



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN CARRETERA
NO PAVIMENTADA A PARTIR DE INFORMACIÓN DERIVADA
DE MÉTODO ESTÁTICO DIRECTO Y SISTEMA DE
AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA PHANTOM 4 RTK,
CARRETERA DV. ISLA ESTEVES – EMP. PE 3S PUNO.**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JOSE LUIS CALLACONDO PEREZ

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2020



DEDICATORIA

A DIOS por haberme dado un espacio en esta vida y permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi formación.

A mis padres por su paciencia, apoyo y enseñanza incondicional en cada momento de mi vida, hacen falta palabras para describir el gran amor que siento por ellos.

A mis hermanos, hermanas que siempre han mostrado apoyo e interés en mi formación profesional.

A mis amigos, compañeros de la universidad y compañeros de trabajo, por entender el significado de esta investigación y apoyarme con sus alentadoras palabras.



AGRADECIMIENTOS

Agradecer infinitamente a mis padres, hermanos, hermanas que me apoyaron en todo momento durante la realización de la tesis.

Agradecer a los coautores de esta investigación, director de tesis, jurados de tesis, ingenieros amigos de las distintas especialidades, docentes de la universidad, quienes con sus sabios consejos alinearon a culminar satisfactoriamente la presente tesis, así también, amigos, compañeros de la universidad y del trabajo quienes activamente compartimos conocimientos.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 13

ABSTRACT..... 14

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 15

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 17

1.2.1. Problema general. 17

1.2.2. Problemas específicos. 17

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 18

1.3.1. Objetivo general. 18

1.3.2. Objetivos específicos..... 18

1.4. HIPÓTESIS 19

1.4.1. Hipótesis general. 19

1.4.2. Hipótesis específica. 19

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 20

1.6. CARRETERAS DEPARTAMENTALES DE LA REGION PUNO..... 22

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO 25

2.1.1. Antecedentes..... 25

2.1.2. Conservación vial. 32

2.1.3. Influencia de la regularidad superficial en carreteras..... 35

2.1.4. Índice de rugosidad internacional..... 37

2.1.5. Normativas para evaluar IRI. 47

2.1.6. Cálculo del índice de rugosidad internacional IRI. 53

2.1.7. Sistema de aeronaves pilotadas a distancia, Dron. 61



2.1.8. Fotogrametría.	66
2.1.9. Confiabilidad.	71
2.1.10. Precisión y exactitud.	71
2.1.11. RPAS Phantom 4 RTK.	74

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES	79
3.1.1. Población y muestra.	79
3.1.2. Instrumentos de recolección de datos.	80
3.2. MÉTODOS	84
3.2.1. Tipo de investigación.	84
3.2.2. Nivel de investigación.	84
3.2.3. Esquema de trabajo.	84
3.2.4. Análisis de datos.	85
3.3. IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	88

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PUNTOS DE CONTROL GPS DE PRECISIÓN Y P4RTK	91
4.1.1. Ejecución de ensayo con GPS diferencial y P4RTK.	91
4.1.2. Resultados de GPS diferencial y P4RTK.	97
4.2. RUGOSIDAD SUPERFICIAL MÉTODO ESTÁTICO DIRECTO	99
4.2.1. Descripción.	99
4.2.2. Método Rod and Level.	100
4.2.3. Resultados obtenidos IRI.	106
4.3. RUGOSIDAD SUPERFICIAL POR MÉTODO INDIRECTO	106
4.3.1. Descripción.	106
4.3.2. Sistema de aeronaves pilotadas a distancia P4RTK.	107
4.3.3. Resultados obtenidos IRI con método indirecto.	115
4.4. ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL MÉTODO ESTÁTICO DIRECTO Y EL MÉTODO INDIRECTO RPAS PHANTOM 4 RTK	117
4.4.1. Precisión en puntos de análisis para los diferentes vuelos.	117
4.4.2. Precisiones de los 3 vuelos.	121
4.4.3. Comparación de los resultados obtenidos IRI.	125
4.5. ANÁLISIS DE REGRESIÓN Y CORRELACIÓN	128
4.5.1. Procesamiento de las medidas.	128
4.5.2. Análisis de regresión.	130



4.5.3. Aplicación de la ecuación de regresión.	134
4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	136
V. CONCLUSIONES.....	140
VI. RECOMENDACIONES	142
VII. REFERENCIAS.....	144
ANEXOS.....	148

TEMA : Gestión y Conservación Vial

ÁREA : Ingeniería Vial

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Transportes y Gestión Vial

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 15 de enero de 2020.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Carretera PU-140, mal estado.....	23
Figura N° 2: Carretera PU-146, mal estado.....	23
Figura N° 3: Carretera PU-150, mal estado.....	24
Figura N° 4: Carretera PU-147, mal estado.....	24
Figura N° 5: Proceso de gestión de calidad para proyectos viales.	34
Figura N° 6: Modelo cuarto de carro.	39
Figura N° 7: Modelo ideal cuarto de carro.	40
Figura N° 8: Escala de estimación de rugosidad de vías para carreteras pavimentadas con concreto asfáltico o tratamiento superficial.....	43
Figura N° 9: Escala de estimación de rugosidad de vías para carreteras sin pavimentar con grava o superficies de tierra.....	44
Figura N° 10: Escala estándar del Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferente tipos de carreteras.	45
Figura N° 11: Escala de rugosidad IRI (m/km).	51
Figura N° 12: Programa para cálculo de IRI.	58
Figura N° 13: Tipos de dron según su sustentación.....	64
Figura N° 14: Precisión, uniformidad en los puntos pero inexacta.	72
Figura N° 15: Exactitud.	72
Figura N° 16: Exactitud alta y precisión alta.	73
Figura N° 17: Exactitud alta y precisión baja.	73
Figura N° 18: Exactitud baja y precisión alta.	73
Figura N° 19: Libreta de topografía o campo.	80
Figura N° 20: DJI Phantom 4 RTK, componentes.	80
Figura N° 21: Phantom 4 RTK en zona de estudio.....	81
Figura N° 22: GPS diferencial receptor Topcon –GR5.	81
Figura N° 23: Receptor Topcon - GR5 en zona de estudio.	81
Figura N° 24: Nivel de ingenieros Topcon AT-G6 y componentes, zona de estudio. .	82
Figura N° 25: Placa de bronce, punto de control 1 – PC1.....	82
Figura N° 26: Placa de bronce, punto de control 2 – PC2.....	83
Figura N° 27: Cinta Métrica hoja de acero.	83
Figura N° 28: Flexo hoja de acero.	83
Figura N° 29: Esquema de trabajo.....	85



Figura N° 30: Ubicación de la carretera PU-944.....	90
Figura N° 31: Tramo en estudio.	90
Figura N° 32: Monumentación de Puntos de control PCI, PC2.	91
Figura N° 33: Estacionamiento GPS diferencial en los puntos de control PC1, PC2. ..	92
Figura N° 34: Estación de rastreo permanente.	92
Figura N° 35: Comportamiento de satélites.....	93
Figura N° 36: Líneas base.....	93
Figura N° 37: Punto de control PC1 y primeros 3 puntos de 12.	94
Figura N° 38: Marca para puntos de análisis.....	94
Figura N° 39: Estacionamiento del RPAS P4RTK en el punto de control PC2.....	95
Figura N° 40: Plan de vuelo lineal P4RTK.....	95
Figura N° 41: Desplazamiento de 41.7 cm en el punto de control PC2.	96
Figura N° 42: Desplazamiento de 42.6 cm en el punto de análisis 4.	96
Figura N° 43: Punto de control PC2 ajustado.....	97
Figura N° 44: Carretera en estudio.	100
Figura N° 45: Ubicación del PC1.	101
Figura N° 46: Ubicación de puntos de nivelación.	101
Figura N° 47: Nivelación en el tramo de estudio.....	102
Figura N° 48: Formato de introducción de datos.....	103
Figura N° 49: Perfil tramo 0.00 a 50.00 m.	104
Figura N° 50: Variación tramo 0.00 a 50.00 m.	104
Figura N° 51: Perfil tramo 50.00 a 100.00 m.	105
Figura N° 52: Variación tramo 50.00 a 100.00 m.	105
Figura N° 53: Ubicación de la estación móvil en PC2.	108
Figura N° 54: Vuelo programado a 30 metros de altura.....	108
Figura N° 55: Vuelo programado a 50 metros de altura.....	108
Figura N° 56: Fotografías según dirección, programación de vuelo.	109
Figura N° 57: Fotografías orientadas en software agisoft Metashape Pro.	110
Figura N° 58: Nube de puntos densa.	110
Figura N° 59: Ortofotografía de alta calidad.	111
Figura N° 60: detalle de superficie vial en Ortofotografía.	111
Figura N° 61: Ubicación de puntos de nivelación en la ortofotografía.	112
Figura N° 62: Perfil tramo 0.00 a 50.00 m – P4RTK.	113
Figura N° 63: Variación tramo 0.00 a 50.00 m – P4RTK.	113



Figura N° 64: Perfil tramo 50.00 a 100.00 m – P4RTK.	114
Figura N° 65: Variación tramo 50.00 a 100.00 m – P4RTK.	114
Figura N° 66: Resultados de las mediciones de IRI mediante M.D. y M.I.	126
Figura N° 67: Dispersión de valores IRI.	131
Figura N° 68: Regresión lineal de valores IRI.....	131
Figura N° 69: Regresión exponencial de valores IRI.	132
Figura N° 70: Regresión logarítmica de valores IRI.	132
Figura N° 71: Regresión potencial de valores IRI.....	133



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Normativa para el control de IRI por tipo de superficie	42
Tabla N° 2: Clasificación de equipos de medición del IRI.....	46
Tabla N° 3: Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial.....	47
Tabla N° 4: Normativas internacionales para el control de IRI.....	48
Tabla N° 5: Normativa de otros países para el control de IRI.....	49
Tabla N° 6: Parámetros para contratos por niveles de servicio, calzada de afirmado...	52
Tabla N° 7: Calificación del estado de la superficie de rodadura.....	53
Tabla N° 8: Coeficientes para las ecuaciones del IRI.....	59
Tabla N° 9: Resumen de especificaciones del Phantom 4 RTK.....	77
Tabla N° 10: Componentes del phantom 4 RTK.....	78
Tabla N° 11: Coeficientes R de Pearson.....	88
Tabla N° 12: Periodo y duración de posicionamiento	93
Tabla N° 13: Coordenadas GPS de precisión	98
Tabla N° 14: Vuelo N° 01	98
Tabla N° 15: Vuelo N° 02	99
Tabla N° 16: Vuelo N° 03	99
Tabla N° 17: Valores de IRI con el método estático	106
Tabla N° 18: Valores de IRI mediante RPAS vuelo N° 01	115
Tabla N° 19: Valores de IRI mediante RPAS vuelo N° 02	116
Tabla N° 20: Valores de IRI mediante RPAS vuelo N° 03	116
Tabla N° 21: Diferencia GPS de precisión y vuelo N° 01.....	117
Tabla N° 22: Prueba t para medias de dos muestras.....	118
Tabla N° 23: Diferencia GPS de precisión y vuelo N° 02.....	119
Tabla N° 24: Prueba t para medias de dos muestras.....	119
Tabla N° 25: Diferencia GPS de precisión y vuelo N° 03.....	120
Tabla N° 26: Prueba t para medias de dos muestras.....	121
Tabla N° 27: Análisis de varianza tramo 0.00 a 200.00 m	122
Tabla N° 28: Análisis de varianza tramo 200.00 a 400.00 m	124
Tabla N° 29: Comparación de resultados IRI M/KM.....	125
Tabla N° 30: Porcentaje de similitud en los valores de IRI M/KM.....	126
Tabla N° 31: cálculo de “r”	128
Tabla N° 32: Medidas IRI P4RTK (M/KM).....	129



Tabla N° 33: Estadística de datos IRI P4RTK.....	130
Tabla N° 34: Valores IRI mediante análisis de regresión.....	134
Tabla N° 35: Valores IRI a partir del P4RTK	135



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ASTM	: American Society for Testing and Materials.
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials.
BIM	: Building Information Modeling.
CMOS	: Semiconductor complementario de óxido metálico.
D RTK 2	: Estación móvil de doble frecuencia.
DJI	: Dajiang Innovation Technology
GPS	: Sistema de posicionamiento global.
GNSS	: Sistema global de navegación por satélites.
GSD	: Distancia de muestreo del suelo (ground sampling distance).
IRI	: Índice de Rugosidad Internacional.
IGN	: Instituto Geográfico Nacional.
IPE	: Instituto Peruano de Economía.
MTC	: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
M.D.	: Método directo.
M.I.	: Método Indirecto.
NTC	: Norma técnica complementaria.
PPK	: Post processed kinematics (corrección diferencial en post proceso).
P4RTK	: Phantom 4 RTK.
RPA	: Aeronaves pilotadas a distancia.
RPAS	: Sistema de aeronaves pilotadas a distancia.
RTK	: Real time kinematics (corrección diferencial en tiempo real).
UAV	: Unmanned Aerial Vehicle (vehículo aéreo no tripulado).



RESUMEN

Las carreteras fomentan el desarrollo de un país, por consiguiente, tendrán que estar en buen estado de transitabilidad. El parámetro que determina el estado de superficie vial, seguridad, comodidad al transitar, es el índice de rugosidad internacional. Existen diversos equipos para la medición del IRI, en el que los equipos de alto rendimiento y gran precisión son costosos. Las carreteras que conforman la región Puno requiere contar con equipos adecuados, la presente investigación desarrolla el análisis de la rugosidad superficial de la carretera Ruta PU – 944, Trayectoria: Emp. PU-943 (Dv. Isla Esteves) - Huacollo - Emp. PE-3S Puno, red vial vecinal no pavimentada, haciendo uso de equipos de tecnología actual y al alcance de nuestra realidad. Objetivos: Determinar el valor del índice de rugosidad internacional mediante el uso del método estático directo Rod and Level y el método indirecto con sistema de aeronaves pilotadas a distancia P4RTK, analizar la precisión y exactitud en la medición del valor de IRI. Tramo de investigación 600.00 metros, muestra no probabilística, investigación descriptiva mediante un análisis cuantitativo. Los resultados por el método estático es un IRI promedio de 18.55 m/km y el método indirecto un IRI de 17.42 m/km, 15.67 m/km, que describe una carretera no pavimentada con irregularidades, mal estado de transitabilidad, frecuentes defectos, erosiones, depresiones profundas. Así también, el porcentaje de similitud IRI de 93.89 % con tendencia de relación positiva fuerte. Conclusión, de acuerdo a los valores IRI y el análisis estadístico, se obtiene una confiabilidad aceptable, se recomienda el uso para planificación o formulación de planes viales.

Palabras claves: Índice de rugosidad internacional, Planificación vial, Rod and level, Sistema de aeronaves pilotadas a distancia.



ABSTRACT

The roads promote the development of a country, therefore they will have to be in a good state of transitivity. The parameter that determines the state of the road surface, security, comfort when transiting, is the international roughness index. There are various equipment for measuring IRI, where high performance and high precision kits are expensive. The roads that make up the Puno región require an adequate equipment. the present investigation develops the analysis of the surface roughness of the road Ruta PU - 944, Trajectory: Emp. PU-943 (Dv. Isla Esteves) - Huacollo - Emp. PE-3S Puno, unpaved neighborhood road network, using current technology equipment and within reach of our reality. Objectives: To determine the value of the international roughness index through the direct static method Rod and Level, the indirect method with the P4RTK remotely piloted aircraft system, to analyze the precision and accuracy in the measurement of the IRI value. Research section 600.00 meters, non probability sample, descriptive research using a quantitative analysis. The results for the static method is an average IRI of 18.55 m/km and the indirect method is an IRI of 17.42 m/km, 15.67 m/km, which describes an unpaved road with irregularities, poor state of transitivity, frequent defects, erosions, deep depressions. So too, the percentage of similarity IRI 93.89 % with a strong positive relation trend. Conclusion, according to the IRI values and the statistical analysis, an acceptable reliability is obtained, the use for planning or formulation of road plans is recommended.

Keywords: International roughness index, Road Planning, Rod and level, Remote piloted aircraft system.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Existen diferentes investigaciones en el mundo donde revelan que los costos de operación, velocidad de operación, tiempos de recorrido, comodidad del usuario, consumo de combustible, deterioro de los vehículos, costos de mantenimiento vial, entre otros que están estrictamente referidos, dependen de la magnitud de irregularidades superficiales de la carretera, así también señalan que una inadecuada gestión de conservación vial puede ocasionar gastos excesivos. El Banco Mundial patrocinó diferentes programas de investigación para conocer e identificar los problemas en los países en vías de desarrollo, la rugosidad o regularidad de las carreteras fue identificada como factor primario en la calidad de la vía.

En el Perú la utilización del índice de rugosidad internacional como parámetro de control, fue implementada aproximadamente en el año 1992, en la recepción de obras de construcción y rehabilitación de vías. Según el IPE (2008) indica que entre los años 1992 y 2005 se realizó una inversión prácticamente perdida de 718 millones de dólares en la rehabilitación de carreteras, pero pudiéndose evitarse si se destinaba un monto de 98 millones de dólares en el mantenimiento periódico y rutinario de dichas vías, para definir adecuadamente el momento en que una carretera debería recibir un mantenimiento periódico, se debería contar con el IRI para cada carretera y de forma anual, pero lamentablemente dicha información no era actualizada, siendo esta problemática parte de la actualidad.



Los equipos utilizados para la obtención del IRI en nuestro país, convencionalmente es el merlín, un equipo económico y muy preciso, pero poco eficiente, por otro lado, existe los equipos tipo respuesta como el Bum integrator, perfilómetros laser, que son equipos muy eficientes, sofisticados, pero económicamente elevados, y generalmente usados en carreteras de orden nacional.

En la región Puno las carreteras en su mayoría son no pavimentadas, donde se observa condiciones inadecuadas de transitabilidad. Actualmente las diferentes instituciones viales de esta región no cuentan con equipos de alto rendimiento y buena precisión para medición del índice de rugosidad internacional, comúnmente se pretende usar el merlín, pero como se menciona en el párrafo anterior es poco eficiente, es decir, de bajo rendimiento para las carreteras de longitudes considerables. En la programación o planificación vial de la región de Puno, no se realiza el cálculo del IRI, a causa de la falta de un equipo adecuado, muy por el contrario, se intenta estimar mediante la percepción visual, acudiendo esto a cometer grandes errores.

Es bastante evidente que en el contexto de seguir con esta problemática, como es el caso de no obtener el parámetro IRI en la planificación vial de la región, se continuará cometiendo errores, y como resultado seguir incurriendo a una inadecuada planificación vial para conservación o mantenimiento de carreteras, generando gastos onerosos al estado, paralelamente afectando a los distintos factores, como gastos de operación, velocidad de operación, tiempo de recorrido, seguridad vial, consumo de combustible, entre otros.

La situación problemática descrita permite plantear la presente investigación, como alternativa para contrarrestar las deficiencias y limitaciones que se presentan



en las instituciones de nuestra región respecto a la obtención del índice de rugosidad internacional. La investigación obtiene el parámetro IRI a partir del uso del equipo Phantom 4 RTK de una manera rápida y sencilla, que incluye valores agregados como información de toda la superficie vial, levantamiento topográfico, obras de arte, orto fotografías, nube de puntos, modelo digital de elevaciones. Se debe de entender claramente que el índice de rugosidad internacional, es uno de los indicadores más importantes en una carretera, donde refleja el nivel de servicio o calidad de la vía, es un parámetro de decisión que permite plantear una adecuada programación de plan vial dentro de un contexto de gestión de conservación vial con mantenimientos preventivos y correctivos.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general.

¿Cuál es el nivel de confiabilidad en el valor de la rugosidad superficial en carretera no pavimentada a partir de información derivada del método estático directo y sistema de aeronaves pilotadas a distancia P4RTK, carretera Dv.Isla Esteves – Emp.PE 3S Puno-2019?

1.2.2. Problemas específicos.

- ¿Cuál es el valor del índice de rugosidad internacional mediante el uso del método estático directo Rod and Level en la carretera Dv.Isla Esteves – Emp.PE 3S Puno-2019?
- ¿Cuál es el valor del índice de rugosidad internacional a partir de información derivada de método indirecto con sistema de aeronaves pilotadas a distancia P4RTK en la carretera Dv.Isla Esteves – Emp.PE 3S Puno-2019?



- ¿Cuál es la precisión y exactitud en la medición del índice de rugosidad internacional a partir de información derivada del método indirecto RPAS P4RTK respecto al método estático directo en la carretera Dv.Isla Esteves – Emp.PE 3S Puno-2019?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general.

Analizar el nivel de confiabilidad en el valor de la rugosidad superficial en carretera no pavimentada a partir de información derivada de método estático directo y sistema de aeronaves pilotadas a distancia P4RTK, carretera Dv.Isla Esteves – Emp.PE 3S Puno-2019.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Determinar el valor del índice de rugosidad internacional mediante el uso del método estático directo Rod and Level en la carretera Dv.Isla Esteves – Emp.PE 3S Puno-2019.
- Determinar el valor del índice de rugosidad internacional a partir de información derivada de método indirecto con sistema de aeronaves pilotadas a distancia P4RTK en la carretera Dv.Isla Esteves – Emp.PE 3S Puno-2019.
- Analizar la precisión y exactitud en la medición del índice de rugosidad internacional a partir de información derivada del método indirecto RPAS P4RTK respecto al método estático directo en la carretera Dv.Isla Esteves – Emp.PE 3S Puno-2019.



1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis general.

El nivel de confiabilidad es aceptable en el valor de rugosidad superficial en carretera no pavimentada a partir de información derivada del método estático directo y sistema de aeronaves pilotadas a distancia P4RTK, carretera Dv. Isla Esteves – Emp.PE 3S Puno-2019.

1.4.2. Hipótesis específica.

- Mediante el uso del método estático directo rod and level, el valor del índice de rugosidad internacional representa un mal estado de transitabilidad en la carretera Dv.Isla Esteves – Emp.PE 3S Puno-2019.
- El valor del índice de rugosidad internacional a partir de información derivada de método indirecto con sistema de aeronaves pilotadas a distancia P4RTK, representa un mal estado de transitabilidad en la carretera Dv.Isla Esteves – Emp.PE 3S Puno-2019.
- La precisión y exactitud en la medición del índice de rugosidad internacional a partir de información derivada del método indirecto RPAS P4RTK es aceptable respecto al método estático directo en la carretera Dv.Isla Esteves – Emp.PE 3S Puno-2019.



1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación nace de las problemáticas presentadas en formular el plan vial departamental regional Puno, siendo dicha problemática la ausencia del cálculo del IRI, por razones descritas en la descripción del problema.

La investigación se encuentra enmarcada dentro de la Ingeniería Civil, correspondiente al estudio del índice de rugosidad internacional mediante equipos alternativos de tecnología actual, alineados en un contexto de conservación vial para preservar las inversiones realizadas por el estado, cumpliendo con los niveles adecuados de transitabilidad que incluye seguridad, confort, comodidad, entre otros. Una inadecuada transitabilidad a causa de las irregularidades superficiales en carreteras, afecta a los costos de operación, tiempo de transporte, velocidad de operación, consumo de combustible, comodidad del usuario, entre otros. Una programación o formulación de un plan vial apropiado, considerando el indicador IRI, inducen a realizar mantenimientos oportunos que ayudan a prolongar la vida útil de las carreteras y evitan ciclos fatales de estas. La investigación fomenta optar una cultura preventiva y correctiva en la gestión vial.

Las carreteras de nuestra región en su mayoría son no pavimentadas, donde se observa en muchas de estas, condiciones inadecuadas de transitabilidad, reflejando la deficiencia en la conservación vial. La región de Puno actualmente sus diferentes instituciones viales no cuentan con equipos de alto rendimiento y buena precisión para la medición del índice de rugosidad internacional, convencionalmente, se pretende usar el merlín, pero este equipo es poco eficiente, mostrando bajo rendimiento para longitudes considerables en carreteras, por lo tanto, el cálculo de este indicador IRI es obviado o no considerado en la etapa de



programación o formulación del plan vial. Es así que se hace necesario un equipo de alto rendimiento, buena precisión y con costos accesibles a nuestra realidad para contrarrestar dicha problemática

Esta investigación pretende implementar mediante tecnología moderna en alcance de nuestras instituciones viales, sociedad en general dedicada al rubro de la investigación, el uso de sistema de aeronaves pilotadas a distancia equipo Phantom 4RTK, obtener mediante procedimientos fotogramétricos el índice de rugosidad internacional de una manera sencilla y rápida, así también, adicionalmente obtener resultados como levantamientos topográficos, ortofotos, georreferenciación, modelo digital de elevaciones, nube de puntos que ayudan a mejorar la interpretación de los resultados. Con la tecnología planteada se obtendrá información detallada de toda la superficie vial y alrededores, donde no solamente se podrá calcular el IRI, si no adquirir mayor información exquisita para distintos usos, por lo tanto, podemos afirmar que con la aplicación de esta metodología se realizarán mejores programaciones de mantenimientos viales, adecuados planes viales que enfoquen a una cultura preventiva y correctiva en la conservación vial.



1.6. CARRETERAS DEPARTAMENTALES DE LA REGION PUNO

Las carreteras departamentales de la región de Puno, están conformadas por vías pavimentadas y no pavimentadas, que en su mayoría son las no pavimentadas. En la actualidad se observa, que gran parte de estas vías muestran problemas técnicos en su superficie, desde leves hasta severos, afectando a la velocidad de operación, tiempo de recorrido, costos de operación, costos de mantenimiento, entre otros.

Según Aza (2009) describe que el nivel de servicio y el índice de rugosidad internacional IRI son los que mayormente explican la causa del deterioro de la red vial departamental y que para el cumplimiento de garantizar una adecuada transitabilidad en la jurisdicción regional Puno, es preciso actualizar o generar información técnica respecto de las condiciones de transitabilidad de cada una las vías que constituyen la red departamental, así como de los índices de rugosidad, acción que permitirá establecer las metas de mediano plazo en la implementación de proyectos de intervención vial, con la consecuente recuperación del patrimonio vial regional.

Se hace necesario determinar el índice de rugosidad internacional IRI en la etapa de elaboración o formulación del plan vial, ya que esta es un parámetro de decisión en la gestión de mantenimiento vial. En la región de Puno el valor de IRI en la etapa de planificación vial, no es determinada, a falta de un equipo adecuado, solo se intenta estimar mediante la observación, lo cual, lleva a cometer muchos errores al obtener este indicador.

A continuación, se muestra fotografías de algunas carreteras departamentales que están en mal estado:

- Carretera departamental Ruta PU-140, Trayectoria: Emp. PE-3S (Estrella)
- Pte. Achaya – Chuquijano – Achaya - Emp. PU-113 (Caminaca).



Figura N° 1: Carretera PU-140, mal estado.

- Carretera departamental Ruta PU-146, Trayectoria será: Emp PE-34 I (Huancané) – Huertapata - Vizcachani – Quellauyo – Emp PE-34 I (Cacuña).



Figura N° 2: Carretera PU-146, mal estado.

- Carretera departamental Ruta PU-150, Trayectoria: Emp. PE-3S (Pueblo Libre – Huapaca San Miguel – Palcona – Ayutañani – Huancuni – Tarapoto - Emp. PE-36 A (Llitorohoco).



Figura N° 3: Carretera PU-150, mal estado.

- Carretera departamental ruta PU-147, Trayectoria: Emp. PE-34 I (Jipata) - Jacantaya – Camisani - Jacha Paru - Lloquesani – Emp PE-34 I (Moho).



Figura N° 4: Carretera PU-147, mal estado.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Antecedentes.

2.1.1.1. Antecedentes internacionales.

Angarita y Sánchez (2017) describe, objetivo: obtener el IRI mediante metodología fotogramétrica y métodos tradicionales de topografía en un trayecto de vía compuesta por pavimento flexible. El proyecto se llevó a cabo en la provincia de Sabana Centro de Cundinamarca, Colombia, en las instalaciones de la universidad militar Nueva Granada, pista de prueba conformada por pavimento flexible, longitud 100 metros. Se realiza una investigación comparativa del método fotogramétrico con Drone Dji Phantom 4 de 12.4 megapíxeles, modelo FC 330, a una altura de vuelo de 10m, 20m metros frente a escanografía laser y método topográfico con nivel y mira. la comparación del método fotogramétrico con el escáner laser y el método topográfico generan resultados con diferencias tolerables, abriendo la posibilidad de utilizar metodologías que analicen toda la superficie del pavimento, lo que genera valores agregados al cálculo del IRI. Conclusión: el método topográfico que se emplea para la estimación del IRI tiene limitaciones a la hora de recolección de información, pues es imposible recolectar nube de datos tan densas como las generadas por el sistema aéreo no tripulado o el método de escanografía laser; la fotogrametría por medio de sistemas aéreos no tripulados ofrece valores agregados como la ortofotografía de alta resolución, los tiempos de recolección de información, entre otros.



