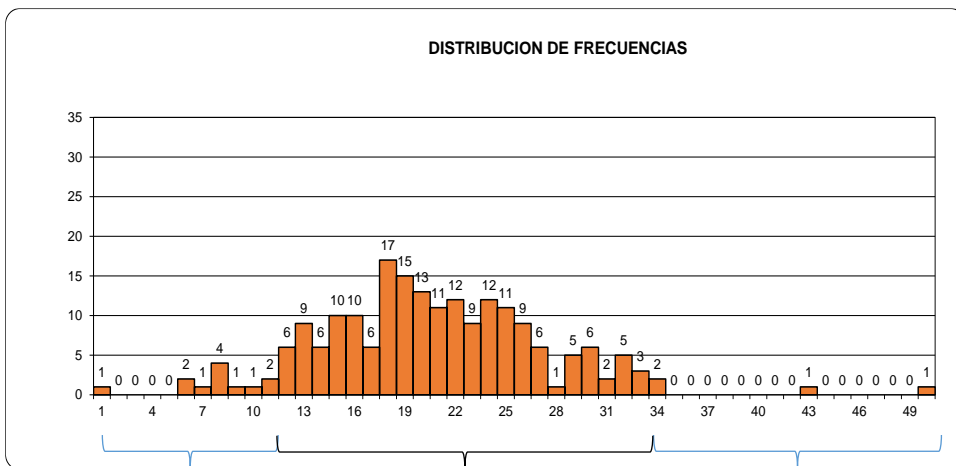
**Figura 17**  
*Distribución de Frecuencias - Tramo 1*



*Nota.* Se observa la distribución de frecuencias, para iniciar el cálculo respectivo.

- c. Después, se procedió a realizar el cálculo del rango “D”, para lo cual se eliminó el 5% (10 datos) del extremo izquierdo y 5% (10 datos) del extremo derecho del histograma, como se puede visualizar en la Figura 18.

**Figura 18**  
*Distribución de Frecuencias - Tramo*



*Nota.* Se observa la distribución de frecuencias, aplicando el cálculo del rango “D”.

Aplicamos la siguiente fórmula para el cálculo del rango D

$$D = \left(0 + 21 + \frac{2}{5}\right) * 5 \text{ mm}$$

$$0 + 21 + \frac{2}{5}$$

$$D = 107,00 \text{ mm}$$

- d. Seguidamente, procedimos a calcular el Factor de corrección para el ajuste de "D" (Calibración)

$$D_c = D * F.C$$

Cálculo del Factor de Corrección (F.C)

$$F.C = \frac{(EP * 10)}{(LI - LF) * 5}$$

$$F.C = \frac{(6)(10)}{(25 - 12) * 5}$$

$$F.C = 0,923 \text{ mm}$$

Entonces Dc es:

$$D_c = 107.00 * 0.923$$

$$D_c = 98,77 \text{ mm}$$

- e. Con el valor obtenido en el punto 4, se determinó el valor del Índice de Rugosidad Internacional para el primer tramo.

$$IRI = 0.593 + 0.0471D_c$$

$$IRI = 0.593 + 0.0471 * 98.77$$

$$IRI = 5,25 \text{ m/km}$$

Nota. Se procedió a realizar el mismo calculo para los 5 tramos restantes mediante formatos en Hoja Excel

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos mediante las metodologías de fotogrametría RPAS y el rugosímetro de Merlín para la medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en la Avenida Celestino Vargas, tramo Ovalo Pocollay y Avenida Vilauta, evaluando el carril derecho de la avenida y teniendo en consideración 6 tramos de evaluación con una distancia de 2400,00 m para la metodología del rugosímetro y la segmentación de 25 puntos tomados cada 100 metros para obtener la fotogrametría a través del vehículo aéreo no tripulado.

### 4.1. Valor del Índice de Rugosidad Internacional utilizando fotogrametría con RPAS

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) fue determinado mediante el uso del software PROVAL, herramienta avalada por la Administración Federal de Carreteras (FHWA), la cual permite analizar con precisión el perfil longitudinal del pavimento a partir de datos topográficos. Para el procesamiento, se utilizó un archivo en formato .txt que contenía la información de elevaciones y espaciamiento entre puntos de medición. En este estudio, se evaluó específicamente el carril derecho, con el propósito de comparar los valores obtenidos mediante el rugosímetro MERLIN aplicado sobre el mismo tramo.