Recomendación: La metodología propuesta acorde a los resultados que se obtuvo se recomienda emplear para estudios de IRI en redes viales de tránsito urbano con fines de prevención y mantenimiento, con umbrales de precisión preestablecidos.

Sánchez y Martínez (2018) tiene como objetivo: determinación del IRI en pavimentos a partir de procedimientos fotogramétricos, equipo Merlín y método topográfico nivel y mira, los trabajos fueron realizados de manera experimental en un tramo de pavimento de 200 m de longitud, ubicada en el campus de la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echevarría (CUJAE), la Habana, república de Cuba. Los procedimientos merlín y topográfico se utilizaron para comparación del método fotogramétrico, donde se usó una cámara fotográfica digital Nikon D 300, resolución de 5.5 um, altura promedio a la base 1 metro. Para la realización del estudio se elaboró un procedimiento, donde llevado a la práctica se permitió corroborar las pertinencias de las técnicas fotogramétricas. Conclusión: los valores obtenidos mediante los tres métodos resultan similares, obteniéndose la misma clasificación del estado del pavimento $2.5 < IRI < 6$, pavimento viejo con imperfecciones superficiales, por lo que se concluye que el procedimiento fotogramétrico ofrece gran precisión en el cálculo del índice de rugosidad internacional y rapidez en su implementación. Además, el modelo de superficie obtenido permite construir de un mismo pavimento, varios perfiles longitudinales y por tanto varios valores de IRI, a partir de los cuales es posible obtener una clasificación más fidedigna de su estado. También, el modelo de superficie conjuntamente con la ortofoto, nos muestran con gran detalle otros desperfectos de la vía.



Sánchez, Tejada y Martínez (2018) tiene como objetivo: Medición de la regularidad superficial en pavimentos a partir de método fotogramétrico digital de corto alcance, se determina el IRI mediante el método fotogramétrico y método topográfico. La realización de los trabajos experimentales se seleccionó tres tramos de pavimento flexible, cada una de 100 metros de longitud, dentro del campus de la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echevarría (CUJAE), la Habana, república de Cuba, así también, la sección de la autopista frente al CUJAE. Los trabajos de toma fotográfica fueron realizados con cámaras Nikon D300, canon 450D, altura promedio 1 metro, mediante dos formas: manual y a partir de un equipamiento especial elaborado para la realización de los mismos. Se compararon los perfiles longitudinales obtenidos por el método fotogramétrico y por el topográfico (mira-nivel), obteniéndose valores en cotas que difieren milimétricamente, con desviaciones estándar que oscilan en el orden centimétrico. Se determina y compara los valores de IRI en tramos a intervalos de 20m para ambos métodos, tomando como parámetro de aceptación una relación entre 95- 105%. Conclusiones: Los valores de diferencia media de altura entre los perfiles muestran diferencias milimétricas, mientras que las desviaciones estándar oscilan en el orden de los centímetros; solamente cumplieron el indicador de aceptación el 20 % de los resultados de IRI obtenidos; es necesario perfeccionar el instrumento utilizado y la precisión de los resultados; el método fotogramétrico ofrece valores agregados como es la ortofotografía de alta resolución teniendo la posibilidad de identificar daños y deterioros sobre el pavimento, tales como piel de cocodrilo, exudación, grietas, ahuellamientos y baches.



2.1.1.2. Antecedentes nacionales y regionales.

La presente investigación no cuenta con antecedentes nacionales y regionales o locales que estrictamente estén referidos al cálculo del índice de rugosidad internacional, mediante la aplicación de Sistemas de aeronaves pilotadas a distancia o similares.

A continuación, se muestran algunos estudios nacionales y locales referidos a la importancia del índice de rugosidad internacional.

Cáceres y Segura (2018) tesis de grado, objetivo: realizar el análisis y evaluación de los índices de rugosidad de la panamericana norte – Trujillo, a través del método Road and level y el método Merlín, la muestra es comprendida desde el Ovalo Moche hasta el Ovalo de Huancaco de la ciudad de Trujillo. Los equipos empleados para el cálculo del IRI corresponde al merlín y al nivel y mira topográfica. los resultados obtenidos con los dos métodos son: IRI en el tramo Ovalo Moche - Víctor Larco, merlín 2.39 y road and level 2.539; IRI en el tramo Víctor Larco-Huanchaco, merlín 2.43 y road and level 2.832; IRI en el tramo Huanchaco-Ovalo del Milagro, merlín 2.33 y road and level 2.376; por lo que nos muestra en el tramo de Víctor Larco – Huanchaco, varía más con respecto a los otros dos tramos evaluados, y que el método del Road and Level nos muestra datos más altos de IRI que el método de Merlín, por lo que se tomó en cuenta la precisión de los datos y el resultado, que el método Road and Level está más preciso y cercano a la realidad, pero a la vez demanda mas hora – hombre en la ejecución del mismo. Conclusión: El nivel de servicio de una vía se ve afectado por el IRI que presenta la misma, de manera directa y progresiva, al generar varios factores que alteran las



condiciones de operación y transitabilidad de la vía. Se realizó 58 ensayos para el método de Merlín utilizándose 3 días con un rendimiento de equipo de 1.6 km/hora; Para la determinación del perfil de la vía en estudio con nivel y mira se utilizaron 5 días con un rendimiento 0.8 km/hora, agrupándose en hojas de campo de 200 datos equivalentes a 400 metros.

Rivera (2017) tesis de grado, objetivo determinar la influencia de la regularidad superficial en el nivel de servicio en vías afirmadas, la investigación se realizó en la vía afirmada Chupura – Lapa Km 0+000 al Km 10+000, ubicada en el distrito de Chupura, provincia de Huancayo, región Junín. Se realiza un minucioso trabajo para ver cómo influye la regularidad superficial en el nivel de servicio de vías afirmadas, para tal fin se analizaron el índice de rugosidad internacional, velocidad de operación, costos de operación y mantenimiento, analizados en 4 tipos de vehículos que transitan por la carretera, vehículos privados, vehículos comerciales, ligeros, buses y camiones. Para determinar la muestra se utilizó un muestreo no probabilístico utilizando como criterio las irregularidades que presenta la vía. La metodología empleada corresponde a un tipo de investigación aplicada, resultados específicos expresados de manera no experimental – correlacional siguiendo un enfoque transversal de acuerdo a las características de información empleada. Los instrumentos empleados son el Merlín y el software HDM. Como resultado de la investigación, se obtuvo que la velocidad de operación vehicular es afectada por la rugosidad de la carretera, teniendo mayor efecto en los camiones y buses, con una velocidad de operación vehicular de 46 km/h y 51 km/h, respectivamente. Asimismo, los costos de operación obtenidos para vehículos particulares son de S/.98.6 por



día, para vehículos comerciales de S/. 112.45 por día, para camiones es de S/. 366.19 por día y para buses de S/.648.83 por día; y un costo de operación anual de la carretera para todos los vehículos de S/. 2, 554,533.54 por año. Así mismo se concluye que el costo de mantenimiento será menor cuanto mayor sea el índice de rugosidad, ya que, para mantener el índice de rugosidad se requiere hacer más veces el mantenimiento, mientras que para índices de rugosidad más altos indica que se realiza menos veces el mantenimiento.

Cabanillas (2019) tesis de grado, Objetivo: Determinar la variación del valor del IRI (Índice internacional de Rugosidad), en la carretera no pavimentada Emp. PE-3S (Dv. Kishuara)- Emp. PE-3S (Alfapata) entre el km 680+000 al km 732+950, donde se ha demostrado que el IRI varía a medida que transcurre el tránsito por la carretera. Métodos: La población estuvo constituida por 27 vehículos y la muestra por 25 vehículos de acuerdo al muestreo aleatorio simple, se utilizó el instrumento de conteo vehicular. La confiabilidad de los instrumentos fue validada de manera adecuada. Resultados: Los resultados muestran que la transitabilidad de la carretera no pavimentada Emp. PE-3S (Dv. Kishuara)- Emp. PE-3S (Alfapata) entre el km 680+000 al km 732+950 se refleja en los valores del IRI, al realizar la recarga de material en una el IRI mejora y se reduce al 33.2 % de su valor inicial, el deterioro de la calzada tiene implicancia en la velocidad de los carros, la cual disminuye en un 9.5 % debido al deterioro de la calzada. Conclusión: El IRI (Índice internacional de Rugosidad) aumenta su valor con el transcurrir del tránsito en una razón de 10.8 % sobre su valor anterior mensual. La contrastación de las Hipótesis mediante el procesamiento de datos muestra que la hipótesis planteada está acorde con lo obtenido en la investigación.



También Aza Morales (2009) tesis de maestría, objetivo: Establecer factores que afectan procedimientos de Gestión Vial en la conservación de la Infraestructura Regional, para lograr eficiencia y eficacia en el manejo del sistema de infraestructura vial permitiendo un servicio adecuado a los usuarios, garantizando una transitabilidad permanente en la región de Puno. Metodología: el trabajo corresponde a una investigación descriptiva, siendo que se expondrá la información resumida de la normatividad y documentación técnico administrativa necesaria y disponible en instituciones del estado y privadas, transversal cuando se requiera el énfasis del detalle, comparativa, por que otros países y otras regiones han logrado positivas experiencias que pueden adecuarse a la conservación vial regional, no aleatoria, por las características del modelo estadístico a utilizarse. Por la diversidad de las variables en las hipótesis planteadas se aplicó la técnica de análisis de regresión múltiple, utilizando el Paquete estadístico SAS (Statistica Analysis System), versión 8.00. Resultados: De acuerdo al análisis de varianza se observa que las variables X5 (Nivel de servicio) y X6 (IRI), son las que mayormente explican la causa del deterioro de la red vial departamental de la jurisdicción regional, cuyo coeficiente de determinación alcanza a $R^2 = 64.93\%$. Conclusión el deterioro de la red vial departamental en la jurisdicción de la región Puno, donde predominan condiciones climáticas muy severas al ser sometido al modelo de análisis de regresión múltiple, considerando variables de incidencia en cada una de las vías que componen la red vial departamental, comprueban la hipótesis planteada y corrobora la importancia de las variables que corresponde al nivel de servicio de la vía o tramo seleccionado, variable que tiene relación directa con el usuario de la vía por que el objetivo principal



es garantizar una transitabilidad permanente a satisfacción del usuario, así mismo de la variable que corresponde a la determinación del índice de rugosidad internacional, indicador que supone la aplicación de una escala de determinación de los valores de rugosidad en función de las condiciones de transitabilidad y la velocidad directriz de cada tramo para las características propias de la Región Puno. Recomendación: para el cumplimiento de los objetivos de garantizar una adecuada transitabilidad de la red vial departamental de la jurisdicción regional, es preciso actualizar o generar información técnica respecto a las condiciones de transitabilidad de cada una las vías que constituyen la red departamental, así como de los índices de rugosidad, acción que permitirá establecer las metas de mediano plazo en la implementación de proyectos de intervención vial con la consecuente recuperación del patrimonio vial regional.

2.1.2. Conservación vial.

2.1.2.1. Gestión de conservación vial.

El manual de carreteras mantenimiento o conservación vial del ministerio de transportes y comunicaciones Perú MTC (2016), define la gestión de conservación vial, como la realización de un conjunto de actividades integradas tales como la definición de políticas, planificación, organización, financiamiento, ejecución, control y la operación, para lograr una conservación vial que asegure la economía, fluidez, seguridad y la comodidad de los usuarios viales. La conservación vial es un proceso que involucra actividades de obras e instalaciones que se realizan de manera permanente o continuo en los tramos conformantes de una red vial.



Así también, el manual respecto a las actividades de conservación vial, indica que la conservación de carreteras constituye el principal modo que una entidad lleva a cabo su objetivo de proporcionar al usuario, una vía en adecuadas condiciones de transitabilidad. La conservación vial tiene propósito preventivo que sintetiza en los siguientes aspectos: mantener la continuidad del servicio ofrecido por la infraestructura vial; mantener la continuidad del servicio ofrecido durante el periodo de operación de la carretera, con un nivel de servicio adecuado en cuanto a seguridad y confort para los usuarios. En este caso el nivel de servicio está referido a una medida de calidad, que en relación al confort y seguridad se refiere a la regularidad superficial y adherencia de la superficie de rodadura, así como la señalización y los elementos de seguridad.

2.1.2.2. Gestión de calidad de proyectos carreteros.

Rodríguez (2011) describe que en la actualidad la gestión de calidad para la construcción de carreteras es un tema que debe ser prioridad en las políticas estatales para promover la durabilidad en la infraestructura vial y el buen servicio de las redes de carreteras, así como el ahorro de recursos públicos. La actividad económica y el desarrollo social de los países y regiones dependen de una red de carretera funcional y que resista más tráfico por mas años. Sin embargo, en ocasiones no se da una gestión de calidad adecuada que garantice la durabilidad de los proyectos, lo cual puede provocar que un tiempo después, el proyecto presente problemas de calidad, funcionamiento o vicios ocultos.

La gestión se refiere a las funciones gerenciales para alcanzar metas y objetivos deseables en el proyecto vial, las cuales implican en su orden el planeamiento, organización, dirección, control y ajuste. La calidad se refiere a características del producto o servicio que dan beneficio a los usuarios de las carreteras, tales como comodidad, ahorro, durabilidad, buena apariencia, etc. Entonces la gestión de calidad es un proceso proactivo donde se ejecutan tareas como planear objetivos, organizar como hacer inspecciones y verificaciones, ejecutar continuamente revisiones y realizar ensayos para alcanzar suficiente calidad. El aseguramiento de la calidad es una alternativa de gestión que es proactiva y preventiva para desarrollar proyectos viales, porque define objetivos previos y evaluaciones previas para evitar que sucedan defectos en la construcción o conservación vial. La gestión de calidad de proyectos viales es un reto principal para lograr eficiencia y ahorro en las inversiones de obra carretera, que demanda un esfuerzo de planeamiento y de control especial de los proyectos.



Figura N° 5: Proceso de gestión de calidad para proyectos viales.

FUENTE: Rodríguez, 2011.



2.1.3. Influencia de la regularidad superficial en carreteras.

Sánchez, Martínez y Tejada (2018) describe que una adecuada regularidad de la superficie de carreteras brinda condiciones de comodidad y seguridad para los usuarios. Una mala regularidad, además de afectar los aspectos anteriores, refleja daños, deterioro de carácter funcional y estructural de la vía, que influyen negativamente en su estado de condición y vida útil. El índice de regularidad internacional (IRI) surgió como una necesidad de unificar los criterios para la medición de la regularidad superficial de las carreteras, constituyendo hoy en día en uno de los parámetros de mayor aceptación y utilización para medir el deterioro superficial de las carreteras. Permite valorar la calidad del estado de las vías, siendo utilizado tanto para el diseño como para la planificación de la conservación y mantenimiento de los mismos.

También, Sánchez y Solminihaç (1989) indica que la regularidad es la característica que más influye en las sensaciones de confort y seguridad que experimenta un usuario al circular por una carretera. Cabe destacar que la regularidad superficial es mucho más valorada por el conductor que la capacidad portante en sí y que esta última tan solo le interesa en cuanto incide en la primera, por la aparición de baches y otras deformaciones. Así mismo, el técnico en la administración de carreteras también muestra un especial interés por el estado de la regularidad superficial. Esta repercute en forma importante en los gastos de transporte y mantenimiento de la red vial y además proporciona una indicación del estado de una vía recién terminada y puede usarse como índice de calidad en la recepción de carreteras nuevas. La regularidad superficial es un parámetro que depende primordialmente del



perfil longitudinal de la superficie de carretera, así también depende de las características mecánicas de los vehículos y la velocidad de circulación de estos.

Por otro lado, Badilla (2009) menciona que conocer la regularidad superficial de la carretera desde el inicio de su periodo de servicio o en cualquier momento de la vida útil, permitirá definir las acciones de conservación o rehabilitación necesaria en el momento pertinente. El indicador Índice de Regularidad Internacional (IRI) es geográficamente transferible, repetible y estable con el tiempo, que se ha convertido en una medición atractiva y conveniente para el control de calidad de la construcción de nuevas carreteras. Además de permitir evaluar la regularidad superficial de la carretera y reflejar el confort y seguridad de los usuarios, garantiza indirectamente el desempeño estructural de la carretera.

Así también, Badilla (2008) señala que el desempeño funcional de la infraestructura vial, además de garantizar condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las carreteras, repercute en aspectos económicos, relacionados con los costos de operación de los vehículos y el mantenimiento de carreteras. Diferentes investigaciones realizadas revelan que los costos de operación de los vehículos dependen de la magnitud de las irregularidades superficiales de la vía, afectando la velocidad de circulación, el desgaste de las llantas y el consumo de combustible. Los efectos dinámicos producidos por las irregularidades de las carreteras, pueden reflejarse no sólo en los vehículos, sino también en modificaciones de estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura de la vía, lo que puede incrementar los costos en las actividades de conservación y rehabilitación. Por estas razones, conocer



la regularidad superficial de la carretera en cualquier momento desde el inicio de su periodo de servicio o en cualquier momento de la vida útil, permitirá definir las acciones de conservación o rehabilitación necesarias en el momento pertinente.

2.1.4. Índice de rugosidad internacional.

2.1.4.1. Definición.

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) es un indicador estándar de rugosidad en carreteras y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de la superficie de rodadura; está relacionado con el nivel de comodidad, seguridad y costos de operación. El IRI en términos prácticos se puede definir como la acumulación del movimiento vertical en valor absoluto que sufre la suspensión del neumático de un vehículo (un cuarto de carro) cuando este recorre la superficie de rodadura a una velocidad referencial de 80 km/h (Caro y Peña, 2012).

Las unidades del IRI son de longitud y se expresa en mm/m, m/km, in/mi, etc. (Sayers y Karamihas, 1998).

La American Society for Testing and Materials, define a la rugosidad como la desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de manejo, cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, el perfil longitudinal, perfil transversal. (ASTM E 867,2012)

Por otro lado, la rugosidad se define como las alteraciones del perfil longitudinal de una vía, que provocan vibraciones en los vehículos que lo recorren. Es la desviación de la superficie respecto a una superficie plana, con



dimensiones características que afectan la dinámica del vehículo y la calidad al andar. Se mide con el indicador denominado índice de rugosidad internacional, IRI, el cual se expresa en m/km. (I.N.V.E -790-07, 2007)

2.1.4.2. Reseña.

Montoya (2009) describe:

En la década de los 70 (1970), el Banco Mundial financió diferentes programas de investigación a gran escala, entre los cuales se encontraba un proyecto relacionado con la calidad de las vías y los costos a los usuarios, a través del cual se detectó que los datos de regularidad superficial de diferentes partes del mundo no podían ser comparados. Es más, los datos proporcionados por un mismo país no eran confiables, debido a que las mediciones fueron hechas con equipos y métodos que no eran estables en el tiempo.

Esta situación motivo al Banco Mundial a desarrollar el proyecto internacional Road Roughness Experiment (IRRE), en Brasil año de 1982, en la cual participaron equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, USA y Bélgica, donde se realizó la medición controlada de rugosidad superficial de pavimentos para un número de vías bajo diferentes condiciones y por una variedad de instrumentos y métodos. A partir de dicho proyecto se seleccionó un parámetro de medición de la rugosidad superficial, el cual satisface completamente los criterios de ser estable en el tiempo, transferible y relevante, denominado: Índice de Rugosidad Internacional IRI (International Roughness Index).

Al respecto, la definición teórica del IRI se estableció de la siguiente manera: El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie de camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico, está definido por el valor de referencia de pendiente promedio rectificadora producto de la simulación del modelo de cuarto de carro, para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h.

En tal sentido, podemos señalar que el IRI se estableció a partir de conceptos asociados a la mecánica vibratoria de los sistemas dinámicos, todo ello en base a un modelo que simuló el movimiento de la suspensión acumulada por un vehículo al circular por una determinada longitud de perfil de la carretera, a una velocidad estándar de 80 km /h.; esta hipótesis descrita es conocida como el modelo de cuarto de carro.

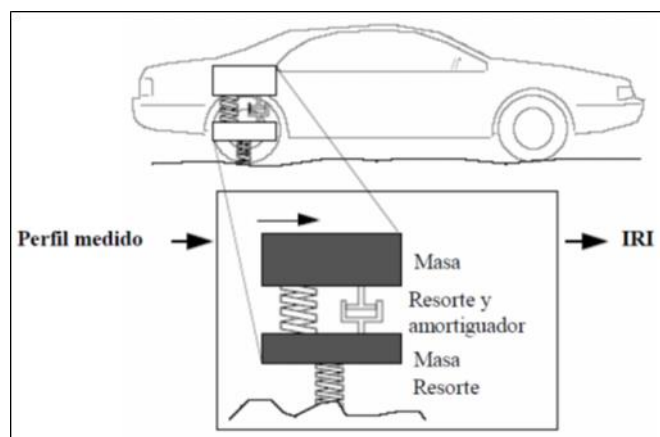


Figura N° 6: Modelo cuarto de carro.

FUENTE: Sayers y Karamidas,1988.

El parámetro IRI, constituye en la actualidad uno de los indicadores más importantes de control de programación, recepciones de obras de infraestructura vial, que directamente se ven reflejados en distintos factores como el nivel de comodidad, costos de operación para los usuarios, seguridad,

otros. Se tienen normativas que hacen referencia a la naturaleza y medición del IRI como la NLT-330/98, I.N.V.E. 794-07.

2.1.4.3. *Quarter Car Simulation, Modelo cuarto de carro.*

Sayers, Gillespie y Paterson (1986) indica, el modelo matemático para la determinación del índice de rugosidad internacional IRI, se basa en el modelo cuarto de carro o cuarto de coche. El modelo simula la cuarta parte de un auto ideal, con parámetros fijados para la medición.

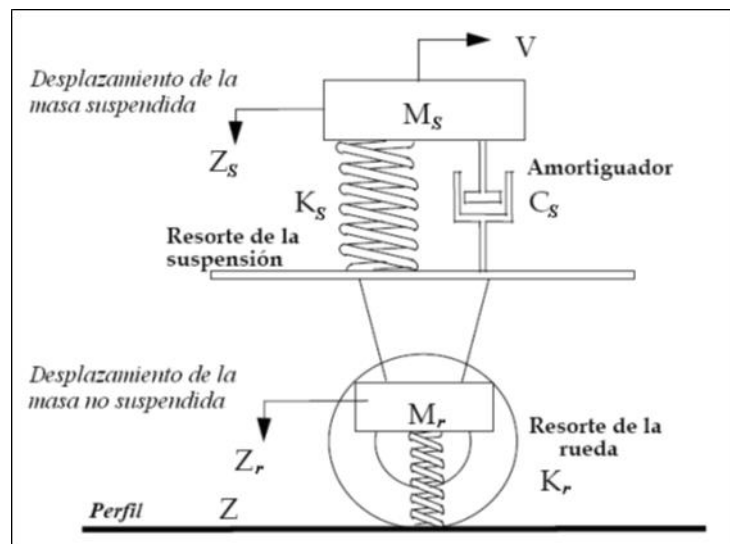


Figura N° 7: Modelo ideal cuarto de carro.

FUENTE: Badilla, 2009.

Donde:

M_s : Masa suspendida, representada por la masa del vehículo.

M_r : Masa no suspendida, representada por la masa de la rueda.

K_r : Resorte primario, representada por la rueda.

K_s : Resorte secundario, representada por la suspensión del vehículo.

C_s : Amortiguador.

El modelo de simulación consta de una masa amortiguada o suspendida (masa de un cuarto de carro ideal) conectada a una masa no amortiguada (eje y neumático) a través de un resorte y un amortiguador lineal (suspensión), el neumático es representado por resorte lineal. El banco mundial boletín N° 45 modelo cuarto de carro emplea los parámetros definidos, los cuales se muestran a continuación:

$$k_2 = \frac{K_s}{M_s} = 63.3 \text{ sec}^{-2}; \quad k_1 = \frac{K_r}{M_s} = 653 \text{ sec}^{-2}; \quad c = \frac{C_s}{M_s} = 6 \text{ sec}^{-1};$$
$$\mu = \frac{K_r}{M_s} = 0.15$$

Con el modelo definido, el concepto de IRI se materializa como la representación de un modelo matemático, que simula el movimiento de la suspensión acumulada por un vehículo (modelo de cuarto de coche Golden Car) al circular por una determinada longitud del perfil de carretera, a una velocidad estándar de 80 Km/h. Las unidades en las que se mide el IRI son m/Km o dm/Hm. (Wikipedia, 2019)

Sánchez y Solminihac (1989) menciona, el IRI en un punto de una carretera se define como la razón del movimiento relativo acumulado por la suspensión del vehículo tipo, dividido por la distancia recorrida por dicho vehículo. El modelo matemático de vehículo que se utiliza está representado en la Figura N° 7. Si se conoce el perfil longitudinal de la carretera y (x), y la velocidad a la que circula el automóvil V, se puede calcular en cada punto el movimiento z1 y z2 de cada una de las masas m1 y m2, que componen el modelo.

2.1.4.4. Escalas del IRI.

Para la escala de medición IRI la norma ASTM E 1926 presenta dos escalas de valores de índice de rugosidad internacional, una para vías pavimentadas y otra para vías no pavimentadas, cada una de estas con descripción verbal.

El Banco Mundial presenta una escala de rugosidad (índice de rugosidad internacional IRI) por diferentes tipos de vías.

Tabla N° 1: Normativa para el control de IRI por tipo de superficie

NORMATIVA U ORGANIZACIÓN	Requerimientos de IRI por tipo de superficie	
	Descripción	Superficie
ASTM E 1926-98	IRI obtenido en sub lotes de 0.1 km	Presenta dos escalas de valores IRI con descripción verbal, una para vías pavimentadas y otra para no pavimentadas.
BANCO MUNDIAL	Promedio global de toda la medición	Presenta una escala de rugosidad para diferentes tipos de vías.

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Se muestran a continuación las escalas de medición según la American Society for Testing and Materials ASTM E 1926 y el Banco Mundial.

ASTM E 1926 American Society for Testing and Materials

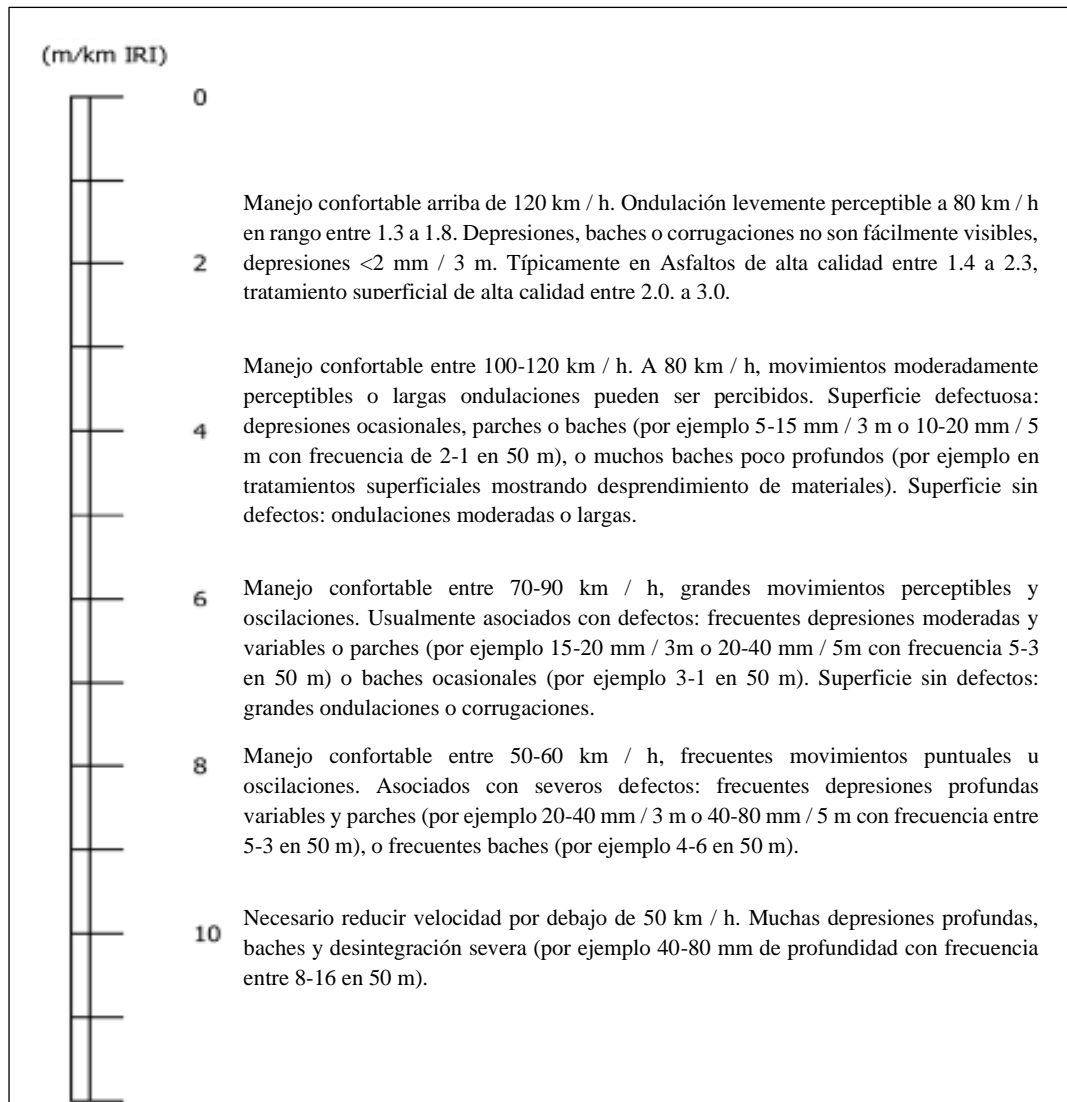


Figura N° 8: Escala de estimación de rugosidad de vías para carreteras pavimentadas con concreto asfáltico o tratamiento superficial.