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos con el programa ProVAL, identificando que el pavimento presenta una condición heterogénea, evidenciándose zonas en buen estado y otras con deterioro significativo. Esta variabilidad en los valores de rugosidad indica la existencia de tramos donde se requiere una intervención prioritaria, a fin de garantizar la seguridad vial, el confort de los usuarios y la durabilidad de la infraestructura.

De acuerdo con los datos procesados, el IRI presenta fluctuaciones a lo largo del tramo analizado, con valores que oscilan entre 0,81 m/km y 20,58 m/km. Estos resultados reflejan diferencias notables en la uniformidad de la superficie del pavimento.

Los valores más bajos, como el registrado en el intervalo 1300–1400 metros (0,81 m/km), corresponden a una superficie en buen estado, con escasa irregularidad y una adecuada calidad de rodadura. Según la clasificación propuesta por la FHWA (2006), valores de IRI menores a 1,5 m/km se consideran excelentes, lo que sugiere que dicho tramo cumple con los estándares de confort y desempeño esperados.

Por el contrario, los valores elevados, como el 20,58 m/km identificado en el intervalo 700–800 m, representan una condición deficiente del pavimento, caracterizada por un alto nivel de rugosidad superficial, posiblemente originada por fisuras, deformaciones plásticas o presencia de baches. De acuerdo con la clasificación de la FHWA, valores de IRI superiores a 4,5 m/km se catalogan como inaceptables, indicando la necesidad de intervenciones inmediatas.

Asimismo, se observa un incremento progresivo en la rugosidad desde el intervalo 100–200 metros (10,19 m/km) hasta el intervalo 700–800 metros (20,58 m/km), lo que sugiere un deterioro continuo del pavimento en ese sector. Este tramo constituye una zona prioritaria de mantenimiento o rehabilitación, ya que la rugosidad excesiva afecta directamente el confort del usuario, incrementa el desgaste vehicular y reduce la vida útil del pavimento.

Otra zona crítica se localiza entre los intervalos 1500–1600 metros (2,05 m/km) y 2300–2400 metros (2,69 m/km), donde, aunque los valores no superan el umbral de deficiencia grave, sí reflejan una condición regular, que requiere monitoreo y mantenimiento preventivo para evitar un mayor deterioro.

**Tabla 5**

Valores IRI obtenidos con el programa ProVAL: Carril derecho-derecho

Distancia de Inicio (m)	Distancia Final (m)	Longitud(m)	IRI (m/km)
0	100	100	2,95
100	200	100	10,19
200	300	100	1,72
300	400	100	10,66
400	500	100	2,71
500	600	100	2,11
600	700	100	2,29
700	800	100	20,58
800	900	100	2,88
900	1000	100	2,54
1000	1100	100	2,19
1100	1200	100	1,61
1200	1300	100	1,78
1300	1400	100	0,81
1400	1500	100	1,89
1500	1600	100	2,05
1600	1700	100	2,51
1700	1800	100	1,93
1800	1900	100	2,79

**Tabla 5** (Continuación)

<b>Distancia de Inicio (m)</b>	<b>Distancia Final (m)</b>	<b>Longitud(m)</b>	<b>IRI (m/km)</b>
1900	2000	100	1,76
2000	2100	100	2,17
2100	2200	100	2,12
2200	2300	100	2,33
2300	2400	100	2,20
2400	2421.5	21.25	2,69

El análisis del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) mostrado en la Tabla 14 posibilita determinar la condición funcional del pavimento en el carril derecho de la vía evaluada. Los resultados evidencian la presencia de niveles elevados de rugosidad en determinados tramos, lo que puede repercutir negativamente en la seguridad vial y el desempeño estructural de la vía.

Se identifican valores máximos de IRI en los puntos 100 m (10,19 m/km), 300 m (10,66 m/km) y 700 m (20,58 m/km), los cuales reflejan una condición deficiente del pavimento, posiblemente asociada a fisuras, deformaciones plásticas o presencia de baches. De acuerdo con la clasificación de la FHWA (2006), valores de IRI superiores a 4,5 m/km son considerados inaceptables, lo que implica la necesidad inmediata de intervenciones de mantenimiento o rehabilitación. En este caso, los valores registrados superan ampliamente dicho umbral, indicando deterioros severos y una reducción significativa del confort vehicular.

En contraste, los valores mínimos se localizan en los puntos 200 m (1,72 m/km), 1100 m (1,61 m/km) y 1300 m (0,81 m/km), los cuales corresponden a tramos con mejor condición superficial. Según los criterios de la FHWA, los valores inferiores a 1,5 m/km se catalogan como excelentes, mientras que aquellos entre 1,5 y 2,5 m/km son considerados buenos, por lo que estos sectores pueden clasificarse dentro de una condición satisfactoria o aceptable.

Esta variabilidad en los valores del IRI pone de manifiesto que el pavimento presenta una condición heterogénea, con zonas que se mantienen en buen estado funcional y otras que requieren acciones correctivas urgentes. La identificación de estos tramos críticos es esencial para optimizar la programación de mantenimiento, priorizando las zonas de mayor deterioro con el fin de mejorar la seguridad vial y prolongar la vida útil del pavimento.





#### 4.3. Resumen de resultados del Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

##### 4.3.1. Resumen de los resultados obtenidos mediante el rugosímetro MERLIN

En la Tabla 8 se muestra la tabla resumen de los resultados obtenidos con el rugosímetro MERLIN para cada tramo evaluado de 400 metros lineales en la avenida Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay – Avenida Vilauta.

**Tabla 8**  
*Valores del IRI obtenido con el rugosímetro MERLIN - Carril Derecho*

Progresiva	Rugosidad (m/km)	Estado del pavimento
0+00000 – 0+400,00	5,25	muy malo
0+400,00 – 0+800,00	4,80	malo
0+800,00 – 1+200,00	5,38	muy malo
1+200,00 – 1+600,00	6,41	muy malo
1+600,00 – 2+000,00	6,03	muy malo
2+000,00 – 2+400,00	5,74	muy malo

*Nota.* La Tabla muestra el resumen de los resultados obtenidos para el IRI medidos con el rugosímetro de Merlín en la avenida Celestino Vargas

En la Tabla 9 se muestra el IRI ponderado para la avenida Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay – Avenida Vilauta, el resultado promedio obtenido para el tramo analizado es de IRI = 5,60 m/km para el carril derecho, el cual nos indica que el estado actual del pavimento es *muy malo*.

**Tabla 9**  
*IRI promedio carril derecho*

Metodología aplicada	Descripción	IRI promedio (m/km)	Estado del pavimento
Rugosímetro de merlín	Carril derecho	5,60	Muy malo

#### 4.3.2. Resumen de los resultados mediante fotogrametría RPAS utilizando el programa PROVAL

La Tabla 10 muestra el resultado del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) obtenido mediante el procesamiento de datos en el software PROVAL, registrándose un valor promedio de 3,61 m/km en el carril derecho correspondiente a la zona de estudio.

De acuerdo con los estándares de clasificación establecidos por la Administración Federal de Carreteras (FHWA, 2006), un valor de IRI comprendido entre 2,5 y 4,5 m/km se considera representativo de una condición deficiente o mala del pavimento. Esta categoría indica la presencia de elevada rugosidad longitudinal, asociada a irregularidades superficiales, fisuras, deformaciones o deterioro estructural localizado, las cuales repercuten directamente en la comodidad de conducción, el desgaste vehicular y la seguridad de los usuarios.

En consecuencia, el valor obtenido sugiere que el pavimento del tramo analizado no cumple con los parámetros óptimos de servicio, siendo recomendable la ejecución de intervenciones de mantenimiento correctivo o rehabilitación que permitan restablecer las condiciones adecuadas de rodadura y prolongar la vida útil de la vía.

**Tabla 10**  
*Resultados obtenidos con el programa ProVAL*

Metodología aplicada	Descripción	Iri (m/km) - programa proval
Fotogrametría con RPAS	Carril derecho	3,61

*Nota.* En la tabla se muestra el resultado promedio de 3,61 m/km para el carril derecho, el resultado nos da una calificación de *malo*.

#### 4.4. Correlación entre los valores del IRI

El análisis de la correlación de Pearson demuestra un coeficiente  $r = -0,82$  lo que indica una *relación inversa fuerte* entre los valores del índice de Rugosidad Internacional obtenidos mediante el rugosímetro de Merlín y la metodología de fotogrametría RPAS, como se puede observar en la Tabla 11, este resultado sugiere que ambas metodologías presentan comportamientos opuestos en la estimación del IRI, lo que significa que cuando el IRI estimado de una metodología aumenta, el obtenido por la otra tiende a disminuir de manera consistente. El resultado obtenido no invalida ninguna técnica aplicada, pero si evidencia una discrepancia sistemática entre ambas metodologías.