FUENTE: Adaptado de ASTM E 1926-08, Reapproved 2015.

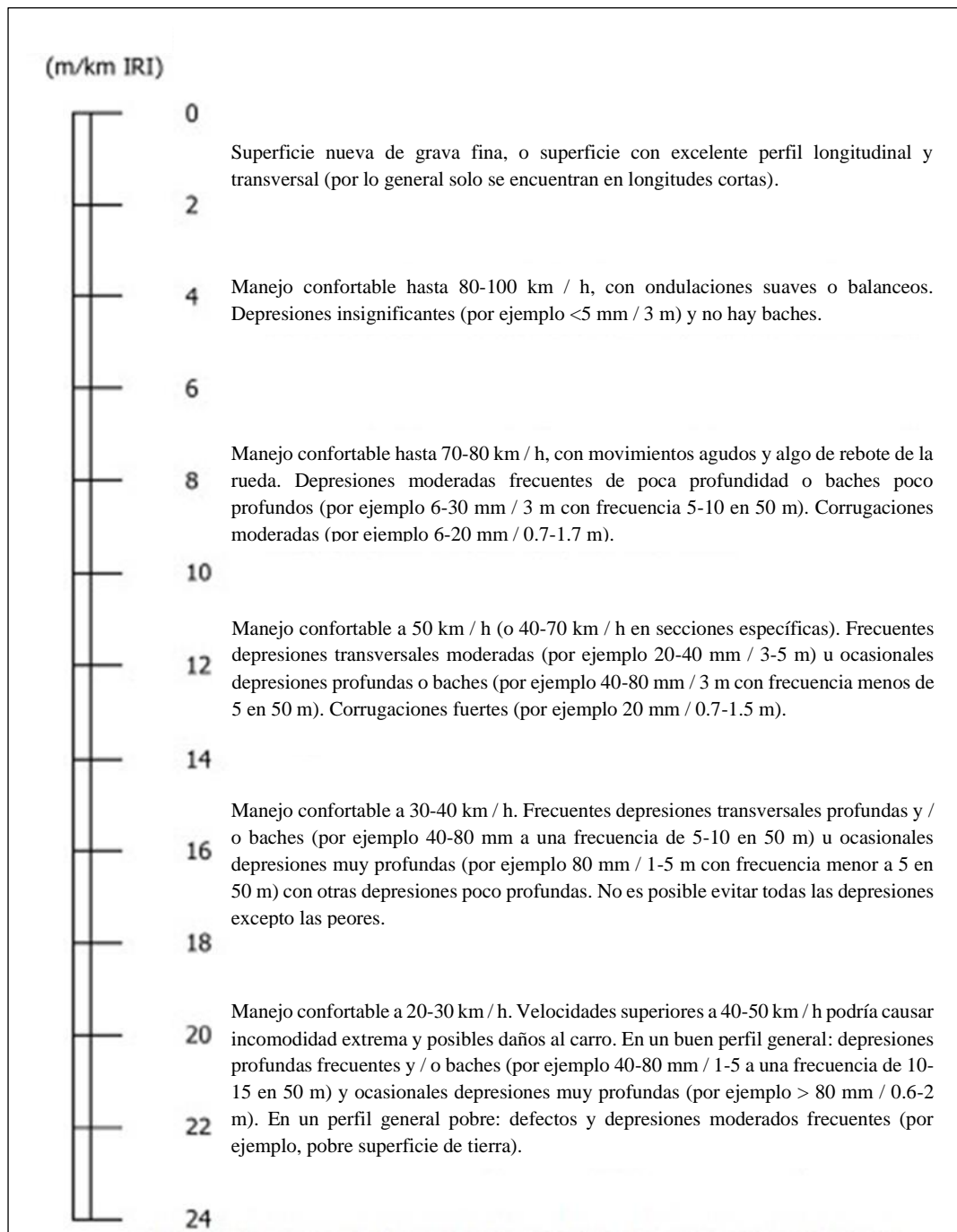


Figura N° 9: Escala de estimación de rugosidad de vías para carreteras sin pavimentar con grava o superficies de tierra.

FUENTE: Adaptado de ASTM E 1926-08, Reapproved 2015.

Banco mundial

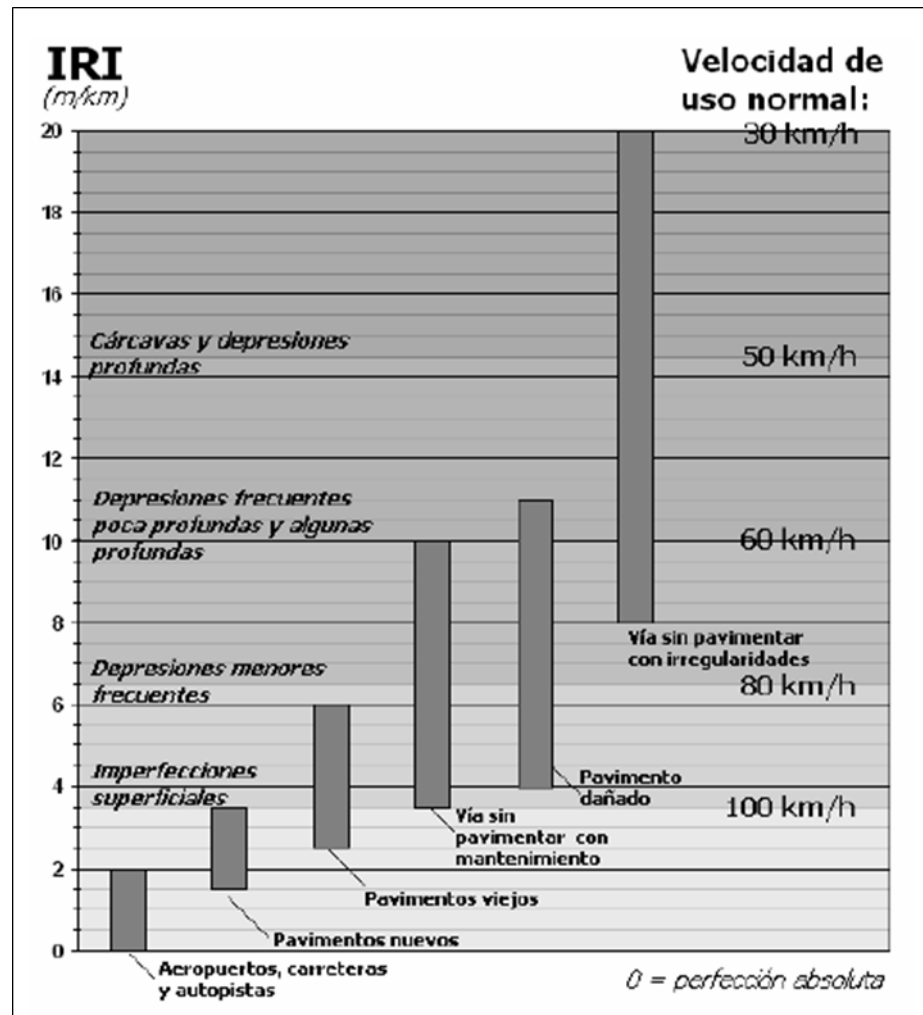


Figura N° 10: Escala estándar del Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferente tipos de carreteras.

FUENTE: Sayers, Gillespie y Queiroz, 1986.

2.1.4.5. Clasificación de equipos para la medición del IRI.

Existen una variedad de equipos para la medición de la rugosidad. Los diversos métodos existentes fueron agrupados en cuatro categorías, en base a la exactitud en los valores resultantes del IRI. (ICC Laser y KJ Law, 1988).

En la siguiente tabla se muestra la clasificación según el banco mundial y la norma ASTM.

Tabla N° 2: Clasificación de equipos de medición del IRI

CLASIFICACIÓN DE EQUIPO	CLASIFICACIÓN SEGÚN BANCO MUNDIAL, BOLETÍN TÉCNICO N° 46	CLASIFICACIÓN SEGÚN ASTM E-950-98	E-
	REQUERIMIENTOS	INTERVALOS LONGITUDINALES DE ALMACENAMIENTO DE DATOS	RESOLUCIÓN DE MEDICIONES VERTICALES
Clase 1	Perfilómetros de precisión. Requiere que el perfil longitudinal de un camino sea medido como una serie de puntos de elevación equidistantes a través de la huella o rodera de la vía para calcular el IRI. Esta distancia no debería superar los 0.25 mm y la precisión en la medición de la elevación debería de ser 0.5 mm para pavimentos que posean valores de IRI entre 10 y 20 m/km.	Menor o igual a 25 mm.	Menor o igual a 0.1 mm.
Clase 2	Otros métodos perfilométricos. Requieren una frecuencia de puntos de perfil, no superior a 0.5 m y una precisión en la medición de la elevación comprendida entre 1.0 mm para pavimentos que posean valores de IRI entre 1 y 3 m/km y 6.0 mm para pavimentos con valores de IRI entre 10 y 20 m/km.	Mayor que 25 mm. hasta 150 mm.	Mayor que 0.1 mm. hasta 0.2 mm.
Clase 3	IRI estimado mediante ecuaciones de correlación. La obtención del perfil longitudinal se hace mediante equipos tipo respuesta (RTRRM), los cuales han sido calibrados previamente con perfilómetros de precisión mediante ecuaciones de correlación.	Mayor que 150 mm. hasta 300 mm.	Mayor que 0.2 mm. hasta 0.5 mm.
Clase 4	Estimaciones subjetivas y mediciones no calibradas. Incluyen mediciones realizadas con equipos no calibrados, estimaciones subjetivas con base en la experiencia en la calidad de viaje o inspecciones visuales de las carreteras.	Mayor que 300 mm	Mayor que 0.5 mm

FUENTE: ICC Laser y KJ Law, 1988, The Little Book of Profiling: Basic information about measuring and interpreting road profiles.

2.1.4.6. Equipos para la medición de la rugosidad.

Badila (2009) existen diferentes equipos para medir la rugosidad superficial, clasificado de acuerdo a sus precisiones, aplicaciones, grado de complejidad.

Tabla N° 3: Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial

EQUIPO	GRADO DE PRECISIÓN	APLICACIONES	COMPLEJIDAD DEL EQUIPO	OBSERVACIONES
Nivel y mira topográfica	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Simple	Poco práctico y costos muy elevados para proyectos largos
Dipstick	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Muy Simple	Poco práctico y costos elevados para proyectos largos
Perfilógrafos	Medio	Control de calidad y recepción de obras	Simple	No son prácticos para evaluar la condición a nivel de red
Equipos tipo respuesta (RTRRMS)	Medio	Monitoreo de carreteras a nivel de red	Compleja	Los resultados no son transportables ni estables en el tiempo, pues dependen de la dinámica particular del movimiento del vehículo
Perfilómetro inercial	Muy alto	Monitoreo de carreteras a nivel de red y recepción de proyectos viales	Muy Compleja	Equipo de alta precisión, cuyos resultados son transportables y estables en el tiempo. Su principal uso es la evaluación de red viales grandes

FUENTE: Badilla, 2009.

2.1.5. Normativas para evaluar IRI.

2.1.5.1. Normativas internacionales para la medición del IRI.

Montoya (2013) indica, en la actualidad existen diversas organizaciones que han normalizado las mediciones de rugosidad (IRI) entre ellas destacan AASHTO, ASTM y FWHA y el Banco Mundial quien finalmente es el principal agente interesado en la implementación de la

aplicación de IRI en la administración de carreteras. Sin embargo, estas agencias solo llegaron a definir más que todos los procedimientos de medición o escalas de valores, los cuales deberían compararse las mediciones en función a la clasificación de la vía o tipo de superficie. Sobre la metodología de medición, la FWHA y el Banco Mundial referencian al IRI promedio como el valor absoluto representativo de la medición en una vía determinada.

A continuación, se presenta un cuadro resumen de las normativas dadas por los organismos internacionales para la medición de IRI:

Tabla N° 4: Normativas internacionales para el control de IRI

NORMATIVA U ORGANIZACIÓN	Requerimientos de IRI según tipo de superficie			
	Descripción	Carpeta asfáltica	Concreto hidráulico	Tratamiento superficial
ASTM E 1926-98	IRI obtenido en sub-lotes de 0.1 km	Presenta dos escalas de valores de IRI con descripción verbal, una para vías pavimentadas y otra para no pavimentadas.		
AASHTO PP-37-02	No especifica	No especifica.		
FFWHA	Promedio de los valores de IRI determinado en cada huella cada 100 metros	No especifica.		
BANCO MUNDIAL	Promedio global de toda la medición	Presenta una escala de rugosidad para diferentes tipos de vial.		

FUENTE: Montoya, 2013.

2.1.5.2. Normativa de otros países respecto a la metodología de control del

IRI.

El siguiente cuadro resume los IRI requeridos de diferentes países como Chile, España, Canadá, Suecia, el salvador, Sieca, Eslovenia, Portugal, cada una adaptadas a su propia realidad.

Tabla N° 5: Normativa de otros países para el control de IRI

PAÍS	Requerimientos de IRI según tipo de superficie			
	Metodología	Carpeta Asfáltica	Concreto hidráulico	Tratamiento superficial
Ministerio de Obras Públicas de Chile	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos de 200 mts. De secciones homogéneas (Media Móvil)	promedio de 5 secciones ≤ 2 m/km		promedio de 5 secciones ≤ 3.0 m/km
		promedio individual ≤ 2.8 m/km		promedio individual ≤ 4.0 m/km
	Recepción de Obra Nueva			
	No se indica el intervalo de medición	$IRI \leq 1.5$ m/km, en 50% de los datos	$IRI \leq 2.0$ m/km, en 50% de los datos	$IRI \leq 2.4$ m/km, en 50% de los datos
		$IRI \leq 1.9$ m/km, en 85% de los datos	$IRI \leq 2.5$ m/km, en 85% de los datos	$IRI \leq 2.9$ m/km, en 85% de los datos
		$IRI \leq 2.3$ m/km, en 99% de los datos	$IRI \leq 2.8$ m/km, en 99% de los datos	$IRI \leq 3.4$ m/km, en 99% de los datos
Ministerio de Fomento de España	IRI obtenido en tramos de 100 mts.	$IRI < 1.5$ m/km, en 50% de las secciones del proyecto		
		$IRI < 2$ m/km, en 80% de las secciones del proyecto		
		$IRI < 2.5$ m/km, en 100% de las secciones del proyecto		
Estados Unidos WisDOT	IRI obtenido en tramos de 1.609 km (1 milla)	IRI (m/km) Tiempo		
		<1.1	Pav. nuevo	
		<1.17	1 año	
		<1.29	2 años	
		<1.33	3 años	
		<1.37	4 años	
Canadá	IRI obtenido en tramos de 100 mts.	$IRI < 1.2$ m/km, en 70% de los datos		
		$IRI < 1.4$ m/km, en 100% de los datos		



Suecia	IRI obtenido en tramos de 100 mts.	$IRI \leq 1.4$ m/km	
	IRI obtenido en tramos de 20 mts.	$IRI \leq 2.4$ m/km	
Ministerio de Obras Públicas de el Salvador	PARA CAMINOS RURALES: IRI obtenido en tramos de 100 mts.	IRI no mayor a 3.0 m/km	
	PARA CAMINOS INTERESTATALES: IRI obtenido en tramos de 100 mts.	IRI no mayor a 2.0 m/km	IRI no mayor a 2.5 m/km
SIECA 2004	IRI obtenido en tramos de 100 mts.		
CR - 2002	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con un intervalo de medición de 200 m	promedio de 5 secciones ≤ 2.0 m/km	
		promedio individual ≤ 3.0 m/km	
Eslovenia	Carretera de alto tránsito		
	IRI obtenido en tramos de 20 mts.	$2.0 \leq IRI \leq 2.6$ m/km	
	IRI obtenido en tramos de 100 mts.	$1.2 \leq IRI \leq 1.8$ m/km	
	Carretera de bajo tránsito		
Portugal	No se indica el intervalo de medición	IRI ≤ 1.5 m/km, en 50% de los datos	
		IRI ≤ 2.0 m/km, en 50% de los datos	
		IRI ≤ 2.5 m/km, en 80% de los datos	
		IRI ≤ 2.5 m/km, en 75% de los datos	
		IRI ≤ 3.0 m/km, en 90% de los datos	
		IRI ≤ 3.0 m/km, en 100% de los datos	

FUENTE: Ventura y Alvarenga, 2005. Programa de infraestructura del transporte, 2014.

2.1.5.3. Normativa Peruana.

El manual de suelos, geología, geotécnica y pavimentos - MTC (2014) indica que la satisfacción de los usuarios se manifiesta, fundamentalmente por la calidad en que se encuentra la superficie de rodadura y los elementos que constituyen la seguridad vial. A continuación, se presenta un gráfico (traducido y adaptado de “Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements”, Sayers M.W., Gillespie T.D., Peterson W.D; World Bank Technical Paper Number N° 46, 1986), donde se muestra escalas de rugosidad para distintos tipos de pavimento y condición.

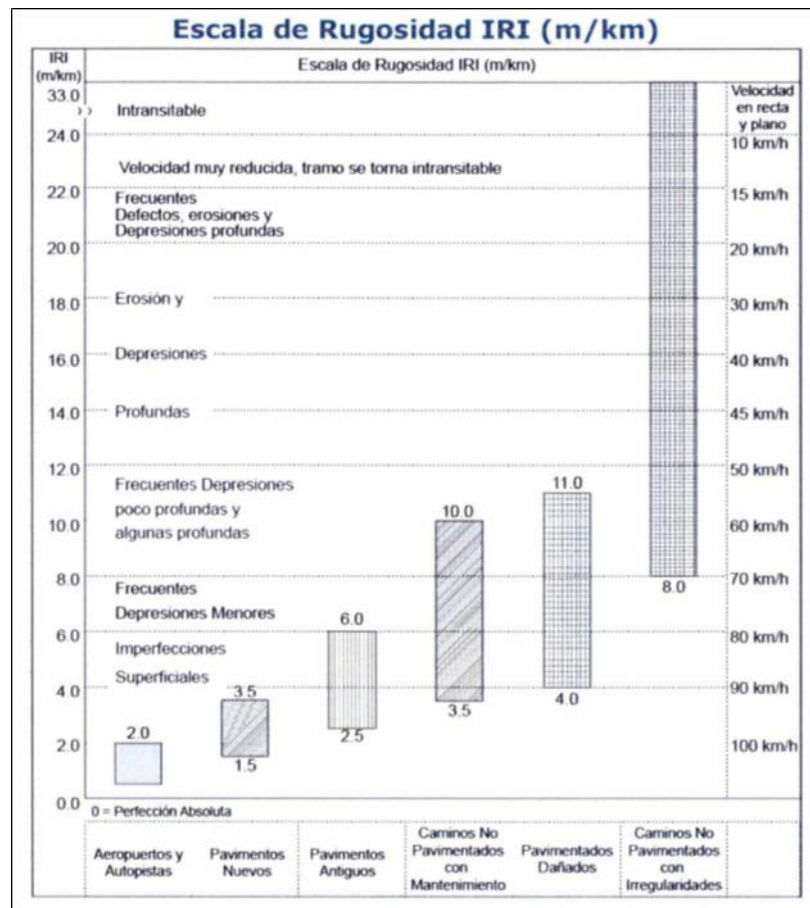


Figura N° 11: Escala de rugosidad IRI (m/km).

FUENTE: MTC,2014.

El manual de carreteras mantenimiento o conservación vial – MTC (2016). En su capítulo 3 niveles de servicio, componente 2 para la conservación de la calzada de afirmado, presenta la siguiente tabla donde muestra los parámetros del índice de rugosidad internacional IRI.

Tabla N° 6: Parámetros para contratos por niveles de servicio, calzada de afirmado

Parámetro	Medida	Nivel de Servicio
Deformación	Porcentaje máximo de área con deformaciones mayores 50 mm.	5%
Erosión	Porcentaje máximo de área con erosión mayor a 50 mm	10%
Baches (Huecos)	Porcentaje máximo de área con baches (huecos)	0%
Encalaminado	Porcentaje máximo de área con encalaminado	10%
Lodazal y cruce de agua	Porcentaje máximo de áreas con lodazal y cruces de agua	5%
Rugosidad obras nuevas	Rugosidad característica del tramo obra nueva	5.0 IRI _c (*)
Rugosidad con mantenimiento periódico	Rugosidad característica del tramo con mantenimiento periódico	6.0 IRI _c (*)
Rugosidad durante el periodo de servicio	Rugosidad característica del tramo en periodo de servicio	8.0 IRI _c (*)

(*) IRI característico (IRI_c), a la confiabilidad de 70%
 $IRI_c = IRI_p + 0.524 \times d_s$
IRI_p = IRI promedio
d_s = desviación estándar

FUENTE: MTC,2018.

Así también, el **manual de procedimientos para la formulación de planes viales departamentales participativos (2003)**, muestra el siguiente cuadro, donde describe el IRI aproximado para la calificación del estado de la superficie de rodadura.

Tabla N° 7: Calificación del estado de la superficie de rodadura.

Estado de superficie de rodadura		IRI aproximado		Criterios
		Camino no pavimentado	Camino pavimentado	
Muy mal estado	MM	>14.0	>7.5	<ul style="list-style-type: none"> Inaccesible, o de acceso muy restringido durante ciertos periodos del año. Cunetas, muros de contención no existen. Alcantarillas, badenes, o puentes se encuentran en muy mal estado, son impasables o no existen. La velocidad de circulación es menor a 20 kilómetro por hora en tramos rectos.
Mal estado	M	10.0-14.0	6-7.5	<ul style="list-style-type: none"> La superficie de rodadura presenta baches y hundimientos. Si existen cunetas y alcantarillas tienen materiales que obstruyen la libre circulación del agua. Los puentes, pontones y badenes requieren limpieza de cauce y reparaciones presentan problemas de erosión o sedimentación. No es transitable en ciertas épocas del año. La velocidad de circulación es menor a 30 kilómetro por hora en tramos rectos.
Regular estado	R	6.0-10.0	3.5-6.0	<ul style="list-style-type: none"> Poca cantidad de baches y hundimientos. Algunas cunetas y alcantarillas están obstruidas. Los puentes, pontones y badenes se encuentran en regular estado (con problemas de erosión o sedimentación). Se puede transitar todo el año (intransitablemente solamente por periodos cortos). La velocidad de circulación es aproximadamente entre 20 y 40 kilómetros por hora en tramos rectos
Buen estado	B	4.0-6.0	2.0-3.5	<ul style="list-style-type: none"> La superficie de rodadura es regular con muy pocos baches y hundimientos. Posee cunetas, alcantarillas, muros de contención y puentes en buen estado y limpios. Se puede transitar todo el año. La velocidad de circulación es aproximadamente entre 40 y 60 kilómetros por hora en tramos rectos.
Muy buen estado	MB	2.0-4.0	1.5-2.0	<ul style="list-style-type: none"> Superficie de rodadura sin defectos (sin bahes ni hundimientos). Todas las obras de arte limpias y en buen estado (cunetas, alcantarillas, puentes o pontones). Se puede transitar todo el año. La velocidad de circulación puede llegar a ser mayor a 60 kilómetros por hora en tramos rectos.

FUENTE: Manual de procedimientos para PVDP, 2003.

2.1.6. Cálculo del índice de rugosidad internacional IRI.

El Banco Mundial, World Bank Technical Paper Number 45 y 46 (1986), propone la metodología, programa y ecuaciones para la obtención del índice de rugosidad internacional IRI, como se detalla a continuación:



2.1.6.1. Ecuaciones.

El cálculo del IRI se realiza computando cuatro variables como las funciones del perfil longitudinal. Estas cuatro variables simulan la respuesta dinámica de un vehículo durante el recorrido sobre el perfil medido. Se resuelven las ecuaciones para las cuatro variables y para cada punto de elevación medido, salvo el primer punto. La pendiente media encima de los primeros 11 m (0.5 sec a 80 kmlh) se usa para inicializar las variables asignando los valores siguientes:

$$Z1 = Z3 = (Ya - Y1) / 11 \dots \dots \dots (1)$$

$$z2 = z4 = 0 \dots \dots \dots (2)$$

$$a = 11 / dx + 1 \dots \dots \dots (3)$$

donde Ya representa el punto de posición "a" del perfil de elevación, Y1 es el primer punto y dx es el intervalo de la muestra. (Así, para un intervalo de la muestra de dx = 0.25 m, la Ecuación 1 usaría la diferencia entre el 45^{avo} punto de elevación y el primer punto de elevación, estableciendo una pendiente inicial para el cómputo del IRI). En seguida, se resuelven las cuatro ecuaciones recursivas para cada punto de elevación, de 2 a n (n = número de medidas de elevación).

$$Z1 = s11 * Z'1 + s12 * Z'2 + s13 * Z'3 + s14 * Z'4 + P1 * Y' \dots \dots \dots (4)$$

$$Z2 = s21 * Z'1 + s22 * Z'2 + s23 * Z'3 + s24 * Z'4 + P2 * Y' \dots \dots \dots (5)$$

$$Z3 = s31 * Z'1 + s32 * Z'2 + s33 * Z'3 + s34 * Z'4 + P3 * Y' \dots \dots \dots (6)$$

$$Z4 = s41 * Z'1 + s42 * Z'2 + s43 * Z'3 + s44 * Z'4 + P4 * Y' \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

$$Y' = (Yi - Yi-1) / dx = \text{la pendiente de entrada} \dots \dots \dots (8)$$



Además:

$$Z'_j = Z_j \text{ de la posición anterior, } j = 1, 4, \dots \dots \dots (9)$$

s_{ij} y p_{ij} son coeficientes fijos para un intervalo de muestra dado, dx . Así, las Ecuaciones 4 - 7 se resuelven para cada posición a lo largo de la huella de rodadura. Después de que ellos se resuelven para una posición, la Ecuación 9 se usa para restablecer los valores de Z'_1 , Z'_2 , Z'_3 , y Z'_4 para la próxima posición.

También para cada posición, la pendiente rectificadora (RS) del perfil filtrado se computa como:

$$RS_i = (Z_3 - Z_1) / \dots \dots \dots (10)$$

La estadística del IRI es el promedio de la variable RS sobre la longitud del sitio. Así después de que las ecuaciones anteriores se han resuelto para todos los puntos del perfil, el IRI es calculado como:

$$IRI = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n RS_i \dots \dots \dots (11)$$

El procedimiento anterior es válido para cualquier intervalo de la muestra entre $dx = 0.25\text{m}$ y $dx = 0.61\text{m}$ (2.0 pies). Para los intervalos de muestra más cortos, el paso adicional es "suavizar" el perfil con un valor medio, se recomienda para representar bien la manera en que el neumático de un vehículo envuelve la tierra. La longitud base del intervalo es de 0.25 m de largo. El IRI puede calcularse entonces de dos maneras:

1) Los puntos de elevación que caen dentro de cada 0.25 m de longitud pueden promediarse para obtener un punto equivalente del perfil para el intervalo de 0.25 m. Entonces el IRI es calculado de las ecuaciones anteriores basadas en un intervalo de 0.25 m que usa los coeficientes para el intervalo de 0.25 m.