Los resultados muestran que, para los tramos evaluados, los incrementos en los valores de IRI determinados con el rugosímetro de Merlín se asocian con disminuciones en los valores de IRI estimados mediante la fotogrametría RPAS. Esta tendencia inversa se presenta de manera consistente a lo largo del conjunto de datos analizado, evidenciando un comportamiento opuesto entre los resultados obtenidos por ambos métodos.

Asimismo, se observa que, aunque ambas metodologías evalúan la rugosidad del pavimento, los valores obtenidos no siguen una relación directa ni proporcional. La dispersión de los datos y el signo negativo del coeficiente de correlación indican que las mediciones derivadas de la fotogrametría RPAS no replican de forma lineal los valores obtenidos mediante el rugosímetro de Merlín.

En consecuencia, los resultados evidencian que las metodologías analizadas presentan diferencias sistemáticas en la estimación del Índice de rugosidad Internacional, lo cual se refleja en la correlación negativa fuerte obtenida.

**Tabla 11**

*Correlación de los datos obtenidos mediante el rugosímetro de Merlín y el programa ProVAL*

<b>Descripción</b>	<b>Valor Iri – Rugosímetro de Merlín</b>	<b>Valor Iri – Programa PROVAL</b>	<b>Correlación</b>
Carril Derecho Derecho	5,60 m/km	3,61 m/km	- 0,82

*Nota.* En la Tabla se muestra una correlación de - 0,82 confirmando que existe una correlación inversa fuerte entre ambas metodologías.

La correlación negativa observada puede atribuirse a las diferencias en los principios de medición y escalas de análisis de ambas metodologías, mientras el rugosímetro de Merlín mide directamente el perfil longitudinal del pavimento, la fotogrametría RPAS reconstruye un modelo superficial sujeto a interpolación y filtrado, lo que puede generar una respuesta inversa ante las mismas irregularidades.

## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

### 5.1. Análisis del valor IRI obtenido mediante el rugosímetro Merlín

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos para la rugosidad internacional utilizando el rugosímetro de Merlin, se obtuvo que para el carril derecho de la Avenida Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay – Avenida Vilauta presenta un estado del pavimento *muy malo* según la escala de clasificación del IRI en la Tabla 2, obteniendo como resultado promedio de los 6 tramos analizados un IRI = 5,60 m/km

**Tabla 12**  
*Resultado del IRI obtenido con el rugosímetro MERLIN*

Descripción	Iri promedio (m/km)	Estado del pavimento
Carril derecho	5.60	Muy malo

*Nota.* En la tabla observamos el IRI promedio de 5.60 m/km para la vía evaluada.

### 5.2. Análisis del valor IRI obtenido mediante fotogrametría con RPAS

En la Tabla 13 se visualizan los resultados obtenidos para hallar la rugosidad internacional del pavimento mediante el uso de la fotogrametría RPAS y el uso del programa ProVAL, se obtuvo que para el carril derecho de la avenida Celestino Vargas tramo óvalo de Pocollay – avenida Vilauta presenta un IRI = 3,61 m/km el cual nos indica que el estado actual de la vía mediante esta metodología según la escala de clasificación en la Tabla 2 es “*malo*”.

**Tabla 13**  
*Resultado del IRI obtenido con el programa PROVAL*

Descripción	Iri (m/km)	Estado del pavimento
Carril derecho	3,61	Malo

*Nota.* En la tabla observamos el valor del IRI 3,61 m/km para la vía evaluada

### 5.3. Análisis de la correlación entre los valores del IRI

La fuerte correlación negativa observada evidencia que la fotogrametría RPAS y el rugosímetro de Merlín no son metodologías directamente comparables sin un proceso de calibración, lo cual coincide con la naturaleza distinta de los principios de medición de cada técnica.

La correlación negativa fuerte observada entre los valores del índice de rugosidad internacional obtenidos mediante el rugosímetro de Merlín y la fotogrametría RPAS ( $r = -0,82$ ) puede explicarse a partir del análisis causal de los principios de medición y procesamiento de ambas metodologías. Si bien ambas técnicas evalúan una misma condición física del pavimento, su aproximación a la medición de la rugosidad difiere sustancialmente en términos de escala, sensibilidad y tratamiento de la información.

El rugosímetro de Merlín realiza una medición directa del perfil longitudinal del pavimento, lo que hace altamente sensible a irregularidades de pequeña escala, tales como ondulaciones finas y deformaciones localizada. En consecuencia, un incremento en la irregularidad longitudinal se traduce directamente en un aumento del valor del IRI estimado por este método.