2) Un "promedio móvil" se obtiene como el promedio de todos los puntos que caen dentro de un intervalo centrado de 0.25 m en el punto de elevación del perfil. Entonces el IRI es calculado resolviendo las ecuaciones para cada punto promedio usando los coeficientes en las ecuaciones correspondientes al intervalo menor.

El algoritmo usado en el programa de computación del Banco Mundial, es válido para cualquier longitud base sobre el rango de 10 – 610 mm. Cuando dx es menor que 0.25 m, entonces se aplica el promedio móvil apropiado para la entrada. El IRI computado tendrá las unidades consistentes con aquellos usados para las medidas de elevación y para el intervalo de la muestra. Por ejemplo, si la elevación es medida en mm, y dx tiene unidades en m, entonces el IRI tendrá las unidades preferidas: $\text{mm/m} = \text{m/km} = \text{la pendiente} \times 10^3$

2.1.6.2. Programa de ejemplo para el cómputo del IRI.

El programa es escrito en lenguaje BASIC, y puede ejecutarse en casi cualquier microcomputador. Sin embargo, las órdenes específicas en lenguaje BASIC varían ligeramente para diferentes computadoras y puede ser necesario modificar ligeramente algunas declaraciones para su funcionamiento. El algoritmo usado en el programa incluye un ajuste para los intervalos cortos, y es válido para cualquier intervalo entre 10 y 610 mm.

El programa fue desarrollado en lenguaje BASIC porque está más ampliamente disponible en las computadoras pequeñas (programables), y porque puede ser entendido por personas con poco o ningún conocimiento de programación. No es muy rápido o eficaz para el cómputo del IRI, sin embargo, podría merecer traducirlo a un lenguaje más eficiente, para manejar grandes



volúmenes de datos, que con este programa de ejemplo, se invertiría mucho tiempo computando el IRI.

El programa empieza poniendo valores de constantes, en las líneas 1040 - 1140. DX es el intervalo de la muestra y debe tener unidades en metros. La serie de ST es la matriz de declaración que contiene los coeficientes de S_{ij} de las Ecuación 4 - 7, y PR contiene los coeficientes de P_j usados en esas ecuaciones. El valor para DX y los 20 coeficientes de ST y PR, son contenidas en las declaraciones DATA al final del programa, en las líneas 1510 - 1550, K es el número de puntos del perfil usado para computar la entrada de la pendiente, y BL es la longitud base. Cuando DX es más grande que 0.25 m, entonces se usan sólo 2 puntos de elevación para computar la pendiente (Ec. 8), y la longitud base es necesariamente igual a DX. Para los valores menores de DX, K puede ser mayor que 2, y el promedio móvil "suavizado" es incorporado en el cálculo de la pendiente. Si se usa un intervalo de muestra diferente se usa, entonces las líneas 1510- 1550 deben reemplazarse con el intervalo de la muestra correcto y los coeficientes correspondientes.

Las variables usadas en el programa son las cuatro variables del vehículo guardadas en la matriz Z (Z_1, Z_2, Z_3 y Z_4 en las Ec. 1 - 7), los valores anteriores se guardaron en la matriz Zl (Z'_1, Z'_2, Z'_3 , y Z'_4 en las Ec. 1 - 7), la pendiente acumulada RS, y los contadores IX y I. Cuando DX es mayor que 0.25 m, entonces IX y I son iguales, y son proporcionales a la distancia recorrida.

```
1000 REM Programa para el cómputo del IRI.
1010 REM Programa es escrito en lenguaje BASIC.
1020 REM Ejecutable en computadoras o calculadoras programables.
1030 REM -----Se inicializa las constantes.
1040 DIM Y(26),Z(4),Z1(4),ST(4,4),PR(4)
1050 READ DX
1060 K = INT (.25 / DX + .5) + 1
1070 IF K < 2 THEN K = 2
1080 BL = (K - 1) * DX
1090 FOR I = 1 TO 4
1100 FOR J = 1 TO 4
1110 READ ST(I,J)
1120 NEXT J
1130 READ PR(I)
1140 NEXT I
1150 REM -----Se inicializa las variables.
1160 INPUT "Elevación del perfil a 11 m del inicio:", Y(K)
1170 INPUT "X = 0. Elevación = ", Y(1)
1180 Z1(1) = (Y(K) - Y(1)) / 11
1190 Z1(2) = 0
1200 Z1(3) = Z1(1)
1210 Z1(4) = 0
1220 RS = 0
1230 IX = 1
1240 I = 0
1250 REM ----Bucle para entrada del perfil y Cálculo de Rugosidad.
1260 I = I + 1
1270 PRINT "X = ";IX * DX,
1280 IX = IX + 1
1290 INPUT "Elevación = ": Y(K)
1300 REM -----Cómputo de la pendiente de entrada.
1310 IF IX < K THEN Y(IX) = Y(K)
1320 IF IX < K THEN GOTO 1270
1330 YP = (Y(K) - Y(1)) / BL
1340 FOR J = 2 TO K
1350 Y(J-1) = Y(J)
1360 NEXT J
1370 REM -----Simulación de la contestación del vehículo.
1380 FOR J = 1 TO 4
1390 Z(J) = PR(J) * YP
1400 FOR JJ = 1 TO 4
1410 Z(J) = Z(J) + ST(J,JJ) * Z1(JJ)
1420 NEXT JJ
1430 NEXT J
1440 FOR J = 1 TO 4
1450 Z1(J) = z(J)
1460 NEXT J
1470 RS = RS + ABS (Z(1) - Z(3))
1480 PRINT "desp = ";RS * DX, "IRI = ";RS / I
1490 GOTO 1260
1500 END
1510 DATA .25
1520 DATA .9966071, .01091514, -.002083274, .0003190145, .005476107
1530 DATA -.5563044, .9438768, -.8324718, .05064701, 1.388776
1540 DATA .02153176, .002126763, .7508714, .008221888, .2275968
1550 DATA 3.335013, .3376467, -39.12762, .4347564, 35.79262
```

Figura N° 12: Programa para cálculo de IRI.

FUENTE: Banco Mundial, 1986.

Las líneas 1260 - 1360 computan la pendiente de entrada de los puntos de elevación entrados. La serie Y es un buffer usado para el almacenamiento temporal de 26 puntos del perfil. Sólo los primeros elementos K se usan siempre, sin embargo. Así, cuando DX es 0.25 m o mayor, el cual será el caso para la mayoría de las aplicaciones dónde el perfil es medido manualmente, $K=2$ y sólo los primeros dos elementos en la serie de Y serán necesarios. Para los intervalos de muestra muy cortos, sin embargo, el buffer Y se necesita para el promedio



móvil. Cuando $DX = 0.01$ m, entonces se usan los 26 elementos en el buffer Y.
Las líneas 1380- 1490 son traducciones directas de las Ec. 4- 10.

2.1.6.3. Tablas de coeficientes para las ecuaciones del IRI.

Los coeficientes a ser usados en las Ec. 4 - 7 y en el ejemplo de programa de cómputo del IRI dependen del intervalo con el cual se han obtenido las medidas de elevación. los valores de los coeficientes a los intervalos normalmente usados, que son convenientes para la medida manual del perfil es:

Tabla N° 8: Coeficientes para las ecuaciones del IRI

dx (mm)	dt (seg)	ST				PR
50	0.00225	0.9998452	0.002235208	0.000106255	1.4764E-06	4.85889E-05
		-0.1352583	0.9870245	0.07098568	0.01292696	0.06427258
		0.001030173	9.84266E-05	0.9882941	0.002143501	0.01067582
		0.8983268	0.08617964	-10.2297	0.9031446	9.331372
100	0.0045	0.9994014	0.004442351	0.000218885	5.72179E-05	0.000379399
		-0.2570548	0.975036	0.007966216	0.02458427	0.2490886
		0.003960378	0.000381453	0.9548048	0.004055587	0.04123478
		1.687312	0.1638951	-19.34264	0.7948701	17.65532
152.4 (0.50 ft)	0.006858	0.9986576	0.006727609	3.30789E-06	0.000128112	0.001308621
		-0.3717946	0.9634164	-0.1859178	0.03527427	0.5577123
		0.008791381	0.000854077	0.8992078	0.005787373	0.09200091
		2.388208	0.2351618	-27.58257	0.6728373	25.19436
166.7	0.0075015	0.9984089	0.007346592	-0.000109699	0.000151663	0.00170055
		-0.4010374	0.9603959	-0.2592032	0.03790333	0.8602406
		0.01038282	0.001011088	0.8808076	0.005209313	0.1088096
		2.556328	0.2526888	-29.58754	0.6385015	27.03121
200	0.009	0.9977588	0.008780806	-0.000643609	0.000212764	0.002885245
		-0.4660258	0.9535856	-0.4602074	0.04352945	0.9262331
		0.01448438	0.001418428	0.8332105	0.007105564	0.1523053
		2.908761	0.2901964	-33.84164	0.5574984	30.93289
250	0.01125	0.9966071	0.01091514	-0.002083274	0.000319015	0.005476107
		-0.5563044	0.9438768	-0.8324718	0.05064701	1.388776
		0.02153176	0.002126763	0.7508714	0.008221888	0.2275968
		3.335013	0.3376467	-39.12762	0.4347564	35.79262
304.8 (1.00ft)	0.013716	0.9951219	0.01323022	-0.004721649	0.000451641	0.009599989
		-0.6468806	0.9338062	-1.319262	0.05659404	1.966143
		0.03018876	0.003010939	0.6487856	0.009129263	0.3210257
		3.661957	0.3772937	-43.40468	0.3016807	39.74273
333.3	0.0149985	0.9942636	0.01442457	-0.006590556	0.000525773	0.01232715
		-0.6911992	0.9287472	-1.597686	0.05892566	2.288865
		0.03495214	0.003505154	0.5920432	0.009472713	0.3729946
		3.775608	0.3928397	-45.01348	0.2341656	41.23787
500	0.0225	0.9881727	0.02128394	-0.02520931	0.000992317	0.03703847
		-0.928516	0.9001616	-3.391369	0.06280167	4.319885
		0.06386326	0.006615445	0.2402896	0.009862685	0.6958473
		3.743294	0.4186779	-46.67883	-0.1145251	42.93555
609.6 (2.00ft)	0.027432	0.9832207	0.02567633	-0.0448194	0.001291335	0.06159972
		-1.080368	0.8808161	-4.541246	0.05758515	5.621614
		0.08111078	0.008608906	0.02055522	0.008861093	0.898334
		3.194438	0.3839011	-41.76972	-0.2822351	38.57529

FUENTE: Banco Mundial, 1986.



2.1.6.4. Programa para computar los coeficientes para las ecuaciones del IRI.

Los coeficientes para el uso en las Ec. 4 - 7 pueden determinarse para cualquier intervalo del perfil usando el programa de cómputo:

Los coeficientes usados en las Ec. 4 - 7 se derivan de las propiedades dinámicas del modelo del vehículo. Estas propiedades dinámicas se describen por cuatro ecuaciones diferenciales que tienen la forma de la matriz:

$$dz(t)/dt = A * z(t) + B * y(t) \dots\dots\dots (12)$$

Donde z es un vector que contiene las cuatro variables de Z de las Ec. 1-7; A es una matriz 4 x 4 que describe la dinámica del modelo; B es un vector 4 x 1 que describe cómo el perfil actúa recíprocamente con el vehículo; e y(t) es el perfil entrado, como es percibido por un vehículo en movimiento. Estas matrices están definidas como:

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K2 & -C & K2 & C \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ K2/u & C/u & -(K1+K2)/u & C/u \end{vmatrix} \quad B = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K1/u \end{vmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

Las cuatro constantes K1, K2, C, y u son los parámetros del vehículo con los valores de K1=653.0, K2=63.3, C=6.0, y u=0.15. Los coeficientes de s de las Ec. 4 - 7 constituyen una matriz de declaración de la transición, el cual se computa desde la matriz A como:

$$ST = e^{A * dt} \dots\dots\dots (14)$$

El programa resuelve para la matriz de s (llamado ST en el programa) usando una serie Taylor de expansión Ec. 13:

$$ST = I + A * dt + A * A * dt^2/2! + A^3 * dt^3 /3! + \dots \dots\dots (15)$$



El programa mantiene términos añadidos para la Ec. 15 hasta todos los 16 elementos en la matriz ST son precisos a los límites de la computadora.

Los cuatro coeficientes remanentes de p constituyen la matriz de la contestación parcial, el cual está definida como:

$$PR = A^{-1} (ST - I) * B..... (16)$$

El programa de computación usa el método de eliminación Gauss para invertir la matriz A resolviendo la Ec. 16 para los cuatro elementos de la matriz PR. La programación se adjunta en el anexo H.

2.1.7. Sistema de aeronaves pilotadas a distancia, Dron.

2.1.7.1. Definición.

La real academia española, define el término Dron como aeronave no tripulada y proviene del inglés Drone. Su significado es zángano precisamente por el sonido que genera.

Por otro lado, la norma técnica complementaria NTC (2015) de la dirección general de aeronáutica civil del Ministerio de Transportes y Comunicaciones Perú, describe al termino DRONE: denominación del ámbito militar, la etimología de 'drone' viene de dran o dræn, abeja macho o zángano, el cual hace referencia al zumbido producido por sus motores, similares al de los zánganos volando. Para efectos de esta NTC se prescinde de esta denominación que en adelante deberá entenderse como RPA. El termino UAV Unmanned Aerial Vehicle (vehículo aéreo no tripulado) en la presente norma se considera un término obsoleto.

Así también, la NTC define al sistema de aeronave pilotada a distancia RPAS en un conjunto de elementos configurables integrado por una aeronave



pilotada a distancia (RPA), estaciones de piloto remoto conexas, los necesarios enlaces de mando, control y otros elementos de sistema que pueda referirse en cualquier punto durante la operación de vuelo.

En la presente tesis el termino Dron, RPA, RPAS, serán usados de acuerdo a las bibliografías citadas en cada caso y de acuerdo a la norma técnica complementaria NTC de la dirección general de aeronáutica civil del Ministerio de Transportes y Comunicaciones Perú.

2.1.7.2. Tipos de RPAS.

Según Aerial insights (2019) describe:

Existen diferentes tipos de clasificación de los RPAS, pero vamos a centrarnos exclusivamente en los tipos de drones en función a su sustentación, así tenemos drones de ala fija y drones de ala rotatoria.

Drones de ala fija:

Los drones de ala fija son aeronaves que poseen un perfil alar que permite que la aeronave pueda moverse a través del aire y sea capaz de generar fuerzas sustentadoras para mantenerse en el aire. Este tipo de drones tienen una estética muy similar a los aeromodelos de radiocontrol. La principal característica de este tipo de drones es la gran autonomía que nos ofrecen ya que pueden estar volando varias horas gracias a su eficiencia aerodinámica. Los drones de ala fija son ideales para mapear grandes superficies de terreno ya que con una única batería se cubren grandes extensiones de terreno. Por este motivo son drones muy utilizados en trabajos de agricultura de precisión y de fotogrametría.



A diferencia de los drones de ala rotatoria, con este tipo de drones no es posible realizar vuelos estacionarios, otra particularidad de este tipo de drones es que no pueden despegar ni aterrizar en vertical, para el despegue de un drone de ala fija necesitaremos una persona que se encargue de lanzarlo a mano o disponer directamente de una catapulta. La gran mayoría de los drones de ala fija actuales ya son capaces de realizar aterrizajes de forma autónoma, pero hay que tener en cuenta que se necesita una superficie lo suficientemente grande y en buen estado para que el drone no sufra ningún percance.

Drones de ala rotatoria:

Los drones de ala rotatoria o más conocidos como multirrotores, son los tipos de dron más extendidos y más utilizados por los profesionales del sector. La principal diferencia de los multirrotores con respecto a los drones de ala fija radica en la forma en la que consiguen mantenerse en el aire. Mientras que los drones de ala fija consiguen la sustentación a través de su perfil alar, los multirrotores generan la sustentación a través de las fuerzas que generan las hélices de sus rotores.

La principal característica de los multirrotores es su versatilidad, de una forma sencilla se le pueden instalar diferentes tipos de cámaras (cámaras RGB, multiespectrales, termográficas) que nos permiten realizar un gran abanico de trabajos. Además, con este tipo de drones vamos a poder realizar vuelos estacionarios.

Los multirrotores son capaces de despegar y aterrizar de forma vertical. La puesta en marcha de este tipo de drones es mucho más rápida que con los drones de ala fija ya que pueden despegar y aterrizar prácticamente

desde cualquier lugar al no necesitar de una superficie de terreno adecuada para ello. El principal inconveniente de este tipo de drones es su autonomía. Los multirrotores tienen un elevado consumo energético debido a la necesidad de que todos sus rotores deben de estar en funcionamiento para que la aeronave permanezca en el aire. En el mejor de los casos nos van a ofrecer unos 20 minutos de vuelo. Por tanto, si se necesitan mapear grandes extensiones es inevitable disponer de varios juegos de baterías con el sobrecoste en tiempo y dinero que esto conlleva.

Ala fija



Ala rotatoria



Figura N° 13: Tipos de dron según su sustentación.



2.1.7.3. Sectores productivos actuales en los que se emplean los drones.

Según el plan estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021 (2018) señala:

El empleo de los drones para ciertas aplicaciones no es novedoso, ya desde los años 60 este tipo de aeronaves comenzó a utilizarse en misiones de reconocimiento por el ejército de los EEUU. Con posterioridad, en los años 80, estas plataformas se extendieron a aplicaciones civiles. La primera de estas experiencias se llevó a cabo en Japón, en tareas de fumigación de cultivos. Sin embargo, el desarrollo de la tecnología y su reducción de costes, unido a la mejora en la eficiencia y fiabilidad de estos sistemas ha hecho posible que más recientemente se haya producido una amplia difusión de la utilización de los drones.

Respecto a la ampliación del campo de aplicación de las aeronaves, permite la realización de nuevas tareas que hasta el momento no han podido ser asumidas por aeronaves convencionales. En este sentido, la versatilidad de los drones y el control preciso de su vuelo abren nuevas posibilidades de ejecutar trabajos que hasta ahora no se habían resuelto a través de plataformas aéreas, como, por ejemplo, la inspección de estructuras. A continuación, se muestran algunos sectores donde se emplean drones:

- ***Obra Civil:*** levantamientos topográficos 3D, control de excavaciones, seguimiento del avance de la construcción, vigilancia ambiental.
- ***Mantenimiento:*** mantenimiento preventivo y correctivo, inspección zonas no accesibles, inventario de activos, reconocimiento externo visual e interno instrumental.



- **Agricultura:** Seguimiento del crecimiento de los cultivos, gestión del riesgo, detección de características del terreno, mejora trabajos con maquinaria.
- **Medio ambiente:** observación de plantas y animales, detección de vertidos, control actividades no permitidas, cartografía de masa forestales.
- **Minería:** Levantamientos topográficos 3D, control de aperturas de frentes de excavación, zonas poco accesibles, monitorización de acopios.
- **Filmación:** Filmación desde un amplio rango de altura, imagen de alta resolución, posibilidad de varias perspectivas, más silencioso y versátil que otros medios aéreos.
- **Seguros:** Inventario de activos a asegurar, seguimiento en la prevención del fraude, caracterización de entorno para medición de riesgo potencial, evaluación de daños sufridos.

2.1.8. Fotogrametría.

2.1.8.1. Definición.

Es la ciencia aplicada a realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías, de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición) del objeto fotográfico, definición adoptada por la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos ISPRS.

Por otro lado, la sociedad americana de fotogrametría y sensores remotos ASPRS, tiene la siguiente definición: La fotogrametría es el arte, la ciencia y la tecnología de obtener información fiable de objetos físicos y su entorno, mediante el proceso de exponer, medir e interpretar tanto imágenes



fotográficas como otras obtenidas de diversos patrones de energía electromagnética y otros fenómenos.

Bonneval (1972) indica que la fotogrametría es la técnica que tiene por objetivo estudiar y definir con precisión, la forma, dimensiones y posiciones en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías.

2.1.8.2. Aplicaciones de la Fotogrametría a la ingeniería civil.

Jauregui (2010) describe: La primera utilización de la fotogrametría consistió en la realización de mapas y planos topográficos. Los mapas base de la cartografía de cualquier país, son obtenidos mediante ella.

Actualmente, además de la realización de estos mapas base, se realizan muchos otros tipos de mapas de carácter especial, los cuales pueden presentar gran variedad de escalas y se utilizan en proyectos y diseño de obras, tales como: autopistas, carreteras, vías de ferrocarril, puentes, tuberías, oleoductos, gasoductos, líneas de transmisión, presas hidroeléctricas, estudios urbanos, etc. Además de estos mapas orientados principalmente al desarrollo de obras de ingeniería civil, podemos mencionar mapas realizados para uso catastral, mapas geológicos, mapas de suelos, mapas forestales, etc.

Dentro de las disciplinas que se benefician de la fotogrametría no topográfica podemos mencionar a la arquitectura, en el levantamiento de monumentos y de sitios; la arqueología en aplicaciones similares a las usadas en arquitectura; la bioestereometría, en el estudio de formas de seres vivos; la construcción naval, la automotriz y la de maquinaria pesada hacen también uso de esta disciplina.



Quirós (2014) indica que en el marco de la ingeniería existe cuatro grandes grupos de actuaciones donde se utilizan la fotogrametría:

- Vías de comunicación: para el estudio de establecimiento de trazados.
- Planificación territorial: en el planeamiento urbanístico y ordenación del territorio.
- Hidrografía: estudio de cuencas, deformaciones de presas, etc.
- Ejecución de movimiento de tierras: medición de volúmenes removidos.

2.1.8.3. Clasificación de la fotogrametría.

Según Quirós (2014) la fotogrametría puede clasificarse según los siguientes aspectos:

En función al instrumento utilizado:

- Fotogrametría analógica: se miden fotogramas analógicos en un equipo también analógico.
- Fotogrametría analítica: se miden fotogramas analógicos con técnicas computacionales.
- Fotogrametría digital: medición de fotogramas digitales en sistemas fotogramétricos digitales.

En función de la distancia al objeto:

- Fotogrametría espacial: medición en imágenes de satélite.
- Fotogrametría aérea: medición en fotogramas aéreos.
- Fotogrametría terrestre: medición en fotogramas obtenidos desde la superficie terrestre.



2.1.8.4. Ventajas y desventajas de la fotogrametría en la ingeniería.

Según Jáuregui (2010) describe entre las ventajas y limitaciones de la fotogrametría:

Ventajas:

- Reducción de costos. Está relacionado con el tamaño del área a restituir, a partir de las 200 ha de superficie, el método fotogramétrico se torna competitivo frente al método topográfico, aumentando esta competitividad a medida que el área se hace más extensa.
- Reducción del trabajo de campo. El trabajo de campo es un componente oneroso de todo trabajo topográfico, cuyo costo aumenta con la accesibilidad y las condiciones de clima adverso. La reducida cantidad de puntos de control necesarios en la fotogrametría, reduce la estadía en el campo.
- Velocidad de compilación. El tiempo requerido para realizar un mapa fotogramétrico es mínimo comparado con el que requiere el levantamiento topográfico y su posterior trabajo de gabinete.
- Dado el poco tiempo necesario para el levantamiento fotogramétrico con el que se obtiene una reproducción fiel del terreno, en un periodo determinado, nos facilita datos muy valiosos en los casos de cambios súbitos, como, por ejemplo: durante o después de catástrofes naturales.
- Flexibilidad. El método fotogramétrico puede ser realizado en un variado rango de escalas, dependiendo de la escala de las fotografías y del tipo de aparato compilador utilizado, dependiendo también de la disponibilidad de



recursos económicos y técnicos, por ello suministra mapas o sustitutos con diferentes tiempos de producción, costos y precisión.

- Registro multitemporal. Es muy útil para verificar mapas fotogramétricos. Las fotos aéreas proveen un registro preciso de las características del terreno en la fecha en que fueron tomadas, lo cual permite realizar comparaciones entre fotos de otras fechas para evaluar cambios en el terreno. Las fotos aéreas también pueden ser empleadas para otros usos diferentes al del proyecto original, ya que además de información métrica, las fotografías aéreas proporcionan información de carácter cuantitativo y cualitativo.
- La Fotogrametría se puede aplicar en regiones donde no pueden utilizarse los métodos clásicos, como por ejemplo: en regiones intransitables, tales como: ciénagas, desiertos, selvas vírgenes, territorios azotados por alguna epidemia u ocupados por fuerzas enemigas, etc., debido a la característica intrínseca de la fotogrametría, de que los objetos pueden ser medidos sin necesidad de estar cerca de ellos.

Desventajas:

- Visión de la superficie del terreno cuando existe densa cobertura vegetal. En este caso es imposible ubicar la marca flotante sobre el terreno por lo que se debe presumir una altura promedio de la vegetación con respecto al suelo. Sin embargo, como la cubierta vegetal tiende a suavizar los accidentes topográficos del terreno, siempre existirán errores en la ubicación de las curvas de nivel, aunque se pueda verificar la cota en los claros que existan en la vegetación.
- Siempre es necesario realizar un control de campo.



- Para realizar nuevos levantamientos se requiere la obtención de nuevas fotografías.

2.1.9. Confiabilidad.

La confiabilidad es el grado en que un instrumento produce resultados consistentes y coherentes. Es decir, en que su aplicación repetida al mismo sujeto u objeto produce resultados iguales. (Kerlinger, 2002)

La Teoría de la Confiabilidad se ocupa principalmente de las fallas de los sistemas. Sin embargo, no indaga tanto en los fenómenos que las causan sino en la frecuencia con que ocurren. Por lo tanto, no es una teoría física de las fallas, sino una *teoría estadística*, una teoría de probabilidades. (Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Asociación, 1996)

2.1.10. Precisión y exactitud.

La precisión y la exactitud son dos términos distintos lo cual no deben ser confundidos como sinónimos, ya que expresan distintos significados y pruebas. Se definen de la siguiente manera:

2.1.10.1. Precisión.

Jiménez (2007) define como el grado de refinamiento en la ejecución de una medida o el grado de perfección en los instrumentos y métodos obteniendo un resultado. Una indicación de la uniformidad o reproductibilidad de un resultado. La precisión relaciona a la calidad de un manejo por el que un resultado se obtiene y es distinguido de exactitud que relaciona a la calidad del resultado.



Figura N° 14: Precisión, uniformidad en los puntos pero inexacta.

2.1.10.2. Exactitud.

Jiménez (2007) define es el grado de conformidad con una norma o valor verdadero. La exactitud relaciona a la calidad de un resultado y se distingue de la precisión que relaciona la calidad del funcionamiento por el que el resultado se obtiene.

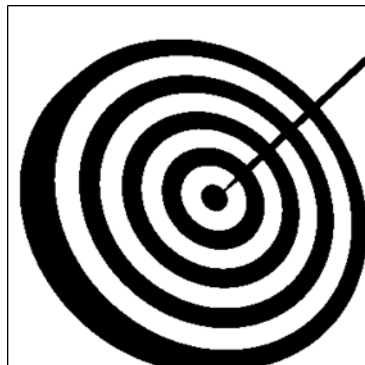


Figura N° 15: Exactitud.

2.1.10.3. Casos de precisión y exactitud.

la necesidad de buscar mayor precisión lleva normalmente a costos mayores. Para obtener un grado más alto de precisión, puede ser necesario usar equipo o una metodología sofisticada y más tiempo. La metodología en trabajos de ingeniería en levantamiento topográfico, el topógrafo debe determinar que necesita para lograr la precisión y la exactitud requerida para un trabajo. (Jiménez, 2007).

A continuación, se muestran algunos casos de exactitud y precisión:

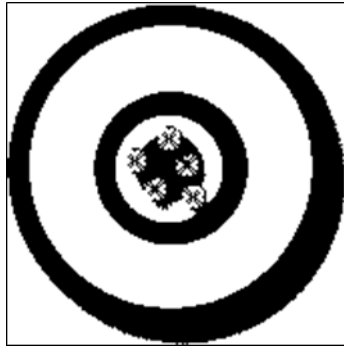


Figura N° 16: Exactitud alta y precisión alta.