Por el contrario, la metodología basada en fotogrametría RPAS reconstruye un modelo superficial tridimensional a partir de imágenes aéreas, cuyo nivel de detalle depende de la resolución espacial, las condiciones de captura y los algoritmos de interpolación filtrados aplicados durante el procesamiento. Estos procedimientos tienden a suavizar las variaciones de alta frecuencia del perfil, reduciendo la representación de irregularidades finas que si son captadas por el rugosímetro de Merlín. Como resultado, ante un aumento de la rugosidad real del pavimento, el valor del IRI estimado mediante RPAS puede disminuir o mostrar una respuesta atenuada.

Desde una perspectiva causal, la irregularidad real del pavimento actúa como variable común que influye simultáneamente en ambas mediciones; sin embargo, las diferencias metodológicas generan respuestas opuestas frente a una misma condición superficial. Esta divergencia sistemática explica la relación inversa observada entre los valores de IRI, dando lugar a la correlación negativa fuerte

En este sentido, los resultados obtenidos no indican un error en la medición, sino que evidencian que ambas metodologías no son directamente equivalentes ni intercambiables sin un proceso previo de calibración o ajuste. La correlación negativa observada refuerza la necesidad de considerar las limitaciones inherentes a cada técnica y de establecer relaciones de conversión específicas cuando se pretenda

comparar o complementar los resultados del rugosímetro de Merlín con estimaciones derivadas de fotogrametría RPAS.

En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos en la presente investigación entre los valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) determinados mediante fotogrametría con RPAS (3,61 m/km) y el rugosímetro MERLIN (5,60 m/km), clasificando el pavimento como “malo” y “muy malo”, respectivamente. Asimismo, se identificó una correlación inversa fuerte ( $r = -0,82$ ) entre ambas metodologías.

**Tabla 14**  
*Correlación entre los valores del IRI*

Descripción	Iri	Iri	Correlación
	Rugosímetro MERLIN	Fotogrametría RPAS	
Carril Derecho	5,60 m/km	3,61 m/km	-0,82

*Nota.* En la tabla se muestra una correlación inversa negativa fuerte de -0,82.

Estos hallazgos guardan relación con lo reportado por Reyes (2020), quien en su estudio comparó distintos métodos de medición del IRI empleando el rugosímetro MERLIN, aplicaciones móviles y el software ProVal. Dicho autor evidenció variaciones significativas entre los valores obtenidos por cada herramienta, registrando diferencias notorias entre los resultados (2,00 m/km con MERLIN frente a 3,82 m/km con ProVal, entre otros). En concordancia con ese estudio, la presente investigación también demuestra que los métodos de medición no son directamente equivalentes y pueden generar valores distintos debido a sus principios de funcionamiento y procesamiento de datos

De manera similar, los resultados coinciden parcialmente con lo expuesto por Quispe (2024), quien comparó el rugosímetro MERLIN con un dron Phantom 4 Pro a diferentes alturas de vuelo. En su investigación, los valores obtenidos mediante el dron fueron considerablemente mayores que los registrados con MERLIN, especialmente a una altura de 20 metros, mientras que a 10 metros se logró una mayor aproximación, aunque sin alcanzar equivalencia total. Esta tendencia es coherente con lo observado en el presente estudio, donde también se identificaron diferencias entre ambas metodologías. Sin embargo, a diferencia de Quispe (2024), quien reportó una correlación positiva con porcentajes de similitud cercanos al 35%, en esta investigación se obtuvo una correlación inversa fuerte (-0,82), lo que sugiere que las variaciones no

solo se deben a magnitud de medición sino también a posibles efectos sistemáticos relacionados con el procesamiento fotogramétrico, densidad de nube de puntos o condiciones superficiales del pavimento evaluado.

Por otro lado, los resultados contrastan con lo reportado por Acero y Yanapa (2025), quienes encontraron una correlación positiva alta (91,08% de similitud) entre el método fotogramétrico mediante dron y el aplicativo ABAKAL IRI. Mientras que en dicho estudio ambos métodos fueron considerados complementarios y altamente coincidentes, en la presente investigación la correlación inversa fuerte evidencia que, aunque ambas metodologías permiten evaluar el estado superficial del pavimento, no pueden considerarse intercambiables sin un proceso previo de calibración o ajuste estadístico. Esta discrepancia podría explicarse por diferencias en el tipo de instrumento comparado (aplicativo digital vs. instrumento mecánico), características geométricas del tramo evaluado, resolución espacial de las imágenes captadas, o variaciones en el modelo digital de superficie generado mediante RPAS.

En relación con la hipótesis general, los resultados permiten aceptarla parcialmente, ya que ambas metodologías generan valores válidos para la determinación del IRI; no obstante, la existencia de una correlación inversa fuerte evidencia que los métodos no presentan equivalencia directa, requiriéndose modelos de calibración para su aplicación conjunta.

Las hipótesis específicas (a) y (b) se aceptan, dado que tanto la fotogrametría con RPAS como el rugosímetro MERLIN permitieron obtener valores representativos del IRI en el tramo evaluado. Respecto a la hipótesis específica (c), se confirma la existencia de correlación entre ambas variables; sin embargo, esta es de carácter inverso, lo cual modifica la interpretación inicial esperada.

## CONCLUSIONES

Respecto al objetivo principal, se concluye que la aplicación de la fotogrametría mediante RPAS y el rugosímetro MERLIN permitió obtener valores válidos del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en la avenida Celestino Vargas, tramo óvalo de Pocollay – avenida Vilauta. No obstante, los resultados obtenidos mediante ambas metodologías presentaron diferencias significativas en magnitud, registrándose un IRI promedio de 3.61 m/km con la fotogrametría RPAS, clasificando el pavimento como “malo”, y 5.60 m/km con el rugosímetro MERLIN, clasificándolo como “muy malo”.

Asimismo, se determinó la existencia de una correlación inversa fuerte ( $r = -0.82$ ) entre ambas metodologías, lo cual confirma que existe relación estadística entre los valores obtenidos; sin embargo, la dirección negativa indica que los métodos no son directamente equivalentes ni intercambiables sin un proceso previo de calibración. En consecuencia, la hipótesis general se acepta parcialmente, ya que ambas técnicas generan resultados válidos, pero presentan diferencias en su comportamiento comparativo.

Respecto al primer objetivo, la aplicación de la fotogrametría con RPAS y el procesamiento de perfiles longitudinales en el software ProVAL, se estimó un IRI promedio de 3.61 m/km para el tramo evaluado. Según la clasificación del Manual de Carreteras, este valor corresponde a un estado “Malo”, por ende, este resultado refleja una superficie con una rugosidad elevada, afectando directamente la comodidad de los usuarios, la seguridad vial y la eficiencia vehicular en la vía evaluada.

Respecto al segundo objetivo, se determinó el índice de rugosidad internacional (IRI) del carril derecho mediante la metodología del rugosímetro de Merlín, obteniendo un valor promedio de 5.60 m/km, resultado que categoriza el pavimento en estado “Muy malo” según la escala del Manual de carreteras, lo cual evidencia un deterioro estructural y funcional crítico. Este método convencional demostró ser técnicamente preciso y adecuado para la auscultación vial en entornos urbanos, constituyéndose como una herramienta efectiva para el diagnóstico del estado funcional del pavimento

Respecto al tercer objetivo, se concluye que existe correlación estadística entre los valores obtenidos mediante la fotogrametría con RPAS y el rugosímetro MERLIN, evidenciándose una correlación inversa fuerte ( $r = -0.82$ ). Este resultado confirma la hipótesis específica en términos de existencia de relación; sin embargo, la dirección negativa indica que el comportamiento de ambas variables no es proporcional, lo que implica que los métodos no pueden considerarse equivalentes sin ajustes estadísticos adicionales.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda a la Municipalidad Distrital de Pocollay gestionar la suscripción de un Convenio de Cooperación Interinstitucional con Provias Nacional, con el fin de formular y ejecutar una IOARR en la Avenida Celestino Vargas tramo Óvalo de Pocollay – Avenida Vilauta, con el fin de mejorar el servicio de transitabilidad y generar un mayor confort para los usuarios, debido a los resultados de la presente investigación, en el cual se determinó un índice de rugosidad internacional “Muy Malo”, incumpliendo los niveles de servicio exigidos por el Manual de Carreteras.

Se recomienda a la Universidad Privada de Tacna considerar la implementación de cursos y capacitaciones a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil, sobre el uso de los sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS) con el fin de implementar dicha tecnología en futuros estudios para la evaluación de pavimentos urbanos, considerando su eficiencia, bajo costo operativo y capacidad para generar modelos tridimensionales precisos. No obstante, se recomienda optimizar la planificación del vuelo y reducir la altura de captura de imágenes cuando las condiciones del entorno lo permitan, a fin de incrementar la precisión de los resultados.