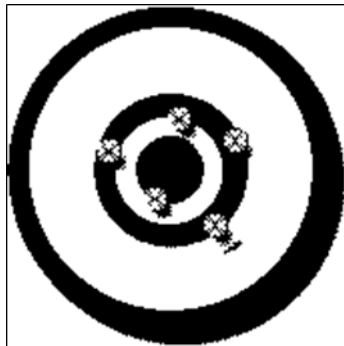


Figura N° 17: Exactitud alta y precisión baja.

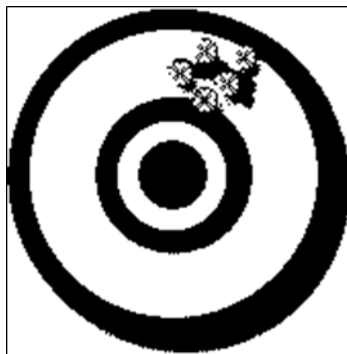


Figura N° 18: Exactitud baja y precisión alta.



2.1.11. RPAS Phantom 4 RTK.

DJI (2019) indica, que con el P4RTK DJI ha repensado su tecnología de drones desde cero, revolucionando sus sistemas para lograr un nuevo estándar para la precisión del Dron, y para ofrecer a los clientes el nuevo Phantom 4 RTK con datos centimétricos y al mismo tiempo requiere menos puntos de control en tierra.

Así también, ACRE (2018) describe: DJI ha replanteado su tecnología de drones desde el principio, revolucionando sus sistemas para lograr un nuevo estándar para la precisión de los drones, el resultado de la creación es el Phantom 4 RTK. El P4RTK ha sido diseñado teniendo en cuenta los requisitos del mercado de topografía y mapeo desde sistemas aéreos no tripulados brindando una solución de avión no tripulado compacta con una cámara de alta resolución y la capacidad de capturar datos RTK con precisión de centímetros.

Aplicaciones del phantom 4 RTK

El phantom 4 RTK son aplicables a las áreas de topografía, ingeniería civil, gestores BIM, Gerencia de obras, geología, cartografía, entre otros. (ACRE ,2018)

Módulo RTK integrado en el Phantom 4 RTK

El nuevo módulo RTK está integrado directamente en el Phantom 4 RTK, proporcionando datos de posicionamiento en tiempo real para mejorar la precisión absoluta en los metadatos de la imagen. Justo debajo del receptor RTK se encuentra un módulo GNSS redundante, instalado para mantener la estabilidad del vuelo en regiones con poca señal, como las ciudades densas.



Combinando los módulos GNSS y RTK, el Phantom 4 RTK puede optimizar la seguridad de vuelo al tiempo que garantiza la captura de los datos más precisos para los complejos flujos de trabajo de levantamiento, cartografía e inspección. (ACRE ,2018)

Sistema de posicionamiento con precisión centimétrica

Se integra un nuevo módulo RTK directamente en el Phantom 4 RTK, que proporciona datos de posicionamiento en tiempo real de nivel centimétrico para una precisión absoluta mejorada en los metadatos de la imagen. (DJI, 2019)

Así también, ACRE (2018) indica el módulo RTK integrado ofrece datos precisos de nivel centimétrico sin requerir puntos de control de tierra debido a su nuevo sistema RTK (Cinemática en tiempo real). El Phantom 4 RTK puede almacenar los datos de observación satelital para la posición PPK (Post-Process Kinematic) post-process.

Sistema de imagen precisa

Captura los mejores datos de imagen con un sensor CMOS de 1 pulgada y 20 megapíxeles. El obturador mecánico hace que las misiones de mapeo o la captura de datos regular sean perfectas, ya que el Phantom 4 RTK puede moverse mientras toma fotografías sin el riesgo de desenfoque del obturador rodante. Debido a la alta resolución, el Phantom 4 RTK puede alcanzar una distancia de muestreo en el suelo (GSD) de 2.74 cm a 100 metros de altitud de vuelo. Para garantizar que cada Phantom 4 RTK ofresca una precisión incomparable, cada lente de cámara pasa por un riguroso proceso de calibración, con parámetros guardados en los metadatos de cada imagen, lo



que permite que el software de procesamiento posterior se ajuste de manera única para cada usuario. (DJI, 2019)

Antena de referencia D-RTK 2

Compatibilidad perfecta con la estación móvil D-RTK 2, que proporciona datos diferenciales en tiempo real al Dron y forma una solución topográfica precisa, o adquiera coordenadas de ubicación precisas cuando se usa como un rover RTK. El diseño robusto de la estación móvil y el sistema de transmisión OcuSync aseguran que pueda obtener datos precisos a nivel de centímetro con su Phantom 4 RTK en cualquier condición. (DJI, 2019)

Asi también, ACRE (2018) indica que admite cuatro sistemas de navegación por satélite: GPS, Glonass, BeiDou y Galileo; Soporta conectividad OcuSync y 4G; compatible con múltiples modelos de drones DJI.

Ocusync

Disfrute de una transmisión de vídeo en vivo HD estable y confiable a distancias de hasta 4.3 millas, ideal para mapear sitios a gran escala. (ACRE, 2018)

Especificaciones Phantom 4 RTK

Según ACRE (2018) resume las siguientes características.






Tabla N° 9: Resumen de especificaciones del Phantom 4 RTK

Descripción	
Tiempo de vuelo máximo	Approx. 30 minutos
Peso total incluye hélices y batería	3 lbs (1.39 kg)
Sistema de transmisión de video	OcuSync
Rango máximo de transmisión	4.3 miles (7 km)
Horizontal precisión RTK	1 cm + 1 ppm
Vertical precisión RTK	1.5 cm + 1 ppm
Precisión horizontal absoluta en modo fotogramétrico	5 cm
Control remoto con pantalla y compatibilidad 4G	Incluido
Módulo RTK con precisión centimétrica	Incluido

FUENTE: ACRE, 2018.

Componentes del phantom 4 RTK

Tabla N° 10: Componentes del phantom 4 RTK

Descripción	Equipo
Phantom 4 RTK	
Módulo RTK	
Antena de referencia D-RTK 2	
Control remoto	

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

3.1.1. Población y muestra.

3.1.1.1. Población.

En la presente investigación la población es considerada la carretera no pavimentada Ruta PU-944, Trayectoria: Emp. PU-943 (Dv. Isla Esteves) - Huacollo - Emp. PE-3S, ubicada en la provincia de Puno, región Puno.

3.1.1.2. Muestra.

Se consideró una muestra no probabilística o dirigido, en un tramo de 600 metros de longitud, carretera Ruta PU-944, Trayectoria: Emp. PU-943 (Dv. Isla Esteves) - Huacollo - Emp. PE-3S. No pavimentada. Que corresponde a la red vial vecinal de la provincia de Puno, región Puno. La muestra se seleccionó de acuerdo a las características de la investigación, irregularidad o rugosidad de la carretera, características físicas de la vía, entre otros.

3.1.2. Instrumentos de recolección de datos.

3.1.2.1. Instrumento documental.

- *Libreta de campo*



Figura N° 19: Libreta de topografía o campo.

3.1.2.2. Instrumentos mecánicos.

Los instrumentos de ingeniería más importantes que fueron utilizados en la investigación, son los que se detallan:

- Sistema de aeronaves pilotadas a distancia Phantom 4 RTK.



Figura N° 20: DJI Phantom 4 RTK, componentes.



Figura N° 21: Phantom 4 RTK en zona de estudio.

- Receptor GPS, TOPOCON - GR5, Receptor GNSS LI/L2, CA, RTK.



Figura N° 22: GPS diferencial receptor Topcon –GR5.



Figura N° 23: Receptor Topcon - GR5 en zona de estudio.

- Nivel de ingenieros, Topcon AT-G6.



Figura N° 24: Nivel de ingenieros Topcon AT-G6 y componentes, zona de estudio.

- Placas de bronce para monumentación de puntos de control de orden “C”, descrita en cada placa:” **UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO-PUNO, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL, PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, SE PROHÍBE DESTRUIR, PC1- PC2 (dos placas), “C”, JULIO 2019.”**



Figura N° 25: Placa de bronce, punto de control 1 – PC1.



Figura N° 26: Placa de bronce, punto de control 2 – PC2.

- Cinta métrica antideslizante hoja de acero, 30 m.



Figura N° 27: Cinta Métrica hoja de acero.

- Flexo hoja de acero - goma, 7.5 m y 5.0 m.



Figura N° 28: Flexo hoja de acero.



3.2. MÉTODOS

3.2.1. Tipo de investigación.

Por su naturaleza de estudio, corresponde a una investigación aplicada, constructiva o utilitaria del tipo cuantitativo. Donde se mide la regularidad superficial de la carretera no pavimentada, Ruta PU-944, Trayectoria: Emp. PU-943 (Dv. Isla Esteves) - Huacollo - Emp. PE-3S, a partir de dos equipos diferentes, que recolectan información de manera directa e indirecta.

3.2.2. Nivel de investigación.

Corresponde a un nivel de investigación descriptivo, donde se realiza la recolección de información de campo con diferentes instrumentos y obtener resultados de rugosidad superficial en carreteras, para una caracterización a escala el estado de la vía.

3.2.3. Esquema de trabajo.

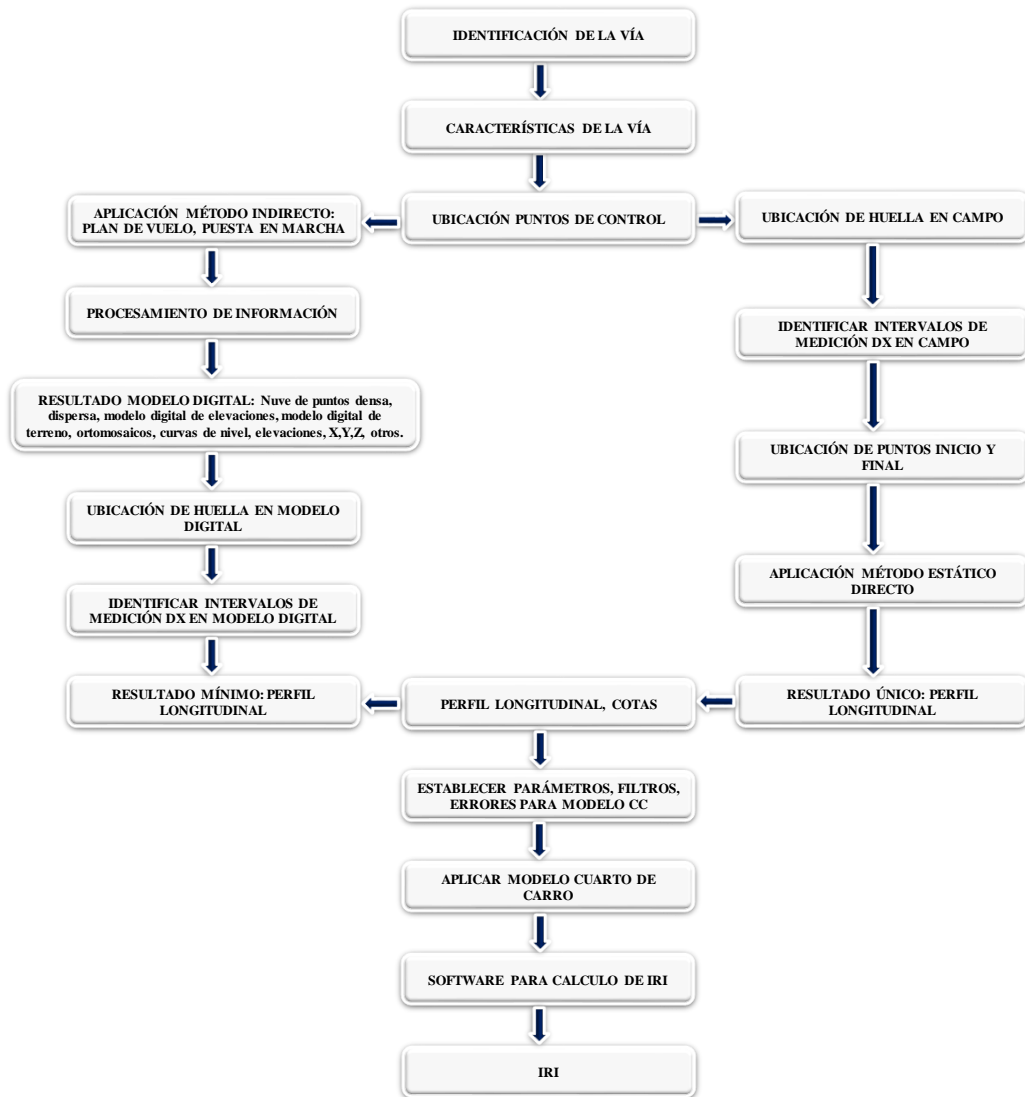


Figura N° 29: Esquema de trabajo.

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

3.2.4. Análisis de datos.

3.2.4.1. Test estadístico T Student.

Se realiza la prueba T Student emparejadas, para verificar si existe diferencias estadísticas significativas en la recolección de datos, con un nivel de significancia de 0.05. Las hipótesis son representadas como nula (H_0) y alternativa (H_1), en el siguiente detalle:



Planteamiento:

Hipótesis nula H_0 : $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Hipótesis alternativa H_1 : $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

$\mu_1, \mu_2 =$ mediciones

Hipótesis nula H_0 : no existe diferencias estadísticas significativas en las mediciones.

Hipótesis alternativa H_1 : Existe diferencias estadísticas significativas en las mediciones.

Si el valor p es mayor que 0.05 y el t calculado se encuentra dentro del área de aceptación, entonces la hipótesis nula H_0 es aceptada, es decir, no existe diferencias estadísticas significativas en las mediciones, y se rechaza la hipótesis alternativa.

3.2.4.2. Test estadístico ANOVA.

Se realiza el análisis de varianza mediante el modelo ANOVA, con el objetivo de comparar y verificar de manera simultánea las mediciones de múltiples ensayos realizados, con un nivel de significancia al 0.05. Las hipótesis son representadas como nula (H_0) y alternativa (H_1), como se detalla:

Planteamiento:

Hipótesis nula H_0 : $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

Hipótesis alternativa H_1 : $\mu_i \neq 0$ tan siquiera un i

$\mu_1, \mu_2, \mu_3 =$ mediciones



Hipótesis nula H_0 : no existe diferencias estadísticas significativas en las mediciones.

Hipótesis alternativa H_1 : Existe diferencias estadísticas significativas en las mediciones.

Si el valor p es mayor que 0.05 y el F calculado es menor que el F tabulado, entonces la hipótesis nula H_0 es aceptada, es decir, no existe diferencias estadísticas significativas en las mediciones y se rechaza la hipótesis alternativa.

3.2.4.3. Correlación de las mediciones.

Se realiza la correlación de resultados IRI, con el objetivo de comparar el grado de relación que existe entre el método directo y el método indirecto mediante los equipos empleados.

Hernández, Fernández y Baptista (2014) indica una relación alta implica resultados con valores cercanos a -1 y 1, es decir, que la diferencia en las distintas mediciones no es estadísticamente significativa y mientras más cercana sean a 0 estos valores, pues representarían ninguna correlación.



Tabla N° 11: Coeficientes R de Pearson

Coeficiente R de Pearson	
Correlación	R de Pearson
Negativa perfecta	-1.00
Negativa muy fuerte	-0.90
Negativa considerable	-0.75
Negativa media	-0.50
Negativa débil	-0.25
Negativa muy débil	-0.10
No existe correlación alguna	0.00
Positiva muy débil	+0.10
Positiva débil	+0.25
Positiva media	+0.50
Positiva considerable	+0.75
Positiva muy fuerte	+0.90
Positiva perfecta	+1.00

FUENTE: Hernández, Fernández y Baptista, 2014.

3.3. IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio del presente proyecto se encuentra ubicada y caracterizada, según se detalla:

Ubicación:

Distrito : Puno.

Provincia : Puno.

Región : Puno.



Características de la vía:

Ruta : PU-944.
Trayectoria : Emp. PU-187 36 943 (Dv. Isla Esteves) - Huacollo - Emp. PE-3S.
Clasificación : Decreto supremo D.S. 011-2016-MTC.
Superficie : No pavimentada.
Ancho de calzada: 5.50 a 6.00 m

Coordenadas de la vía

Inicio:

Este (m) : 392695.00
Norte (m) : 8250362.00

Final:

Este (m) : 389154.00
Norte (m) : 8253591.00

Coordenada zona de estudio referencia PC01

Este (m) : 393726.435
Norte (m) : 8250846.259
Altitud (m) : 3875.327

Ubicación de la carretera PU-944

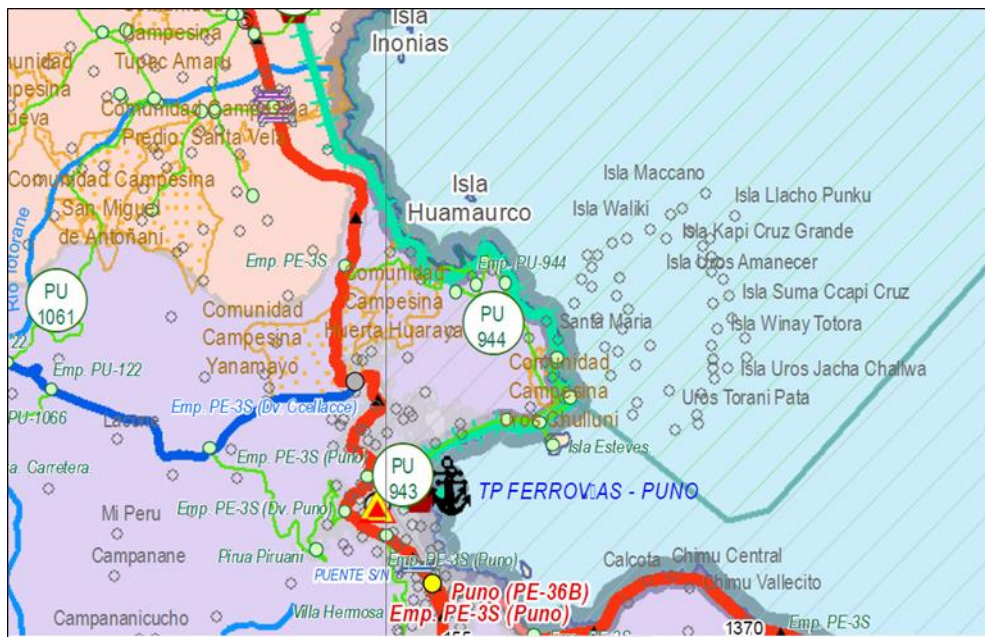


Figura N° 30: Ubicación de la carretera PU-944.

Fuente: Mapa D.S. N° 011-2016-MTC.



Figura N° 31: Tramo en estudio.

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PUNTOS DE CONTROL GPS DE PRECISIÓN Y P4RTK

4.1.1. Ejecución de ensayo con GPS diferencial y P4RTK.

Se estableció dos puntos de control horizontal y vertical en el área de estudio, para lo cual se monumentó los puntos de control con su respectiva placa de bronce de orden “C”, según la normativa del Instituto Geográfico Nacional IGN.

En cada placa de bronce se encuentra escrito: **“UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO-PUNO, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL, PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, SE PROHÍBE DESTRUIR, PC1- PC2 (dos placas), “C”, JULIO 2019.”**



Figura N° 32: Monumentación de Puntos de control PCI, PC2.

Seguidamente se ha estacionado el GPS diferencial Topcon GR5, en cada punto de control, registrándose mínimo dos (2) horas por cada punto para obtener una precisión adecuada.



Figura N° 33: Estacionamiento GPS diferencial en los puntos de control PC1, PC2.

Así también, los puntos de control PC1, PC2 han sido enlazados a la estación de rastreo permanente del Instituto Geográfico Nacional del Perú más cercano, denominado PU02, que está ubicada en la Universidad Peruana Unión de la ciudad de Juliaca, provincia de San Román, región Puno.



Figura N° 34: Estación de rastreo permanente.

Se realizó el post proceso de los datos captados de campo, con el apoyo del software Topcon Tools V.8.2.3, la información fue analizada en el sistema WGS 84.

El periodo y duración del posicionamiento en cada punto con el GPS diferencial, son los siguientes:

Tabla N° 12: Periodo y duración de posicionamiento

Código	Fecha	Hora inicio	Hora final	Duración
PC1	06/07/2019	4h:27m:25s p.m.	6h:31m:30s p.m.	02h:04m:05s
PC2	06/07/2019	3h:37m:35s p.m.	5h:42m:35s p.m.	02h:05m:00s

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Se verificó el comportamiento de los satélites, los cuales fueron óptimos para el trabajo, la misma que nos da la confiabilidad para el cálculo de coordenadas. Así también, se realizó el post proceso de las líneas base generadas a través de las estaciones GPS con el método estático.

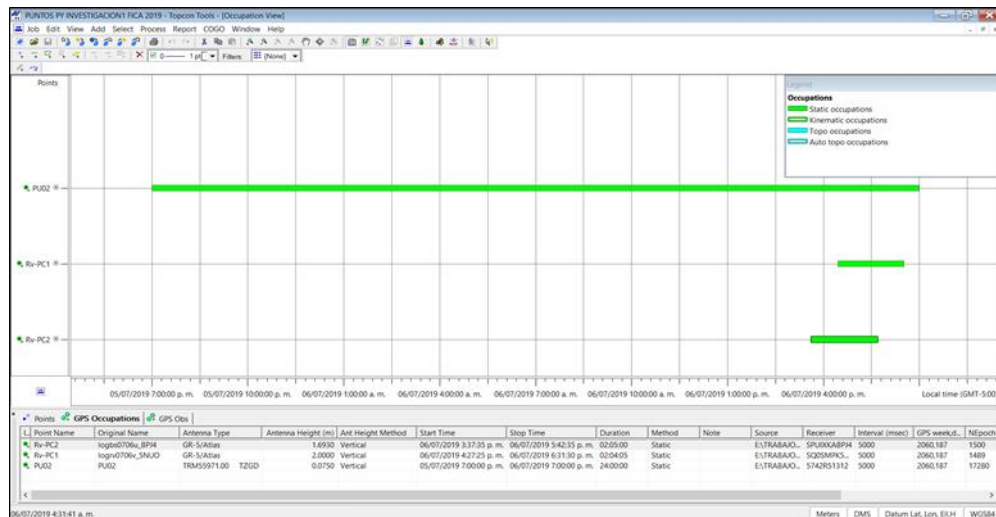


Figura N° 35: Comportamiento de satélites.

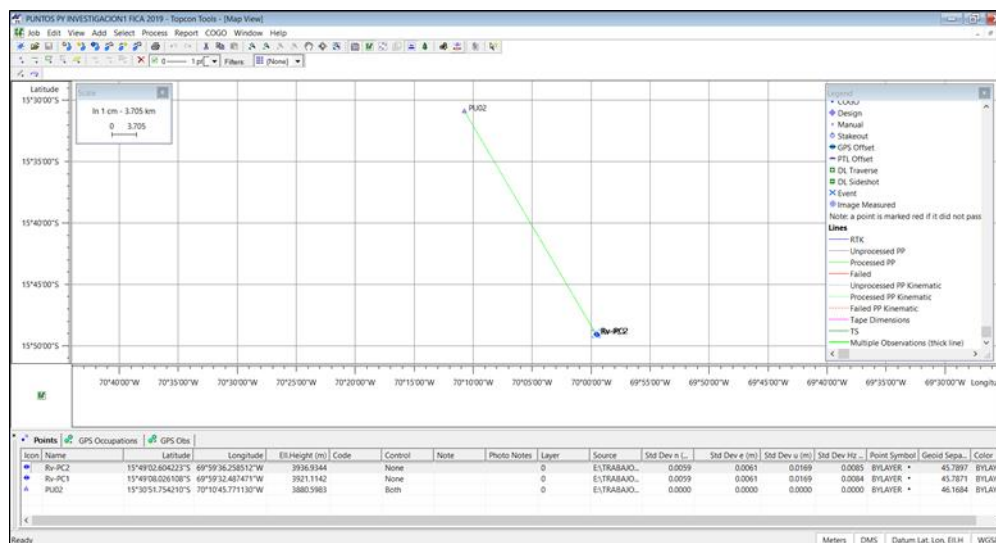


Figura N° 36: Líneas base.

Seguidamente, obtenidas las coordenadas con alturas geodales de los puntos de control PCI, PC2, se estacionó el GPS diferencial Topcon GR5 en el área de estudio, punto de control PC1 y se estableció otros 12 puntos de análisis con el método RTK. La ubicación de los 12 puntos de análisis se realizó tomando en consideración las características de la vía, longitud entre puntos de análisis, entre otros caracteres, con el fin de una mejor posición de estas.

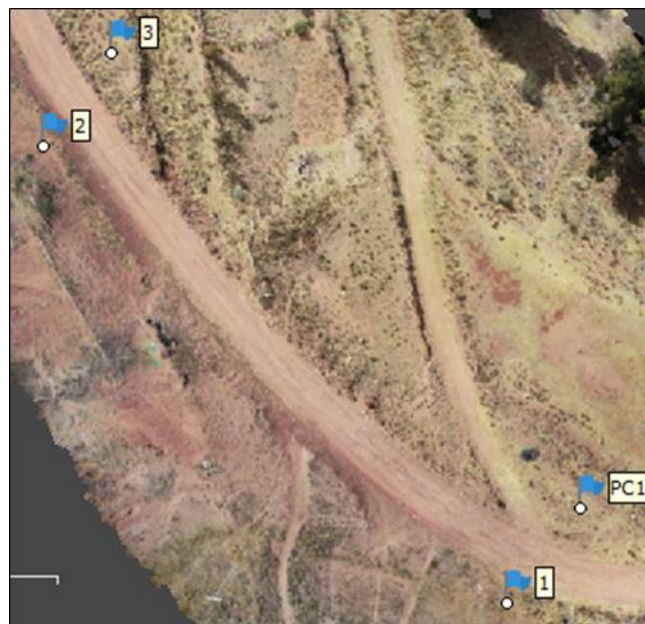


Figura N° 37: Punto de control PC1 y primeros 3 puntos de 12.

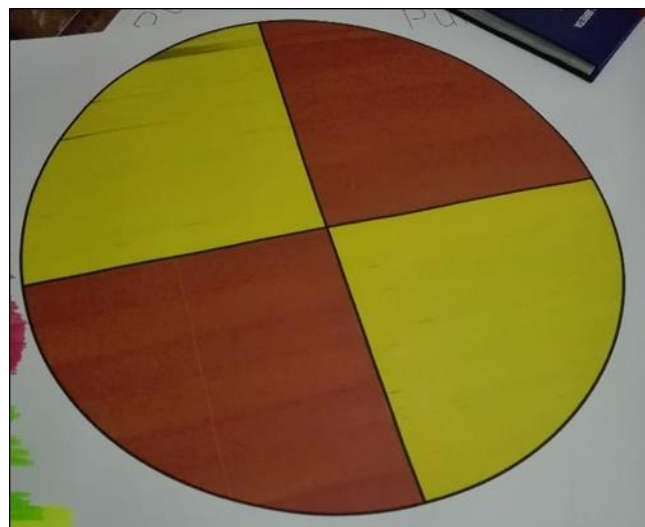


Figura N° 38: Marca para puntos de análisis.

Una vez establecido y marcado todos los puntos de análisis en el área de estudio, se estacionó en el punto de control PC2 la estación móvil del RPAS Phantom 4 RTK, donde se registró las coordenadas y se puso en marcha el plan de vuelo lineal (previo análisis) al equipo Phantom 4 RTK.



Figura N° 39: Estacionamiento del RPAS P4RTK en el punto de control PC2.



Figura N° 40: Plan de vuelo lineal P4RTK.

Posteriormente, obtenida toda la información de campo de la zona de estudio, los trabajos son de gabinete, donde se realizó la descarga de las fotografías captadas por el equipo, para procesarlas con el software agisoft metashape profesional 1.5.3, con previas configuraciones de este software. El producto final de este procedimiento se obtuvo una ortofotografía de alta calidad, donde comparada con las marcas realizadas en los puntos de control PC1, PC2 y los puntos de análisis se obtienen desplazamientos planimétricos en cada punto en un rango aproximado de 0.40 m a 1.00 m, respecto a los puntos captados por el GPS diferencial método RTK.



Figura N° 41: Desplazamiento de 41.7 cm en el punto de control PC2.



Figura N° 42: Desplazamiento de 42.6 cm en el punto de análisis 4.

finalmente, para obtener una precisión más adecuada, se ajustaron a los puntos de control PC1, PC2, toda la información, fotografías obtenidas por el Phantom 4 RTK, donde se obtuvo coordenadas con alta precisión, como se muestra en el apartado 4.1.2. resultados de GPS diferencial y P4RTK.