Se sugiere al Ministerio de Transportes y Comunicaciones desarrollar capacitaciones técnicas para el personal responsable de la auscultación vial, con el fin de innovar las metodologías que usan actualmente e implementar el uso de tecnologías modernas como el uso de sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS), procesamiento fotogramétrico y análisis con un software especializado como ProVAL. Asimismo, deben realizar investigaciones complementarias que analicen la influencia de variables ambientales, como la iluminación, la presencia de obstáculos urbanos y las condiciones meteorológicas, en la calidad de las imágenes obtenidas mediante RPAS, con el propósito de establecer protocolos estandarizados que mejoren la precisión de los resultados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Badilla, J. (2011). *Determinación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en carreteras pavimentadas y sin pavimentar*. Universidad de Costa Rica.
- Banco Mundial. (1986). *Road Roughness and Maintenance Effects in HDM Models*. World Bank Technical Paper No. 46.
- Bravo, M. (2018). *Evaluación de la regularidad superficial en pavimentos de concreto asfáltico utilizando el software ProVAL*. Universidad de Costa Rica.
- Congreso de la República del Perú. (2019). *Ley N.º 30740: Ley que regula el uso y las operaciones de los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia*. Diario Oficial *El Peruano*.
- Del Águila Rodríguez, P. (1999). *Manual para la utilización del rugosímetro MERLIN en la evaluación de pavimentos*. Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción – Dirección de Caminos.
- Duque, D., Vargas, F., & Ramírez, C. (2018). *Aplicación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en la evaluación de infraestructura vial*. *Revista de Ingeniería Civil*, 25(2), 45–56.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2006). *Pavement Smoothness Index Relationships*. U.S. Department of Transportation.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2018). *Profile Viewing and Analysis (ProVAL) Software User Guide (Version 3.7)*. U.S. Department of Transportation.
- García-Palomares, J. C., Torres, A., & Díaz, R. (2021). *Evaluación de la rugosidad superficial mediante técnicas fotogramétricas UAV*. *Ingeniería e Investigación*, 41(1), 12–21. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v41n1.86647>
- Global Drone Regulations Database. (n.d.). *Drone Regulations in Peru*. <https://droneregulations.info>
- Marcobal, F. (2018). *Análisis del índice de rugosidad internacional (IRI) en pavimentos urbanos utilizando ProVAL*. Universidad de Chile.
- Medina, J., & Farro, L. (2017). *Evaluación superficial y de rugosidad del pavimento en la Av. Circunvalación Oeste, tramo Óvalo Transportes – Óvalo Cuzco, distrito de Tacna*. Universidad Privada de Tacna.

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2013). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos* (MC-02). MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2014). *Guía para la Evaluación de la Rugosidad en Carreteras Pavimentadas*. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2020). *Guía técnica de mantenimiento vial urbano y rural*. MTC – Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2024a). *Sistema digital de registro de drones y acreditación de pilotos*. MTC. <https://www.gob.pe/mtc>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2024b). *Reglamento para la operación de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS)*. MTC.
- Outay, F., Yasar, A., & Shakshuki, E. (2020). *Applications of unmanned aerial vehicles in road safety and traffic monitoring*. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11, 6583–6596. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02022-2>
- Prosser-Contreras, M., Rojas, L., & Méndez, C. (2020). *Evaluación de la rugosidad superficial mediante el uso del rugosímetro MERLIN en vías urbanas*. *Revista Ingeniería y Construcción*, 35(2), 105–116.
- Reyes, P. (2020). *Determinación del Índice de Rugosidad Internacional en la Av. La Prensa, usando aparatos inteligentes y el rugosímetro MERLIN* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Digital UTA.
- Reyes, P. (2021). *Análisis comparativo de métodos de evaluación superficial en pavimentos urbanos mediante ProVAL*. Universidad Técnica de Ambato.
- Sachun Quispe, R. (2016). *Estudio del índice de rugosidad internacional de la Panamericana Norte – Zona Trujillo, para su mantenimiento* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo].
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Queiroz, C. A. V. (1986). *The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and Calibration Standard for Measurements*. World Bank Technical Paper No. 45.
- Sayers, M. W., & Karamihas, S. M. (1998). *The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*. University of Michigan Transportation Research Institute.

- Sugiarto, M., Fikri, M., & Anugerah, R. (2025). *UAV photogrammetry applications for pavement surface evaluation. International Journal of Civil Engineering and Technology*, 16(1), 101–115.
- Transtec Group. (2016). *ProVAL: Profile Viewing and Analysis, Version 3.5 – User Manual*. FHWA.
- Transtec Group. (s. f.). *ProVAL Software Overview*. <https://www.roadprofile.com/proval>
- Xu, H., Zhang, L., & Chen, Y. (2019). *Traffic accident reconstruction using unmanned aerial vehicles and photogrammetric modeling. Transportation Research Record*, 2673(7), 224–236. <https://doi.org/10.1177/0361198119849387>
- Zaman, M., Rahman, M., & Islam, T. (2025). *Detection of pavement distresses using UAV imagery and deep learning techniques. Automation in Construction*, 160, 104923. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.104923>

## ANEXOS

## Anexo 1 Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
<p><b>Interrogante Principal</b> ¿Cuál es el Índice de Rugosidad Internacional utilizando fotogrametría con RPAS y el Rugosímetro de Merlín en la av. Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay - Av. Vilauta, Tacna 2025?</p> <p><b>Interrogantes Especificas</b> a. ¿Cuál es el índice de rugosidad internacional del pavimento utilizando la fotogrametría con RPAS en la av. Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay Avenida Vilauta, Tacna 2025? b. ¿Cuál es el índice de rugosidad internacional del pavimento utilizando el rugosímetro de Merlín en la av. Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay -Avenida Vilauta, Tacna 2025? c. ¿Cuál es la correlación entre los resultados del índice de rugosidad internacional utilizando la fotogrametría con RPAS y el rugosímetro de Merlín en la Av. Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay - Avenida Vilauta, Tacna 2025?</p>	<p><b>Objetivo General</b> Determinar el índice de rugosidad internacional utilizando la fotogrametría con RPAS y el rugosímetro de Merlín en la Av. Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay - Avenida Vilauta, Tacna 2025.</p> <p><b>Objetivos Específicos</b> a. Determinar el Índice de Rugosidad Internacional del pavimento utilizando la fotogrametría con RPAS en la Av. Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay - Avenida Vilauta, Tacna 2025. b. Determinar el Índice de Rugosidad Internacional del pavimento mediante el uso del rugosímetro de Merlín en la av. Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay - Avenida Vilauta, Tacna 2025. c. Determinar la correlación de los resultados del Índice de rugosidad internacional obtenidos mediante la fotogrametría con RPAS y el rugosímetro de Merlín en la Av. Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay - Avenida Vilauta, Tacna 2025.</p>	<p><b>Hipótesis General</b> La aplicación de la fotogrametría con RPAS y el rugosímetro Merlín permite obtener resultados confiables del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento en la Av. Celestino Vargas tramo Óvalo de Pocollay – Av. Vilauta, Tacna 2025</p> <p><b>Hipótesis Especificas</b> a. La fotogrametría con RPAS permite obtener valores confiables del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento en la av. Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay - Avenida Vilauta, Tacna 2025.  b. El rugosímetro de Merlín determina datos representativos del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento en la Av. Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay - Avenida Vilauta, Tacna 2025. c. Existe correlación entre los valores obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y el rugosímetro Merlín en la Av. Celestino Vargas tramo Ovalo de Pocollay - Avenida Vilauta, Tacna 2025.</p>	<p><b>Variable Independiente(X)</b> X1. Fotogrametría con RPAS  X2. Rugosímetro de Merlín</p> <p><b>Variable dependiente (Y)</b> Y1. Índice de Rugosidad Internacional del pavimento</p>	<p><b>Tipo de investigación</b> Aplicada o tecnológica, debido a que el presente trabajo se enfoca en determinar el Índice de Rugosidad Internacional utilizando fotogrametría con RPAS y el Rugosímetro de Merlín en la Av. Celestino Vargas, tramo Óvalo de Pocollay – Av. Vilauta.</p> <p><b>Diseño de investigación</b> Experimental</p> <p><b>Población y Muestra</b> Toda la superficie pavimentada de la Av. Celestino Vargas en el tramo comprendido entre el Óvalo de Pocollay y la Av. Vilauta.</p> <p><b>Técnicas</b> Para este proyecto, se evaluará el estado superficial del pavimento flexible mediante la fotogrametría y el rugosímetro de Merlín, y se podrá determinar el estado en el que se encuentra la vía que será estudiada en la presente investigación.</p>