Figura N° 43: Punto de control PC2 ajustado.

4.1.2. Resultados de GPS diferencial y P4RTK.

Los resultados obtenidos con el GPS diferencial Topcon GR5 y el RPAS Phantom 4 RTK en 12 puntos de análisis con ajuste a los puntos de control PC1, PC2, son los siguientes:

Coordenadas con alturas geodales, GPS diferencial Topcon GR5:



Tabla N° 13: Coordenadas GPS de precisión

N°	ESTE	NORTE	COTA
1	393714.964	8250831.34	3876.109
2	393642.011	8250903.03	3887.569
3	393652.702	8250917.68	3881.806
4	393595.009	8250995.1	3891.509
5	393500.893	8251021.77	3884.169
6	393500.193	8251034.21	3881.595
7	393424.985	8251068.89	3880.12
8	393433.854	8251085.52	3875.113
9	393399.801	8251143.02	3879.557
10	393394.416	8251142.29	3879.529
11	393363.686	8251220.46	3877.32
12	393352.657	8251214.17	3881.366

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Coordenadas obtenidas con RPAS Phantom 4 RTK:

Tabla N° 14: Vuelo N° 01

N°	ESTE	NORTE	COTA
1	393714.961	8250831.328	3876.138
2	393642.005	8250903.043	3887.580
3	393652.717	8250917.684	3881.786
4	393595.017	8250995.098	3891.539
5	393500.892	8251021.772	3884.152
6	393500.188	8251034.204	3881.620
7	393424.991	8251068.901	3880.114
8	393433.862	8251085.518	3875.105
9	393399.795	8251143.025	3879.573
10	393394.412	8251142.288	3879.514
11	393363.682	8251220.469	3877.318
12	393352.659	8251214.153	3881.391

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.



Tabla N° 15: Vuelo N° 02

N°	ESTE	NORTE	COTA
1	393714.966	8250831.340	3876.140
2	393642.001	8250903.041	3887.581
3	393652.711	8250917.684	3881.793
4	393595.015	8250995.101	3891.548
5	393500.892	8251021.772	3884.154
6	393500.191	8251034.203	3881.616
7	393424.994	8251068.910	3880.114
8	393433.861	8251085.514	3875.108
9	393399.799	8251143.022	3879.575
10	393394.408	8251142.292	3879.513
11	393363.678	8251220.464	3877.315
12	393352.660	8251214.155	3881.384

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla N° 16: Vuelo N° 03

N°	ESTE	NORTE	COTA
1	393714.963	8250831.336	3876.142
2	393642.009	8250903.039	3887.585
3	393652.715	8250917.685	3881.788
4	393595.015	8250995.103	3891.562
5	393500.902	8251021.771	3884.165
6	393500.199	8251034.201	3881.628
7	393424.986	8251068.900	3880.118
8	393433.856	8251085.512	3875.100
9	393399.792	8251143.021	3879.576
10	393394.407	8251142.293	3879.516
11	393363.682	8251220.467	3877.301
12	393352.664	8251214.158	3881.390

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.2. RUGOSIDAD SUPERFICIAL MÉTODO ESTÁTICO DIRECTO

4.2.1. Descripción.

El cálculo del índice de rugosidad internacional, es realizado mediante la aplicación recomendada por el Banco Mundial, technical paper number 45 y 46, ASTM, referente para datos obtenidos de perfilómetros, método estático rod and level, nivel y mira, así también, considerando manuales y/o normativas internacionales (España, Colombia, Costa Rica, Cuba, México,

chile, otros) y nacionales. Este equipo es bastante conocido y accesible en nuestra región, sin embargo, el empleo para determinar la rugosidad en carreteras de tramos extensos, se ve afectado por factores de tiempo y costo. El presente método consiste en la obtención del perfil longitudinal de un tramo o sección de carretera a lo largo de la huella de rodadura, espaciados a intervalos definidos.



Figura N° 44: Carretera en estudio.

4.2.2. Método Rod and Level.

4.2.2.1. Ejecución de ensayo.

Los trabajos realizados con el método rod and level, se hizo uso del equipo mira y nivel. Los procedimientos son secuencialmente resumidos en el siguiente detalle:

Se identificó las distintas características de la carretera, tomando énfasis a la superficie vial, pues es en donde se realizará la recolección de información.

Seguidamente se ubicó el punto de control PC1, cota con el que se empezó la nivelación.



Figura N° 45: Ubicación del PC1.

Se trabajó con un total de 6 personas, divididas en distintas cuadrillas como: Cuadrilla para la colocación de puntos de nivelación en la huella, los puntos de nivelación se colocaron en todo el tramo de estudio, a intervalos de 0.50 metros, los materiales empleados fueron hojas de 5.25x4.95 cm de color rojo para marca de puntos, cinta métrica con hoja de acero de 30 m, flexo hoja de acero de 7.5 m y 5 m, tachuelas 13/16", cordel, martillo, alicate, otros.



Figura N° 46: Ubicación de puntos de nivelación.

La ubicación de la huella estuvo entre 0.5 m a 0.8 m del borde de la carretera (dependiendo). Para la ubicación de la huella se consideró el criterio profesional referido al tema de estudio, ya que la presente carretera se encuentra en mal estado, donde los vehículos son conducidos por las huellas o áreas adecuadas transitables, se hace difícil ubicar el borde de la vía, borde de zanja de coronación y/o borde de cuneta, por lo que no se podría definir una ubicación exacta de la huella.

Por otro lado, también existe la cuadrilla compuesta por el operador de nivel (con experiencia), anotador de libreta para minimizar errores, portador de mira, otros. Las cuadrillas fueron multifuncionales ya que existen diferentes trabajos para realizar.



Figura N° 47: Nivelación en el tramo de estudio.

Se realizó una nivelación geométrica de alta precisión, con visuales de 50.00 m, cierres de nivelación cada 50.00 m, con un error máximo tolerable de $\pm 0.02\sqrt{k}$.

Al culminar la nivelación en campo y obtenida la información requerida, se continuó realizando los procedimientos en oficina, donde se procesó dicha información de campo, que fue base para el cálculo del IRI.

Finalmente, con las cotas obtenidas mediante un filtro se calculó el índice de rugosidad internacional, haciendo uso de un programa de cómputo recomendado por el Banco Mundial, que está en programa visual, configurándose en esta investigación a la programación Visual Basic del Excel. El formato de entrada configurado para la programación es bastante sencillo y comprensible como se detalla a continuación:

El formato está compuesto por dos bloques de entrada: la primera corresponde a los datos a introducir, dividida en longitud, cotas e intervalos de medición, donde la longitud está en función de los intervalos de medición, es decir, primero se deberá considerar o introducir el intervalo de medición para posterior seguir o arrastrar con el icono de celda hasta la longitud requerida, así también, en las cotas se deberá introducir las medidas en cada punto. El segundo bloque corresponde a los resultados, que está dividida en longitud total de la carretera evaluada y el cálculo del IRI (m/km) en dicha longitud. Se adjunta cotas del método estático rod and level en el anexo G

A	B	C	D	E
DATOS A INTRODUCIR:			RESULTADOS	
LONGITUD (M)	COTAS (M)	Intervalo (m)	Longitud (m)	IRI (M/KM)

Figura N° 48: Formato de introducción de datos.

4.2.2.2. Resultados de perfiles y variaciones.

- Perfil y variación en una longitud de 50.00 metros, tramo 0.00 a 50.00 m,
Dx = 0.50 m.

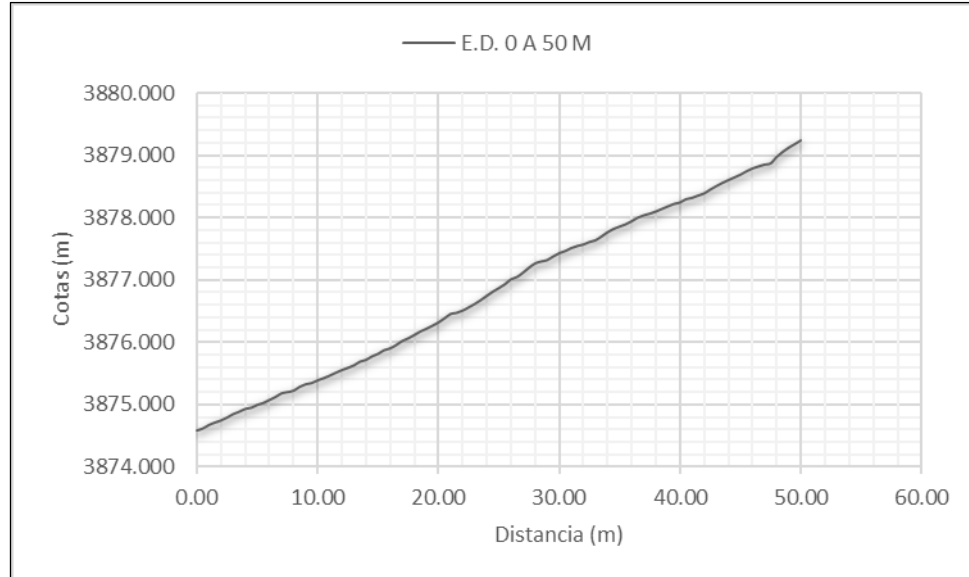


Figura N° 49: Perfil tramo 0.00 a 50.00 m.

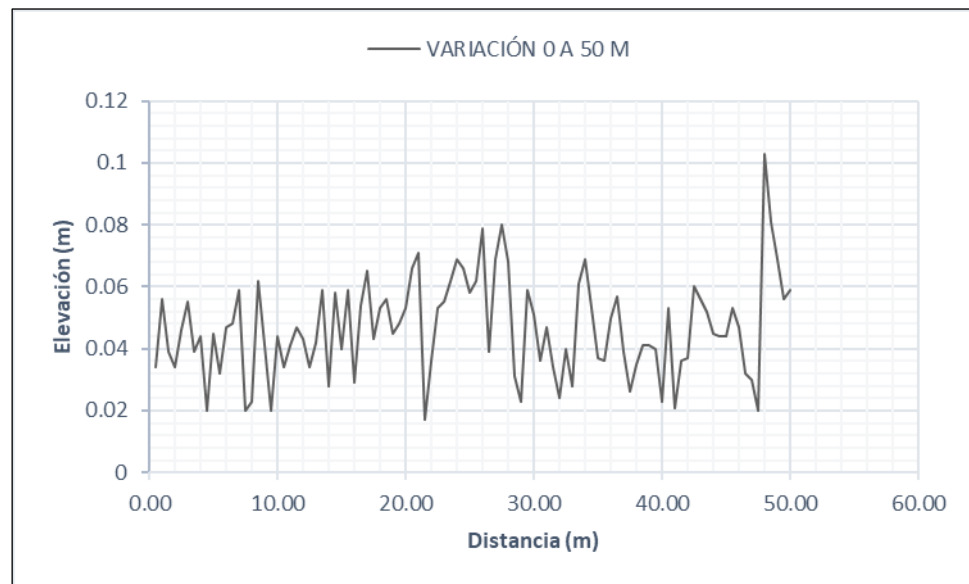


Figura N° 50: Variación tramo 0.00 a 50.00 m.

- Perfil y variación en una longitud de 50.00 metros, tramo 0.50 a 100.00 m,
 $Dx = 0.50$ m.

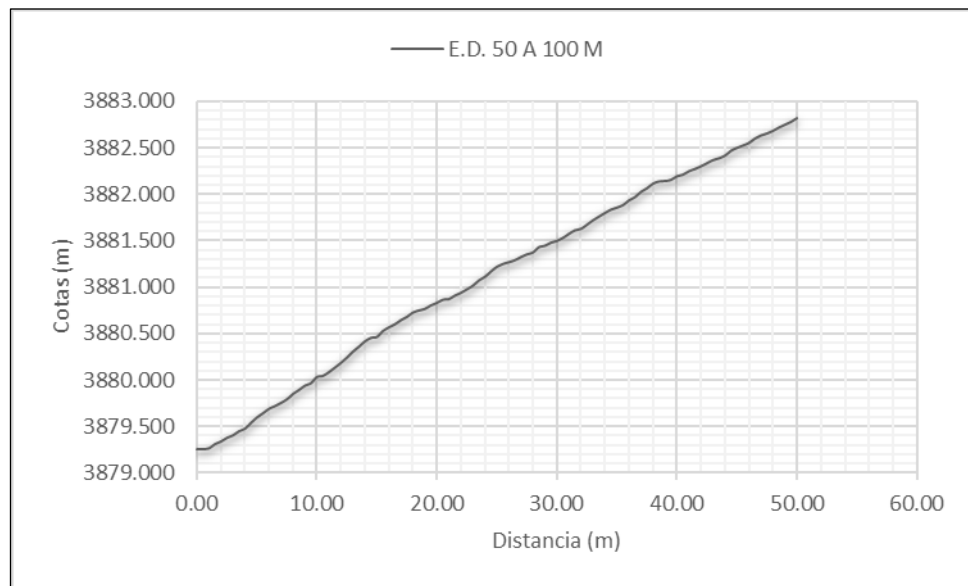


Figura N° 51: Perfil tramo 50.00 a 100.00 m.

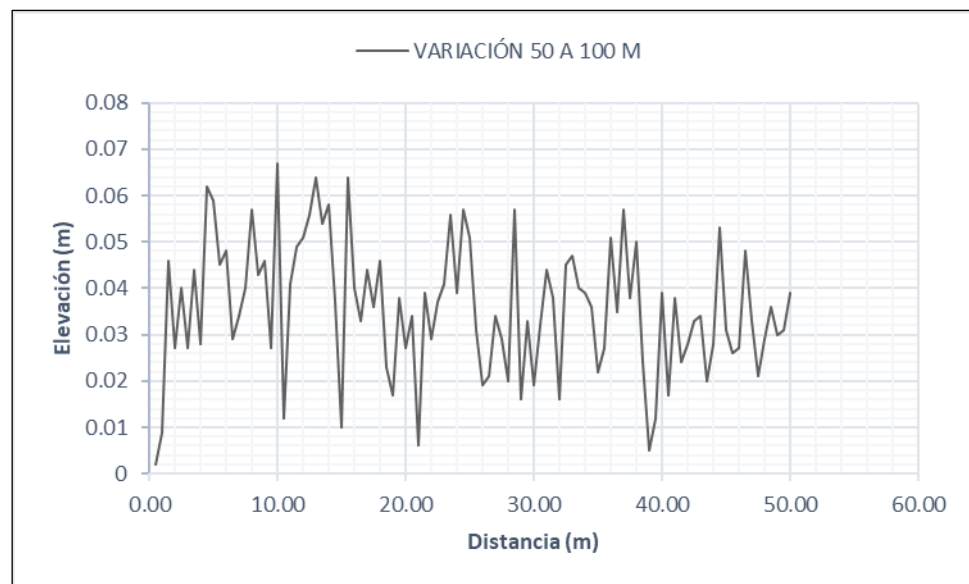


Figura N° 52: Variación tramo 50.00 a 100.00 m.

Los perfiles y variaciones de las longitudes de 100 a 400 metros, se adjuntan en el anexo C.



4.2.3. Resultados obtenidos IRI.

Los resultados en valores IRI, se analizaron en secciones de 50.00 metros de longitud.

Tabla N° 17: Valores de IRI con el método estático

ENSAYO	TRAMO (M)		IRI (M/KM)
1	00.00	50.00	27.15
2	50.00	100.00	23.93
3	100.00	150.00	20.69
4	150.00	200.00	18.47
5	200.00	250.00	15.24
6	250.00	300.00	11.17
7	300.00	350.00	15.14
8	350.00	400.00	16.61

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.3. RUGOSIDAD SUPERFICIAL POR MÉTODO INDIRECTO

4.3.1. Descripción.

En la actualidad los avances de la tecnología han dado grandes pasos en el desarrollo de los diferentes rubros de la ingeniería civil, donde los equipos, herramientas o instrumentos de ingeniería no fueron la excepción, la nueva generación de equipos son fundamentados para diferentes fines como facilitar los trabajos de campo, incrementar rendimiento, reducir costos, reducir mano de obra, entre otros factores, que a comparación de los métodos clásicos o antecesores resultan ser bastante ventajosos. Respecto a la aplicación de la fotogrametría, el desarrollo y lanzamiento del equipo reciente



phantom 4 RTK industrial, que de acuerdo a sus especificaciones, considera un equipo de alta tecnología en trabajos de ingeniería civil, topografía, agrícola, entre otros, teniendo características de medición con precisiones milimétricas, por lo que este equipo phantom 4 RTK promete muchas ventajas que sus antecesores RPA.

Por lo tanto, tomando en consideración lo descrito se hace necesario realizar trabajos de investigación del equipo Phantom 4 RTK, para aceptar sus beneficios y ventajas o de lo contrario parametrizarlos en sus aplicaciones.

4.3.2. Sistema de aeronaves pilotadas a distancia P4RTK.

4.3.2.1. Ejecución de ensayo.

Los trabajos realizados con el método indirecto con sistemas de aeronaves pilotadas a distancia equipo Phantom 4 RTK, son secuencialmente resumidos en el siguiente detalle:

Se verificó las características de la zona de estudio, dando mayor consideración a la superficie vial, donde se ubicó el punto de estación a la parte más alta del tramo de estudio.

Seguidamente, se ubicó el punto de control PC2, donde se situó la estación móvil del RPAS P4RTK. Se programó 05 vuelos lineales que corresponde a carreteras, entre ellos 03 vuelos a 30 metros de altura y dos a 50 metros de altura, luego se puso en marcha el P4RTK.



Figura N° 53: Ubicación de la estación móvil en PC2.



Figura N° 54: Vuelo programado a 30 metros de altura.



Figura N° 55: Vuelo programado a 50 metros de altura.

Finalizado el trabajo de campo, se realizó el post procesamiento, que corresponde a realizar las actividades en gabinete, los programas y/o softwares principales empleados fueron: Agisoft Metashape Profesional 1.5.3, Quick Terrain Modeler, BIGI3D.NET, Global Mapper V.20, Google Earth Pro, Civil 3D 2018, Excel, otros.

A continuación, se muestran las fotografías del procesamiento de datos del vuelo N° 01.

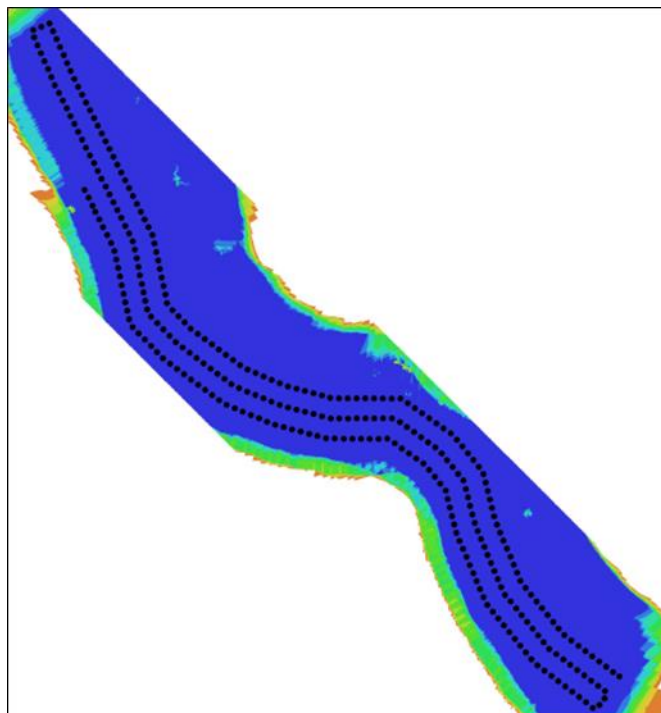


Figura N° 56: Fotografías según dirección, programación de vuelo.

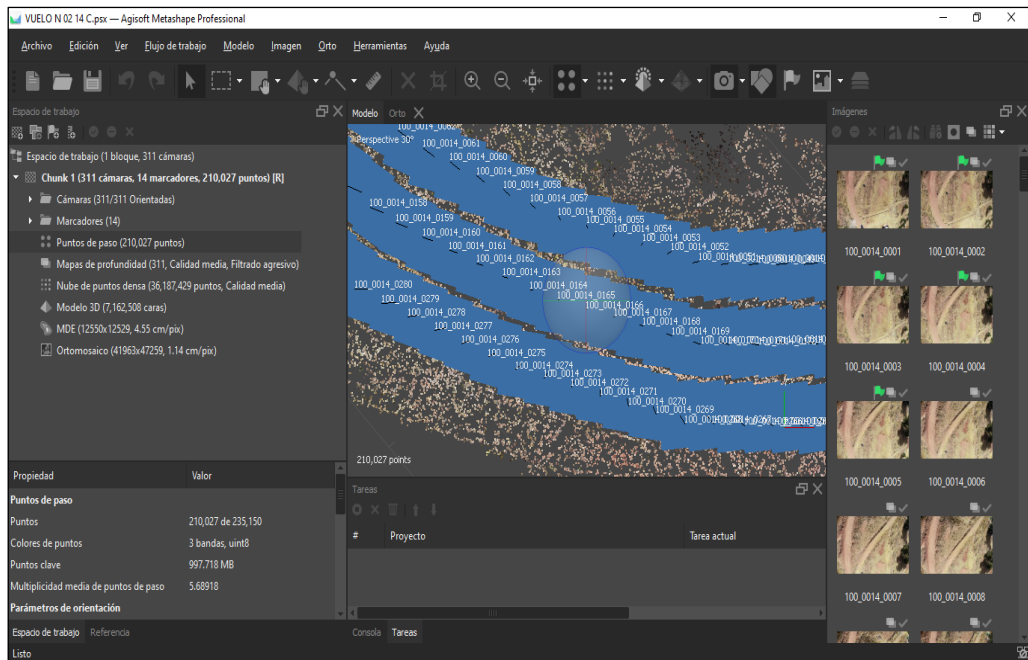


Figura N° 57: Fotografías orientadas en software agisoft Metashape Pro.

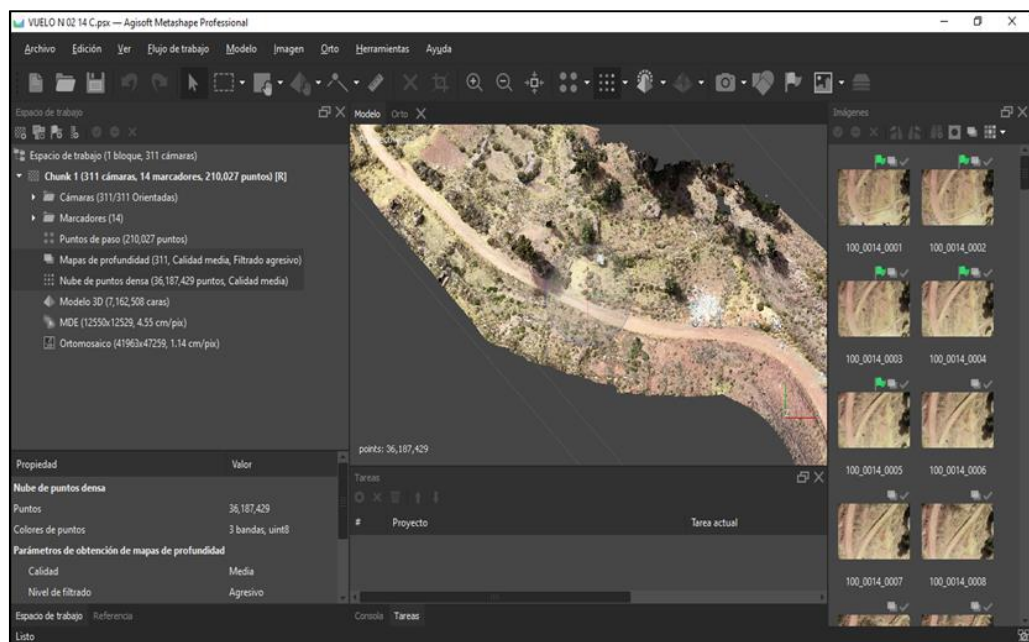


Figura N° 58: Nube de puntos densa.

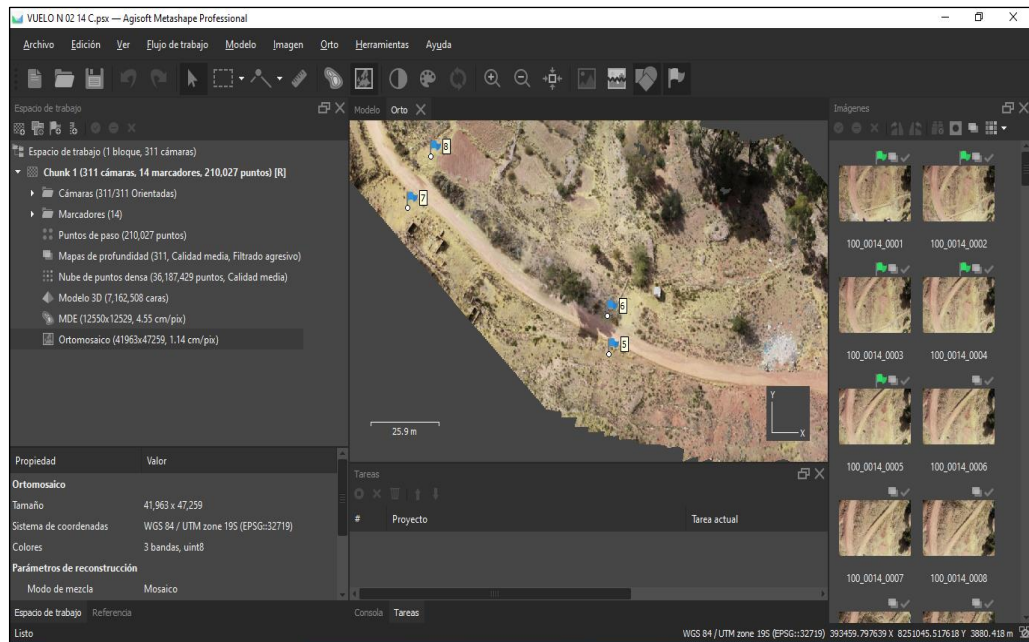


Figura N° 59: Ortofotografía de alta calidad.

Durante el post procesamiento, se descartó los vuelos de 50 metros ya que estos vuelos tenían menor precisión, es decir, adquirirían mayor GSD que los vuelos programados a 30 metros.

Culminada el procesamiento de información se obtiene la ortofotografía de alta calidad, la nube de puntos densa, modelo digital de elevaciones, modelo digital de terreno, perfil de terreno, entre otros., que a diferencia del método estático directo solamente se obtuvo el perfil.

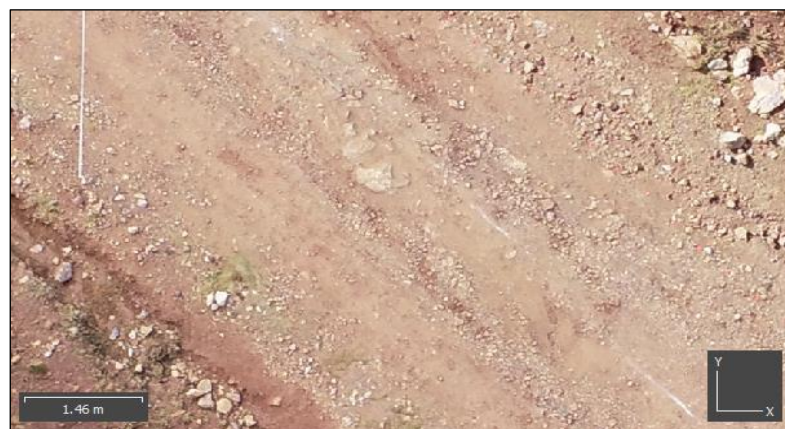


Figura N° 60: detalle de superficie vial en Ortofotografía.

En la ortofoto de alta calidad se realiza los procedimientos efectuados por el método estático directo, como es la ubicación de los puntos de nivelación, que ya fueron marcados en campo en todo el trayecto de la huella.



Figura N° 61: Ubicación de puntos de nivelación en la ortofotografía.

Se obtuvo las cotas del perfil de la carretera, siguiendo los puntos ya marcados en campo y captados en la ortofotografía. Las elevaciones y/o coordenadas obtenidas por los tres vuelos a 30 metros de altura se adjuntan en los anexos. Por otro lado, respecto a las ortofotografías de los vuelos, debido a su alta calidad, esta presenta problemas al momento de la impresión, por lo que se presenta en archivos digital CDs.

Finalmente, con las cotas obtenidas se calculó el índice de rugosidad internacional, siguiendo los mismos procedimientos del método estático directo. Todos estos trabajos se realizan desde una computadora, lo cual genera mayores facilidades y ventajas frente al método directo. Se adjunta cotas del RPAS P4RTK en los anexos D, E y F.

4.3.2.2. Resultados de perfil y variación, obtenidos con el P4RTK.

Los siguientes perfiles y variaciones corresponden al vuelo N° 01, altura de vuelo 30 metros, así también los vuelos N° 02 y N° 03 se muestran en los anexos.

- Perfil y variación en una longitud de 50.00 metros, tramo 0.00 a 50.00 m, $Dx = 0.50$ m.

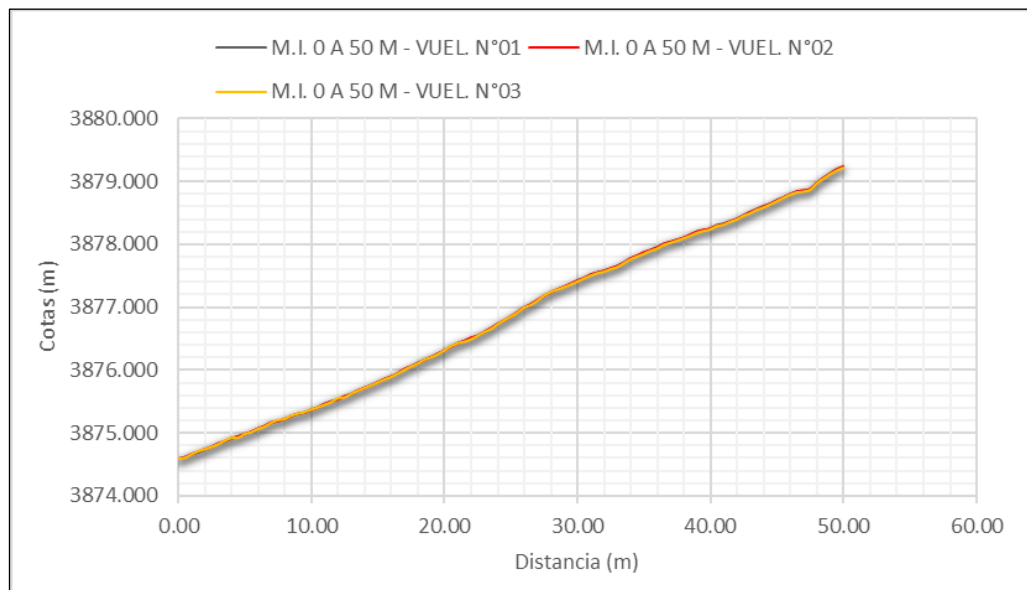


Figura N° 62: Perfil tramo 0.00 a 50.00 m – P4RTK.

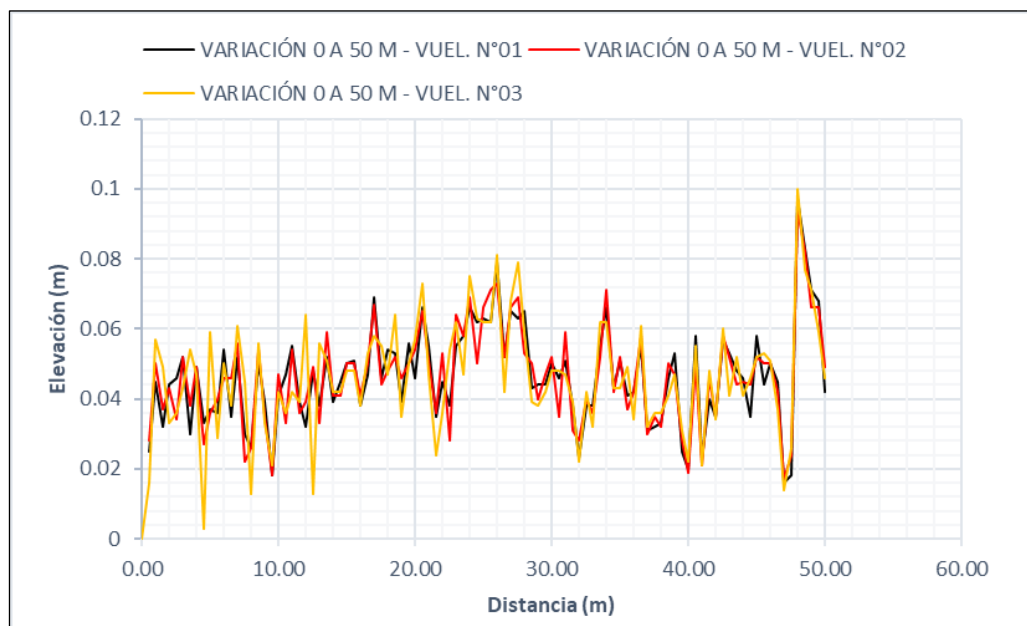


Figura N° 63: Variación tramo 0.00 a 50.00 m – P4RTK.

- Perfil y variación en una longitud de 50.00 metros, tramo 50.00 a 100.00 m, $Dx = 0.50$ m.

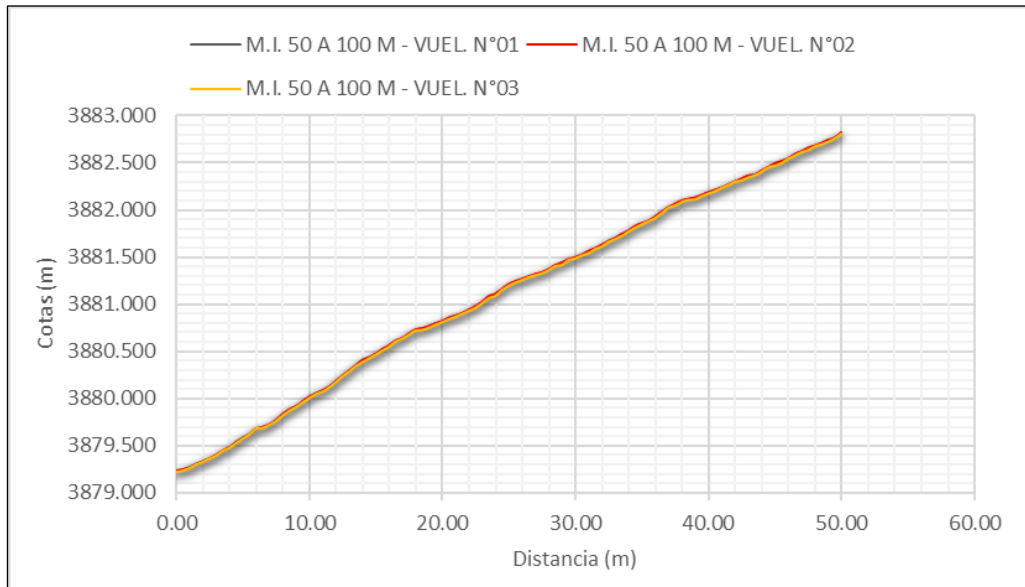


Figura N° 64: Perfil tramo 50.00 a 100.00 m – P4RTK.

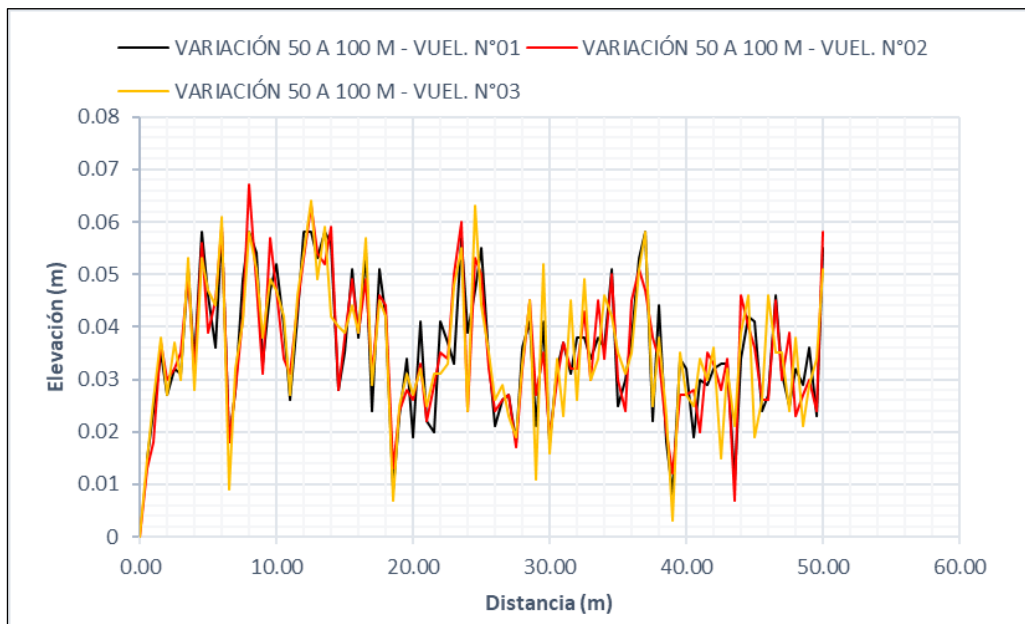


Figura N° 65: Variación tramo 50.00 a 100.00 m – P4RTK.

Los perfiles y variaciones de las longitudes de 100 a 600 metros, se adjuntan en el anexo B.



4.3.3. Resultados obtenidos IRI con método indirecto.

Los valores de IRI obtenidos en cada vuelo, se analizaron en secciones de 50 metros de longitud.

4.3.3.1. Resultados del vuelo N° 01.

Tabla N° 18: Valores de IRI mediante RPAS vuelo N° 01

ENSAYO	TRAMO (M)		IRI (M/KM)
1	00.00	50.00	22.18
2	50.00	100.00	21.85
3	100.00	150.00	19.15
4	150.00	200.00	19.12
5	200.00	250.00	13.94
6	250.00	300.00	12.32
7	300.00	350.00	17.32
8	350.00	400.00	15.42

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.



4.3.3.2. Resultados del vuelo N° 02.

Tabla N° 19: Valores de IRI mediante RPAS vuelo N° 02

ENSAYO	TRAMO (M)		IRI (M/KM)
1	00.00	50.00	22.52
2	50.00	100.00	22.06
3	100.00	150.00	18.23
4	150.00	200.00	18.45
5	200.00	250.00	13.93
6	250.00	300.00	12.18
7	300.00	350.00	16.23
8	350.00	400.00	14.99

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.3.3.3. Resultados del vuelo N° 03.

Tabla N° 20: Valores de IRI mediante RPAS vuelo N° 03

ENSAYO	TRAMO (M)		IRI (M/KM)
1	00.00	50.00	24.89
2	50.00	100.00	21.05
3	100.00	150.00	17.22
4	150.00	200.00	19.10
5	200.00	250.00	14.34
6	250.00	300.00	11.12
7	300.00	350.00	14.20
8	350.00	400.00	16.19

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.4. ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL MÉTODO ESTÁTICO DIRECTO Y EL MÉTODO INDIRECTO RPAS PHANTOM 4 RTK

4.4.1. Precisión en puntos de análisis para los diferentes vuelos.

- GPS de precisión y vuelo N° 01

Se aplica el test o estadístico de prueba T Student para muestras relacionadas con un nivel de significancia del 0.05, bajo las siguientes condiciones de hipótesis nula (H0) y alternativa (H1):

Ho: Los resultados obtenidos con el GPS de precisión y el vuelo N° 01 mediante el equipo Phantom 4 RTK, no tienen diferencias estadísticas significativas.

H1: Los resultados obtenidos con el GPS de precisión y el vuelo N° 01 mediante el equipo Phantom 4 RTK, presentan diferencias estadísticas significativas.

Tabla N° 21: Diferencia GPS de precisión y vuelo N° 01

DESCRIPCIÓN	ESTE	NORTE	COTA
1	0.003	0.011	-0.029
2	0.006	-0.012	-0.011
3	-0.015	-0.009	0.020
4	-0.008	-0.003	-0.030
5	0.001	0.000	0.017
6	0.005	0.001	-0.025
7	-0.006	-0.010	0.006
8	-0.008	0.001	0.008
9	0.006	-0.003	-0.016
10	0.004	0.000	0.015
11	0.004	-0.008	0.002
12	-0.002	0.012	-0.025

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla N° 22: Prueba t para medias de dos muestras

	Variable 1	Variable 2
Media	3881.319167	3881.3135
Varianza	21.92830979	21.88483391
Observaciones	12	12
Coefficiente de correlación de Pearson	0.999992191	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	11	
Estadístico t	1.029315348	
P(T<=t) una cola	0.162716671	
Valor crítico de t (una cola)	1.795884819	
P(T<=t) dos colas	0.325433343	
Valor crítico de t (dos colas)	2.20098516	

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Respecto al vuelo N° 01, los resultados que se muestran en la tabla, P es mayor que la significancia y el t calculado está dentro del área de aceptación, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula H_0 : Los resultados obtenidos con el GPS de precisión y el vuelo N° 01 mediante el equipo Phantom 4 RTK, no tienen diferencias estadísticas significativas, y se rechaza la hipótesis alternativa.

- GPS de precisión y vuelo N° 02

Se aplica el test o estadístico de prueba T Student para muestras relacionadas con un nivel de significancia del 0.05, bajo las siguientes condiciones de hipótesis nula (H_0) y alternativa (H_1):

H_0 : Los resultados obtenidos con el GPS de precisión y el vuelo N° 02 mediante el equipo Phantom 4 RTK, no tienen diferencias estadísticas significativas.

H_1 : Los resultados obtenidos con el GPS de precisión y el vuelo N° 02 mediante el equipo Phantom 4 RTK, presentan diferencias estadísticas significativas.

Tabla N° 23: Diferencia GPS de precisión y vuelo N° 02

DESCRIPCIÓN	ESTE	NORTE	COTA
1	-0.002	-0.001	-0.031
2	0.010	-0.010	-0.012
3	-0.009	-0.009	0.013
4	-0.006	-0.006	-0.039
5	0.001	0.000	0.015
6	0.002	0.002	-0.021
7	-0.009	-0.019	0.006
8	-0.007	0.005	0.005
9	0.002	0.000	-0.018
10	0.008	-0.004	0.016
11	0.008	-0.003	0.005
12	-0.003	0.010	-0.018

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla N° 24: Prueba t para medias de dos muestras

	Variable 1	Variable 2
Media	3881.3135	3881.32083
Varianza	21.88483391	21.94410736
Observaciones	12	12
Coefficiente de correlación de Pearson	0.999992761	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	11	
Estadístico t	1.206384899	
P(T<=t) una cola	0.126487277	
Valor crítico de t (una cola)	1.795884819	
P(T<=t) dos colas	0.252974554	
Valor crítico de t (dos colas)	2.20098516	

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Respecto al vuelo N° 02, los resultados que se muestran en la tabla, P es mayor que la significancia y el t calculado está dentro del área de aceptación, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula H_0 : Los resultados obtenidos con el GPS de precisión y el vuelo N° 02 mediante el equipo Phantom 4 RTK, no tienen diferencias estadísticas significativas, y se rechaza la hipótesis alternativa



- GPS de precisión y vuelo N° 03

Se aplica el test o estadístico de prueba T Student para muestras relacionadas con un nivel de significancia del 0.05, bajo las siguientes condiciones de hipótesis nula (H0) y alternativa (H1):

Ho: Los resultados obtenidos con el GPS de precisión y el vuelo N° 03 mediante el equipo Phantom 4 RTK, no tienen diferencias estadísticas significativas.

H1: Los resultados obtenidos con el GPS de precisión y el vuelo N° 03 mediante el equipo Phantom 4 RTK, presentan diferencias estadísticas significativas.

Tabla N° 25: Diferencia GPS de precisión y vuelo N° 03

DESCRIPCIÓN	ESTE	NORTE	COTA
1	0.001	0.003	-0.033
2	0.002	-0.008	-0.016
3	-0.013	-0.010	0.018
4	-0.006	-0.008	-0.053
5	-0.009	0.001	0.004
6	-0.006	0.004	-0.033
7	-0.001	-0.009	0.002
8	-0.002	0.007	0.013
9	0.009	0.001	-0.019
10	0.009	-0.005	0.013
11	0.004	-0.006	0.019
12	-0.007	0.007	-0.024

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla N° 26: Prueba t para medias de dos muestras

	Variable 1	Variable 2
Media	3881.3135	3881.322583
Varianza	21.88483391	21.9958839
Observaciones	12	12
Coefficiente de correlación de Pearson	0.999990289	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	11	
	-	
Estadístico t	1.321863337	
P(T<=t) una cola	0.106521939	
Valor crítico de t (una cola)	1.795884819	
P(T<=t) dos colas	0.213043878	
Valor crítico de t (dos colas)	2.20098516	

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Respecto al vuelo N° 03, los resultados que se muestran en la tabla, P es mayor que la significancia y el t calculado está dentro del área de aceptación, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula H_0 : Los resultados obtenidos con el GPS de precisión y el vuelo N° 03 mediante el equipo Phantom 4 RTK, no tienen diferencias estadísticas significativas, y se rechaza la hipótesis alternativa

4.4.2. Precisiones de los 3 vuelos.

Se aplica el test estadístico análisis de varianza ANOVA para comparar de manera simultánea los perfiles de los tres vuelos, nivel de significancia al 0.05, los criterios para la hipótesis nula (H_0) y alternativa (H_1), son como se detalla:

H_0 : Los resultados obtenidos al realizar los vuelos mediante el RPAS equipo Phantom 4 RTK, no tienen diferencias estadísticas significativas.

H_1 : Los resultados obtenidos al realizar los vuelos mediante el RPAS equipo Phantom 4 RTK, presentan diferencias estadísticas significativas.

- Análisis estadístico en el tramo 0.00 a 200.00 metros, $Dx=0.50$ metros.

Tabla N° 27: Análisis de varianza tramo 0.00 a 200.00 m

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Variable 1	401	1556752.82	3882.176608	14.37149781		
Variable 2	401	1556753.702	3882.178808	14.38293909		
Variable 3	401	1556752.378	3882.175506	14.3949963		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.002266221	2	0.001133111	7.87804E-05	0.999921223	3.003223412
Dentro de los grupos	17259.77328	1200	14.3831444			
Total	17259.77554	1202				

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.



De la tabla, en el tramo 00.00 a 200.00 metros, se muestra que la F calculada es menor que la F tabulada y el valor de p es mayor que el nivel de significancia, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula H_0 : Los resultados obtenidos al realizar los vuelos mediante el RPAS equipo Phantom 4 RTK, no tienen diferencias estadísticas significativas, y se rechaza la hipótesis alternativa.

- Análisis estadístico en el tramo 200.00 a 400.00 metros, $Dx=1.00$ metro.



Tabla N° 28: Análisis de varianza tramo 200.00 a 400.00 m

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Variable 1	201	780695.986	3884.059632	8.532974594		
Variable 2	201	780696.838	3884.063871	8.567349433		
Variable 3	201	780697.251	3884.065925	8.560112049		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.004140461	2	0.002070231	0.000242034	0.999757996	3.010739538
Dentro de los grupos	5132.087215	600	8.553478692			
Total	5132.091356	602				

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

De la tabla, En el tramo 200.00 a 400.00 metros se muestra también, que la F calculada es menor que la F tabulada y el valor de p es mayor que el nivel de significancia, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula H_0 : Los resultados obtenidos al realizar los vuelos mediante el RPAS equipo Phantom 4 RTK, no tienen diferencias estadísticas significativas, y se rechaza la hipótesis alternativa.

4.4.3. Comparación de los resultados obtenidos IRI.

En la tabla se muestra los valores de IRI obtenidos por el método estático directo y el phantom 4 RTK.

Tabla N° 29: Comparación de resultados IRI M/KM

ENSAYO	TRAMO m		M.D. m/km	IRI VUELOS m/km			PROMEDIO m/km
				N° 01	N° 02	N° 03	
1	0.00	50.00	27.15	22.18	22.52	24.89	23.20
2	50.00	100.00	23.93	21.85	22.06	21.05	21.65
3	100.00	150.00	20.69	19.15	18.23	17.22	18.20
4	150.00	200.00	18.47	19.12	18.45	19.10	18.89
5	200.00	250.00	15.24	13.94	13.93	14.34	14.07
6	250.00	300.00	11.17	12.32	12.18	11.12	11.87
7	300.00	350.00	15.14	17.32	16.23	14.20	15.92
8	350.00	400.00	16.61	15.42	14.99	16.19	15.53
PROMEDIO			18.55	17.66	17.32	17.26	17.42

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

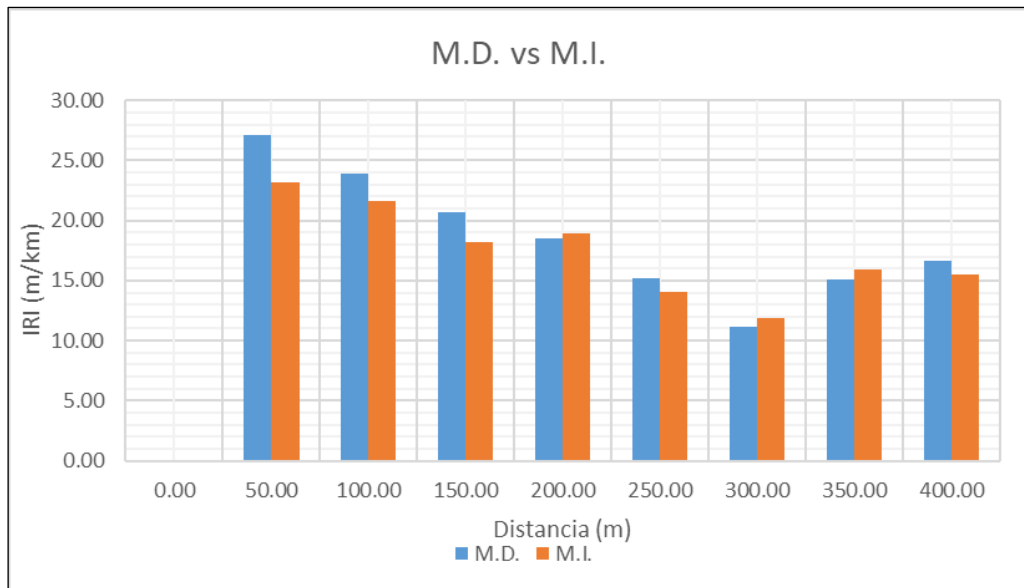


Figura N° 66: Resultados de las mediciones de IRI mediante M.D. y M.I.

De la figura, se puede interpretar que los valores de IRI, calculado a partir de información con RPAS Phantom 4 RTK, muestra diferencias respecto al método estático directo rod and level.

A continuación, se muestra los porcentajes de similitud en los valores de IRI por el método indirecto respecto al método directo.

Tabla N° 30: Porcentaje de similitud en los valores de IRI M/KM

ENSAYO	TRAMO m		M.D. m/km	IRI VUELOS m/km			PROMEDIO m/km	SIMILITUD %
				N° 01	N° 02	N° 03		
1	0.00	50.00	27.15	22.18	22.52	24.89	23.20	85.44
2	50.00	100.00	23.93	21.85	22.06	21.05	21.65	90.49
3	100.00	150.00	20.69	19.15	18.23	17.22	18.20	87.97
4	150.00	200.00	18.47	19.12	18.45	19.10	18.89	102.27
5	200.00	250.00	15.24	13.94	13.93	14.34	14.07	92.32
6	250.00	300.00	11.17	12.32	12.18	11.12	11.87	106.30
7	300.00	350.00	15.14	17.32	16.23	14.20	15.92	105.13
8	350.00	400.00	16.61	15.42	14.99	16.19	15.53	93.52
PROMEDIO			18.55	17.66	17.32	17.26	17.42	93.89

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.



En la tabla se aprecia, que existen tramos en donde el IRI con RPAS P4RTK respecto al método directo son similares, llegando hasta 102.27 % en sección 150.00 a 200.00 metros, así también, tiende a diferir hasta un 85.44% en sección 0.00 a 50.00 metros. Esto se debe a las características de la vía y el equipo de método estático, siendo esta última clasificada de tipo I alta precisión, que a diferencia del método fotogramétrico son equipos que captan información de manera indirecta.

El promedio IRI de las diferentes secciones del tramo mediante el método estático directo rod and level es 18.55 m/km y con el método indirecto sistema de aeronaves pilotadas a distancia Phantom 4 RTK es 17.42 m/km, obteniéndose un parecido de 93.89 %, lo cual se demostró mediante análisis estadístico.

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson que es un índice para medir el grado de relación de dos medidas, siempre y cuando ambas sean cuantitativas y mientras más grande sea la muestra más exacta será la estimación.

$$r = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \sqrt{n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2}} \dots\dots\dots (17)$$

Tabla N° 31: cálculo de “r”

ENSAYO	CORRELACIÓN DE PEARSON “r”				
	IRI(M/KM)		X ²	Y ²	X.Y
	IRI M.D. Y	IRI P4RTK. X			
1	27.15	23.20	538.085	737.123	629.790
2	23.93	21.65	468.867	572.645	518.164
3	20.69	18.20	331.240	428.076	376.558
4	18.47	18.89	356.832	341.141	348.898
5	15.24	14.07	197.965	232.258	214.427
6	11.17	11.87	140.976	124.769	132.625
7	15.14	15.92	253.340	229.220	240.978
8	16.61	15.53	241.284	275.892	258.009
SUMA	148.40	139.33	2528.59	2941.12	2719.45

r = 0.9734

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Mediante la fórmula, se obtuvo en la tabla una correlación de Pearson “r” de 0.9734, interpretándose este valor dentro de una tendencia de positiva muy fuerte, lo cual indica una correlación bastante adecuada.

4.5. ANÁLISIS DE REGRESIÓN Y CORRELACIÓN

Se realizó este proceso a partir del análisis de regresión y correlación con fines de estimar el grado de correspondencia y relación entre variables.

4.5.1. Procesamiento de las medidas.

Conocido los valores de IRI en las diferentes secciones del tramo, es necesario encontrar una correlación adecuada de las medidas realizadas con los métodos Rod and level y el método indirecto con Phantom 4 RTK mediante una ecuación que represente o traduzca las lecturas del RPAS a los valores de IRI del método estático.

Se realizó tres repeticiones por cada sección de tramo o prueba, en el siguiente cuadro se muestra los valores obtenidos por el P4RTK.



Tabla N° 32: Medidas IRI P4RTK (M/KM)

ENSAYO	TRAMO m		MEDIDA IRI P 4 RTK (M/KM) EN VUELOS		
			01	02	03
1	0.00	50.00	22.18	22.52	24.89
2	50.00	100.00	21.85	22.06	21.05
3	100.00	150.00	19.15	18.23	17.22
4	150.00	200.00	19.12	18.45	19.10
5	200.00	250.00	13.94	13.93	14.34
6	250.00	300.00	12.32	12.18	11.12
7	300.00	350.00	17.32	16.23	14.20
8	350.00	400.00	15.42	14.99	16.19

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Como se observa en la tabla N° 32, son un total de ocho ensayos con tres repeticiones por cada sección, donde los valores de IRI son obtenidos por cada sección de prueba.

Se procedió al análisis de regresión y correlación, pero antes se debe de tener en cuenta, realizar un análisis de valores o datos para descartar algunos que no representen adecuadamente los valores de repetibilidad, para esto debemos hacer uso de las herramientas estadísticas como el coeficiente de variación y la desviación estándar.

A continuación, se muestra una tabla con valores o datos estadísticos del índice de rugosidad internacional

Tabla N° 33: Estadística de datos IRI P4RTK

ENSAYO	TRAMO m		MEDIDAS IRI P4			PROM. m/km	DESV. ESTAND.	COEF. VAR.
			RTK					
			01	02	03			
1	0.00	50.00	22.18	22.52	24.89	23.20	1.476	0.064
2	50.00	100.00	21.85	22.06	21.05	21.65	0.533	0.025
3	100.00	150.00	19.15	18.23	17.22	18.20	0.965	0.053
4	150.00	200.00	19.12	18.45	19.10	18.89	0.381	0.020
5	200.00	250.00	13.94	13.93	14.34	14.07	0.234	0.017
6	250.00	300.00	12.32	12.18	11.12	11.87	0.656	0.055
7	300.00	350.00	17.32	16.23	14.20	15.92	1.583	0.099
8	350.00	400.00	15.42	14.99	16.19	15.53	0.608	0.039

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

La tabla N° 33, muestra los valores de la desviación estándar y el coeficiente de variación de los ocho ensayos, con tres repeticiones en cada una de las secciones de prueba, donde el mayor porcentaje de variación es en el ensayo 7 con una desviación estándar de 1.583, así también, el menor porcentaje de variación corresponde al ensayo 5 con una desviación estándar de 0.234.

En la presente investigación no se descartó ningún valor o dato obtenido mediante el phantom 4 RTK, con el objetivo de ser rigurosos en la obtención de la correlación.

4.5.2. Análisis de regresión.

Se realizó el análisis de los valores de IRI obtenidos mediante los métodos rod and level y método indirecto con el equipo Phantom 4 RTK. El análisis de regresión es a partir de la aplicación del método de los mínimos cuadrados, donde la ecuación puede resultar ser una función característica lineal, logarítmica, exponencial según corresponda.

A continuación, se muestra la gráfica de dispersión de datos de los valores IRI obtenidos con los dos métodos.

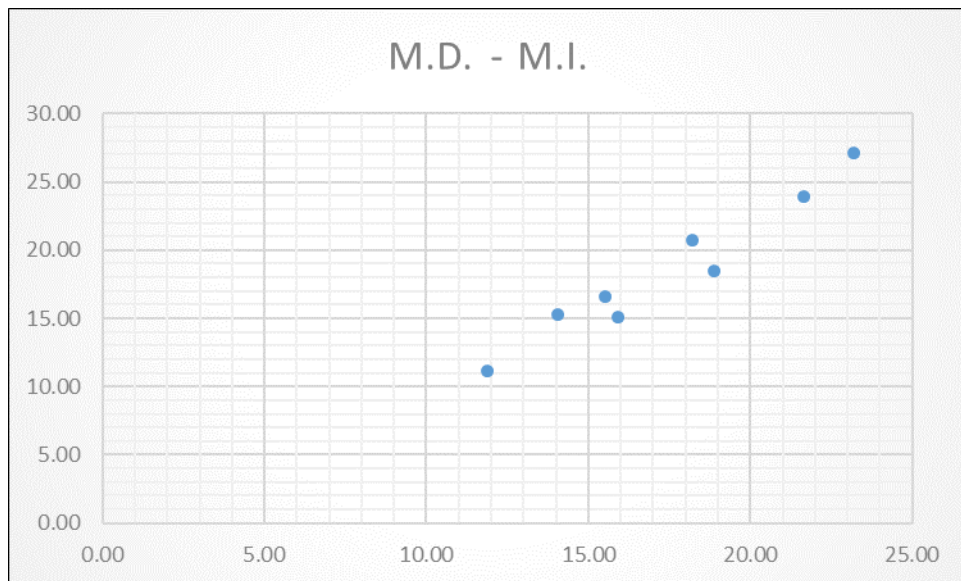


Figura N° 67: Dispersión de valores IRI.

Así también, se muestra el comportamiento de la línea o curva de regresión de dispersión de datos:

- Lineal

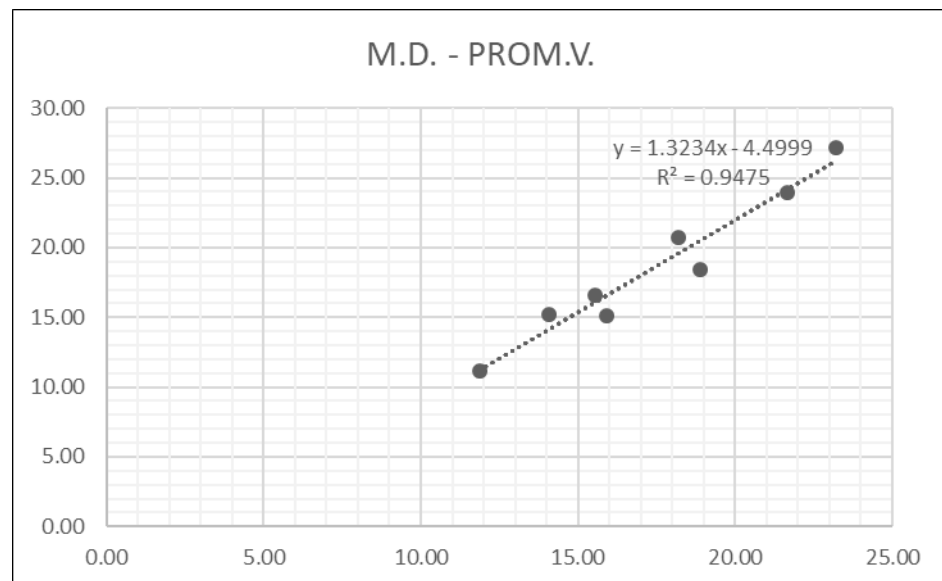


Figura N° 68: Regresión lineal de valores IRI.

- Exponencial

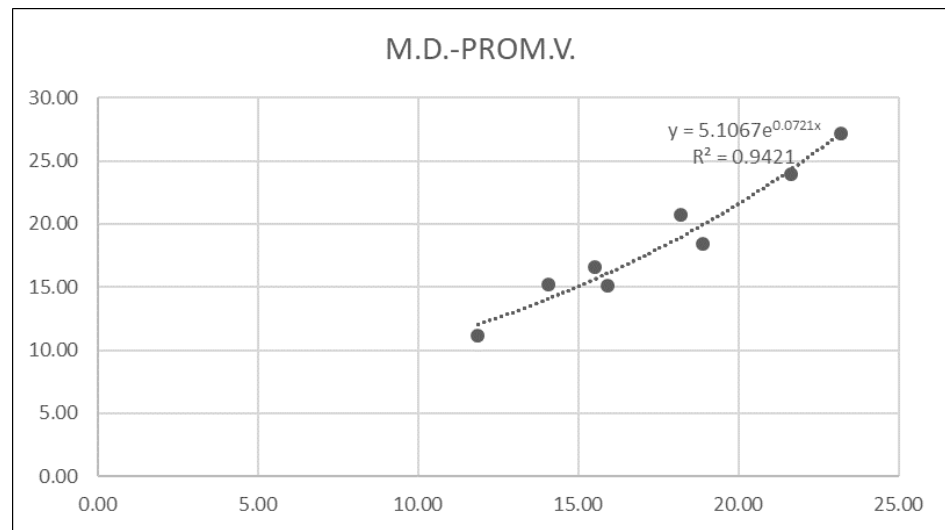


Figura N° 69: Regresión exponencial de valores IRI.

- Logarítmica

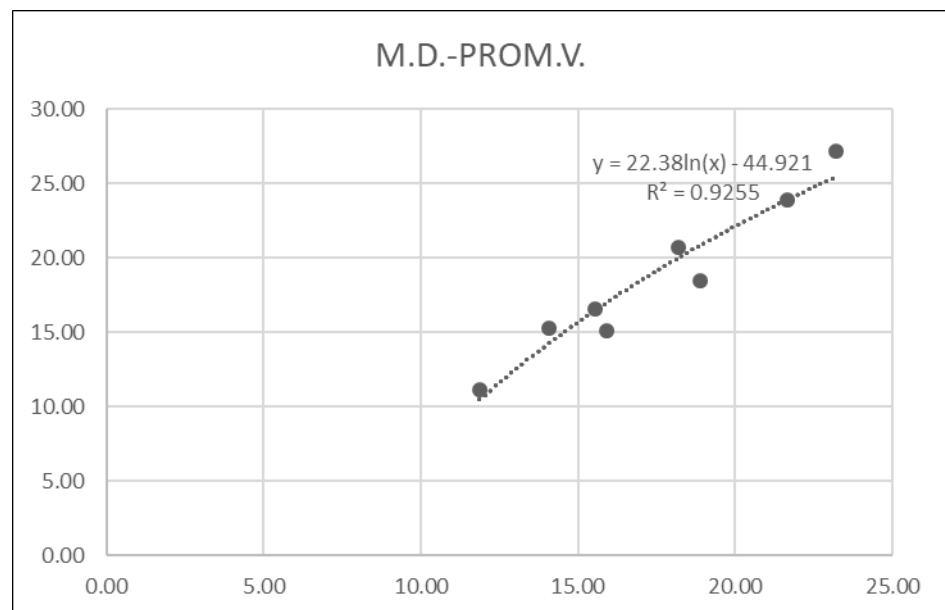


Figura N° 70: Regresión logarítmica de valores IRI.

- Potencial

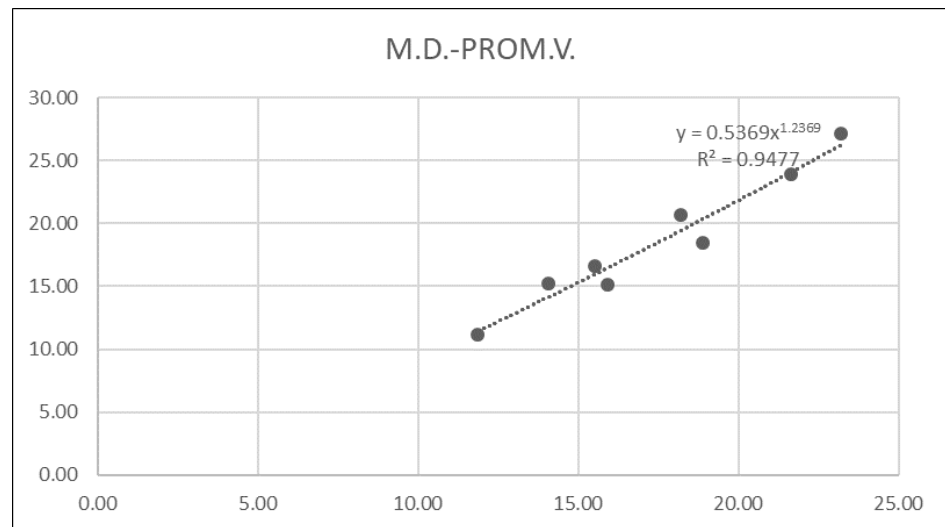


Figura N° 71: Regresión potencial de valores IRI.

Se calculó las ecuaciones de regresión que se ajustan a la dispersión de datos:

- Regresión lineal:

$$Y = 1.3234X - 4.4999, R^2 = 0.9475$$

- Regresión Exponencial:

$$Y = 5.1067e^{0.0721X}, R^2 = 0.9421$$

- Regresión logarítmica:

$$Y = 22.38 \ln(X) - 44.921, R^2 = 0.9255$$

- Regresión potencial:

$$Y = 0.5369X^{1.2369}, R^2 = 0.9477$$

Se realizó las evaluaciones de los valores IRI, obtenidos con el método Rod and Level y el método indirecto, aplicando las ecuaciones de regresión.



Tabla N° 34: Valores IRI mediante análisis de regresión

LONG. M	IRI (M/KM)		ECUACIONES DE REGRESIÓN			
	IRI M.D.	IRI P4RTK.	LINEAL	EXPONENCIAL	LOGARITMICA	POTENCIAL
50.00	27.15	23.20	26.20	27.19	25.44	26.23
100.00	23.93	21.65	24.16	24.33	23.90	24.09
150.00	20.69	18.20	19.59	18.97	20.01	19.43
200.00	18.47	18.89	20.50	19.94	20.85	20.35
250.00	15.24	14.07	14.12	14.08	14.25	14.13
300.00	11.17	11.87	11.21	12.02	10.45	11.46
350.00	15.14	15.92	16.56	16.09	17.01	16.46
400.00	16.61	15.53	16.06	15.65	16.47	15.97
PROM.	18.55	17.42	18.55	18.53	18.55	18.51

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

De la tabla N° 34, se observa que la ecuación lineal y la ecuación logarítmica son las que mejor correlacionan.

El análisis comparativo entre la ecuación lineal y logarítmica, respecto al que más se ajusta a la dispersión, se tiene en cuenta el error estándar de estimación.

Tomando en consideración lo indicado, para la investigación se emplea la regresión lineal.

4.5.3. Aplicación de la ecuación de regresión.



Tabla N° 35: Valores IRI a partir del P4RTK

TRAMO		IRI V. (M/KM)	IRI E.D. (M/KM)
0.00	50.00	23.20	26.20
50.00	100.00	21.65	24.16
100.00	150.00	18.20	19.59
150.00	200.00	18.89	20.50
200.00	250.00	14.07	14.12
250.00	300.00	11.87	11.21
300.00	350.00	15.92	16.56
350.00	400.00	15.53	16.06
400.00	450.00	13.86	13.84
450.00	500.00	9.06	7.49
500.00	550.00	9.04	7.46
550.00	600.00	11.59	10.84
PROMEDIO			15.67

FUENTE: Elaborado por el equipo de trabajo.

Este valor de índice de rugosidad internacional IRI 15.67 m/km, corresponde a todo el tramo de investigación y representa a una carretera no pavimentada con irregularidades, mal estado de transitabilidad, frecuentes defectos, erosiones y depresiones profundas en la superficie vial.



4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación, se establece que existe un nivel de confiabilidad aceptable en el valor de la rugosidad superficial en carretera no pavimentada a partir de información derivada del método indirecto con sistema de aeronaves pilotadas a distancia Phantom 4 RTK respecto al método estático directo rod and level.

Los resultados de la investigación guardan relación con lo que sustenta Angarita, Sánchez (2017) y Sánchez, Martínez (2018), donde tienen como objetivo determinar directamente el IRI a través de métodos fotogramétricos y compararlos con métodos convencionales de gran precisión.

Sánchez y Martínez (2018) expresa en su investigación que los valores del índice de rugosidad internacional obtenidos por métodos fotogramétricos, equipo merlín, método topográfico (nivel y mira) resultan similares, caracterizando a la misma clasificación el estado del pavimento $2.5 < IRI < 6$ pavimento viejo con imperfecciones superficiales, por lo que concluye que el procedimiento fotogramétrico ofrece gran precisión en el cálculo del Índice de Regularidad Internacional y rapidez en su implementación. Además, el modelo de superficie obtenido permite construir de un mismo pavimento varios perfiles longitudinales, por tanto, determinar varios valores de IRI, la cual posibilita obtener una clasificación más fidedigna de su estado, así también, la ortofotografía que se obtiene como parte del proceso fotogramétrico, nos muestran con gran detalle los distintos desperfectos de la vía, abriendo nuevos campos a investigaciones futuras.



Angarita y Sánchez (2017) expresa en su estudio, al realizar la comparación del método fotogramétrico con el escáner laser se generan resultados con diferencias tolerables abriendo la posibilidad de utilizar metodologías que analicen toda la superficie vial e identificar las diferentes fallas en el pavimento, por lo que generan valores agregados en el cálculo del IRI; el método topográfico convencional que se emplea para la estimación del IRI tienen limitaciones a la hora de la recolección de información, pues es imposible recolectar nube de datos tan densas como las generadas por el sistema aéreo no tripulado o el método de escanografía laser, dejando así una incertidumbre al detalle de información, que directamente es afectado a la estimación de dicho parámetro; la fotogrametría por medio de sistemas aéreos no tripulados ofrece valores agregados, como la ortofotografía de alta resolución, abriendo la posibilidad de identificar daños sobre el pavimento, tales como piel de cocodrilo, exudación, grietas, ahuellamientos y baches; el desarrollo del proyecto deja la posibilidad abierta de no solo estimar el IRI sobre la huella o zona que se supone transitar con mayor frecuencia los vehículos, si no de analizar toda la superficie de rodadura para fines de determinar una rugosidad con mayor detalle y mejor precisión. Finalmente menciona que la metodología propuesta acorde a los resultados que se obtiene, se recomienda emplear para estudios de IRI en redes viales de tránsito urbano, con fines de prevención y mantenimiento, con umbrales de precisión preestablecidos.

En la presente investigación, se realizó el análisis estadístico de los perfiles y de los valores IRI, obtenidos con el método estático directo y el método indirecto Phantom 4 RTK, para comparar y verificar la existencia de diferencias estadísticas significativas en las mediciones de ambos métodos, donde el resultado del análisis estadístico muestra que los perfiles y los valores de IRI no tienen diferencias



estadísticas significativas, y que ambos métodos tienen una correlación de tendencia a positiva muy fuerte, lo que indica que es bastante adecuada y/o óptimo, por lo tanto, se acepta la hipótesis planteada, el nivel de confiabilidad es aceptable, lo que es concordante con los autores señalados.

Los resultados IRI obtenidos en esta investigación, mediante el método estático directo rod and level es de 18.55 m/km y el método indirecto aplicando sistema de aeronaves pilotadas a distancia equipo Phantom 4 RTK es 17.42 m/km, que corresponde a una escala de clasificación, como una carretera no pavimentada con irregularidades, mal estado de transitabilidad, frecuentes defectos, presencia de erosiones y depresiones profundas en la superficie vial, por lo tanto, se aceptan las hipótesis específicas planteadas, guardando relación con los autores indicados.

A partir de los datos obtenidos con los métodos estático directo y método indirecto se obtiene un porcentaje de similitud de 93.89 %, se realizó un análisis de regresión, donde la ecuación lineal es la que mejor se ajusta a la dispersión de datos, obteniendo el valor de IRI promedio de todo el tramo 15.67 m/km, que corresponde a una carretera no pavimentada con irregularidades, mal estado de transitabilidad, frecuentes defectos, presencia de erosiones y depresiones profundas en la superficie vial.

Así también, se concuerda con los autores descritos, que el método indirecto mediante fotogrametría con RPAS equipo Phantom 4 RTK, ofrece valores agregados respecto al método estático directo con nivel y mira topográfica u otro método convencional como el merlín, siendo estas ventajas la ortofotografía de alta calidad, modelo digital de elevaciones, modelo digital de terreno, nube de puntos densa, otros., identificándose en la ortofotografía daños, deterioros,



baches, depresiones, encalaminados, entre otros problemas que se presentan en la superficie vial y alrededores, así también, del modelo digital de superficie permite construir varios perfiles longitudinales, de tal manera determinar varios valores IRI, obteniendo una clasificación más fidedigna del estado de la carretera.

Por lo tanto, el método indirecto mediante sistema de aeronaves pilotadas a distancia Phantom 4 RTK ofrece muchas ventajas respecto al método estático directo con nivel y mira, u otros equipos convencionales para el cálculo del IRI, las ventajas son el alto rendimiento en la recolección de datos de campo, información de toda la plataforma o superficie vial y alrededores, identificación de las distintas obras de arte, identificación de las distintas fallas en la superficie vial, entre otros, del mismo modo como producto ofrece la ortofotografía de alta resolución, modelo digital de elevaciones, modelo digital de terreno, nube de puntos densa, dispersa, otros. Así también, es preciso recalcar que con el método indirecto RPAS P4RTK se puede analizar el valor de IRI en toda la superficie de rodadura en mayor detalle y no solamente sobre la huella, lo que ayuda a una mejor seguridad en el valor de IRI, guardando relación con los autores mencionados.



V. CONCLUSIONES

- A partir de los resultados obtenidos, las pruebas estadísticas aplicadas y de acuerdo con el análisis de regresión, se establece que existe un nivel de confiabilidad aceptable directa en el valor de la rugosidad superficial de la carretera no pavimentada Dv. Isla Esteves – Emp. PE 3S Puno, mediante información derivada de método estático directo y método indirecto con sistema de aeronaves pilotadas a distancia P4RTK, donde las respuestas analizadas en escalas IRI, corresponde o representa a una carretera no pavimentada con irregularidades, frecuentes defectos, presencia de erosiones, depresiones profundas en la superficie vial.
- El valor del índice de rugosidad internacional en el tramo de estudio de la carretera Dv. Isla Esteves – Emp. PE 3S Puno, mediante el uso del método estático directo Rod and Level, resulta un IRI de 18.55 m/km, que corresponde a una carretera no pavimentada con irregularidades, mal estado de transitabilidad, frecuentes defectos, presencia de erosiones, depresiones profundas en la superficie vial.
- El valor del índice de rugosidad internacional en el tramo de estudio de la carretera Dv. Isla Esteves – Emp. PE 3S Puno, a partir del método indirecto con sistema de aeronaves pilotadas a distancia Phantom 4 RTK, resulta un IRI de 17.42 m/km, que corresponde en la misma escala de clasificación del método directo, como una carretera no pavimentada con irregularidades, mal estado de transitabilidad, frecuentes defectos, presencia de erosiones y depresiones profundas en la superficie vial.
- Los valores de índice de rugosidad internacional IRI, mediante el análisis de múltiples perfiles en las distintas secciones del tramo de estudio, a partir del método



estático directo rod and level y el método indirecto con sistema de aeronaves pilotadas a distancia Phantom 4 RTK, de acuerdo a escalas describen una carretera no pavimentada con irregularidades, frecuentes defectos, erosiones, depresiones profundas. Así mismo, Al aplicar los test estadísticos de precisión y exactitud, como la test de hipótesis de contraste T en los puntos de análisis, análisis de varianza ANOVA de los múltiples perfiles en cada sección del tramo, correlación de los distintos vuelos en valores IRI, se obtuvieron resultados que indican diferencias estadísticas no significativas y una relación entre los valores de IRI con tendencia positiva muy fuerte en 93.89 % de similitud, lo que implica una correlación bastante adecuada, donde la función lineal es la ecuación que mejor se adecua a la dispersión de datos, con IRI promedio de 15.67 m/km en todo el tramo de estudio, que representa a una carretera no pavimentada con irregularidades, mal estado de transitabilidad, con erosiones y depresiones profundas en la superficie vial.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso del RPAS P4RTK, según las características y especificaciones establecidas, para estudios de programación o formulación de planes viales, en cumplimiento del manual de elaboración de planes viales, donde la presente investigación intenta sustentar y aportar a una base de contexto o cultura preventiva, correctiva en la conservación vial. Así mismo, los resultados obtenidos mediante el método indirecto a una altura de 30 metros, tiene objeto de aprovechar un levantamiento topográfico de una carretera, obteniéndose como ventajas no solo el análisis de IRI, si no también detalles topográficos, detalles de calzada, características de vía, obras de arte y drenaje entre otras. Cabe recalcar que a menores alturas existe mejor resolución de la superficie vial, pero el procesamiento de datos se vuelve bastante tedioso, debido a la mayor cantidad de fotografías, lo cual no ayudaría mucho en proveer ventajas con el método indirecto. Se recomienda para estudios netamente de IRI realizar vuelos con el equipo P4RTK a menores alturas de 30 metros y compararlas con los equipos convencionales merlín, nivel y mira topográfica.
- Los resultados obtenidos con el método estático rod and level y el phantom 4 RTK, tienen una similitud del 93.89 %, lo cual nos da a entender que existen diferencias, se recomienda realizar mayores estudios con características, parámetros diferentes, como alturas de vuelo menores a 30 metros, con el objetivo de estudiar su funcionamiento, incertidumbres y mejorar el nivel de confiabilidad.
- Al realizar las mediciones del perfil y cálculo de IRI en carretera no pavimentada, mediante el método estático rod and level, se hace bastante dificultoso llegar a una precisión adecuada, debido a la misma superficie vial que compone, por lo tanto, la recolección de datos, como ubicación de los puntos, intervalos de medición, se



deberán de tener bastante cuidado y ejecutar durante el día, se recomienda realizar estudios a intervalos menores o iguales a 0.50 metros para comparar la incidencia a los resultados de valores IRI respecto al método fotogramétrico.

- A partir del método estático rod and level, para las futuras investigaciones se recomienda realizar estudios comparativos con equipos de nivel electrónico y nivel automático, de tal manera expresar las incertidumbres de medida e incidencias en los resultados de valores IRI, respecto al método indirecto mediante RPAS P4RTK fotogramétrico, considerando para esta última realizar configuraciones que ayuden a mejorar la calidad de la información.
- Realizar mayores investigaciones con el phantom 4 RTK respecto al número de puntos de control, en la presente investigación se obtuvo desplazamientos planimétricos en un rango de 0.40 a 1.00 metro aproximadamente, así también realizar mayores ensayos de precisión y exactitud, mayores estudios con aplicación del método RTK y PPK.



VII. REFERENCIAS

- Cáceres, A.C., & Segura, M.M. (2018). *Análisis y evaluación de los índices de rugosidad de la panamericana norte – Trujillo, usando el método de Road and level y el método de Merlín* (Tesis de pregrado). Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú.
- Montoya, J. (2013). *Análisis del IRI para un proyecto de carretera sinuosa concesionada en el Perú* (Tesis de maestría). Universidad de Piura, Perú.
- Sánchez, M.C., & Martínez, T. E. (2018). Determinación del IRI en pavimentos a partir de procedimientos fotogramétricos. *Informática XVII convención y feria internacional por un desarrollo sostenible. X congreso internacional de geomática 2008*, la Habana, Cuba.
- Angarita, L.F., & Sánchez, J. C. (2017). *Comparación del índice de rugosidad internacional (IRI) a partir de información obtenida por métodos fotogramétricos*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.
- Sánchez, M.C., Martínez, T. E., & Tejada, E. (2018). Medición de la regularidad superficial en pavimentos a partir de método fotogramétrico digital de corto alcance. *Segunda convención científica internacional de la universidad técnica de Manabí – CCIUTM 2018*. La Habana. Cuba.
- Cabanillas, J.R. (2019). *Evaluación del IRI en la carretera no pavimentada EMP. PE-3S (DV. Kishuara) - EMP. PE-3S (Alfapata), del Km 680+000 al Km 732+950, en la región Apurímac* (Tesis pregrado). Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.



- Caro, F., & Peña, G. (2012). Análisis y criterios para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en vías urbanas colombianas que orienten la elaboración de una especificación técnica. *Intekhnia*, 7(2), 57-72.
- MTC. (2016). Manual de carreteras mantenimiento o conservación vial. Lima. Perú.
- Rodríguez, M. (2011). Planes de gestión de calidad de proyectos de carreteras. *Boletín técnico PITRA*. 2(12). P.4.
- Sánchez, I., & Solminihac, H. (1989). El IRI: un indicador de la regularidad superficial. *Revista de ingeniería de construcción* (6). p. 16.
- Badilla, G., Elizondo, F., & Barrantes, R. (2008). Proyecto N° UI-03-08 Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI.
- Badilla, G. (2009). Determinación de la regularidad superficial de pavimentos mediante el cálculo del índice regularidad internacional (IRI): aspectos y consideraciones importantes.
- Rivera, L.I. (2017). *Efectos de la regularidad superficial (IRI) en el nivel de servicio de vías afirmadas – carretera Chupuro – Lapa* (Tesis de pregrado). Universidad Peruana los Andes, Huancayo, Perú.
- Aza, P.D. (2009). *Gestión de conservación vial en la infraestructura regional* (Tesis de maestría). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- ASTM E 867. (1995). *ASTM Terminology Relating to Traveled Surface Characteristics*. United States.
- Instituto nacional de vías. (2007). Determinación del índice internacional de rugosidad (IRI) para medir la rugosidad de los pavimentos. Colombia.



- ICC Laser, & KJ Law. (1988). *The Little Book of Profiling: Basic information about measuring and interpreting road profiles*. Michigan, E.E U.U.
- Ventura, J., & Alvarenga, E. (2005). *Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI)*. El Salvador.
- Sayers, M.W., & Karamihas, S.M. (1996). *Interpretation of road roughness profile data. Federal highway administration*. UMTRI 96-19.
- Sayers, M.W., & Karamihas, S.M. (1998). *The little Book of profiling. Basic information about measuring and interpreting road profiles*.
- ASTM E 1926. (2015). *Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements*. United States.
- Sayers, M.W., Gillespie, T.D., & Peterson, W.D. (1986). *Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements, World Bank Technical Paper No. 46*. Washington, D.C., U.S.A.
- Programa de infraestructura del transporte. (2013). *Propuesta para la definición de un procedimiento de medición y análisis del índice de regularidad internacional*, San José. Costa Rica.
- MTC. (2014). *Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos*. Lima. Perú.
- MTC. (2018). *Manual de carreteras mantenimiento o conservación vial*. Lima. Perú.
- PROVIAS departamental, MTC. (2003). *Manual de procedimientos para la formulación de los planes viales departamentales participativos*. Lima. Perú.
- Dirección General de Aeronáutica Civil, MTC. (2015). *Norma técnica Complementaria*. Lima. Perú.



Aerial insights. (2019). Cuantos tipos de drones existen en el mercado.

<https://www.aerial-insights.co/blog/tipos-de-drones/>.

Gobierno de España Ministerio de Fomento. (2018). *Plan estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021*. España.

Jimenez, G. (2007). *Topografía para ingenieros civiles*. Programa de ingeniería civil Armenia 2007. Quindío, Colombia.

Quirós, E. (2014). *Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicadas a la ingeniería civil*. España: Caldereros.

Jauregui, I. (2010). *Fotogrametría Básica, Introducción a la Fotometría*. Venezuela.

Bonneval, H. (1972). *Photogrammetrie generale*. Paris: Eyrolles.



ANEXOS