

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**CÁLCULO DEL IRI MEDIANTE ACCELERÓMETRO DE SMARTPHONE EN
EL TRAMO HUARMEY – CASMA DE LA CARRETERA PANAMERICANA
NORTE**

Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, que presenta el bachiller:

BRIAN STEVE RAMIREZ CASTRO

Asesor: **ING. FÉLIX ISRAEL CABRERA VEGA**

Lima, setiembre de 2017





Dedicado para mi hermosa familia Ramírez Castro y mis abuelos, que siempre me brindaron su apoyo incondicional y me transmitieron su sabiduría. Un agradecimiento especial a mis tíos mentores, amigos y profesores que fueron de gran ayuda en mi formación profesional.

Resumen

Las concesiones de carreteras en el Perú se ejecutan hace más de veinte años y han otorgado grandes beneficios como mejorar la accesibilidad en territorio nacional favoreciendo el comercio y el turismo, generar mayores posibilidades de desarrollo urbano, promover el empleo y reducir el tiempo de viaje producto de una adecuada infraestructura vial. Una carretera en óptimas condiciones ofrece una buena serviciabilidad y se refleja en un manejo seguro y confortable en la vía nacional. Estas características mencionadas presentan una relación directa con la rugosidad del pavimento.

La rugosidad se cuantifica a través del IRI (Índice de Rugosidad Internacional), el cual 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. Existen diferentes métodos de medición divididos en cuatro niveles, siendo el primero el más exacto en los cálculos de rugosidad, cuyo equipo más utilizado es el perfilómetro láser.

Por otro lado, existe una aplicación novedosa de nombre Roadroid que calcula el IRI y utiliza el acelerómetro del *smartphone*. Con esta aplicación se tendrá un conocimiento rápido sobre el estado de la carretera.

La presente tesis se enfocará en comparar los resultados del IRI de un perfilómetro láser y el *software* Roadroid. La concesionaria a cargo de la Red Vial 4 utiliza anualmente el perfilómetro láser para conocer el estado de la vía nacional y tomar acciones preventivas para otorgar un buen nivel de serviciabilidad. En contraste, se realizará una medición para calcular la rugosidad de un tramo de la Red Vial 4 utilizando el *software* Roadroid y con la data de la concesionaria se realizará un análisis comparativo entre ambos equipos de medición y se evaluará la eficiencia de la aplicación para celular.

El sector escogido fue el tramo de Huarney – Casma. Es una autopista que presenta dos carriles para cada dirección, sur a norte y viceversa. Los resultados obtenidos con el *software* fueron de 1.2 m/km y 1.3 m/km en cada calzada de la vía y con el perfilómetro láser se obtuvo 1.11 m/km y 1.16 m/km respectivamente.

Por otra parte, se comprobó que al trasladarse en el vehículo para la recolección de datos en el rango de velocidad de 75 a 90 km/h los valores del IRI estimado e IRI calculado se correlacionan.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : “Cálculo del IRI mediante acelerómetro de Smartphone en el tramo Huarmey - Casma de la carretera Panamericana Norte”.

Área : Movilidad y Transporte - Investigación

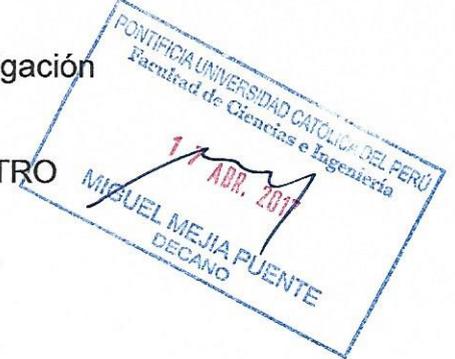
Asesor : Ing. Felix Israel Cabrera Vega

Alumno : BRIAN STEVE RAMIREZ CASTRO

Código : 2010. 1870. 412

Tema N° : # 70

Fecha : Lima, 31 de marzo del 2017



INTRODUCCIÓN

Uno de los parámetros más importantes para controlar el nivel de servicio de un pavimento – de acuerdo al Banco Mundial- es el índice de rugosidad (IRI). Existen diferentes tipos de equipos que calculan el IRI, pero muestran variados niveles de precisión, costos y rendimientos. En el Perú, el perfilómetro laser es el equipo más utilizado.

Desde el año 2010, se desarrolló la aplicación Roadroid para medir la rugosidad de las carreteras mediante el acelerómetro de un Smartphone, ecuaciones de correlación y el modelo del cuarto de carro. Se dice que esta aplicación agiliza el cálculo del IRI de una manera eficaz y económica, por lo que en el presente proyecto se busca comparar los resultados del cálculo de IRI mediante un perfilómetro láser y un acelerómetro de smartphone en el tramo Huarmey – Casma que pertenece a la Red Vial 4 de la Panamericana Norte. Con esto se busca determinar las ventajas y limitaciones de la aplicación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Comparar los resultados de los cálculos del IRI obtenidos con una aplicación para smartphone y un perfilómetro láser en un tramo de la vía nacional.

Objetivos específicos

Los objetivos de la presente tesis son explicar la importancia de la rugosidad como parámetro de control que determina el nivel y la calidad de servicio de la carretera, exponer las especificaciones técnicas generales para la construcción de las carreteras EG-2013 enfocado en el IRI. Finalmente, analizar el nivel de precisión de los IRI calculados por el software Roadroid y exponer las ventajas y desventajas del uso de la aplicación en el tramo 3 (Huarmey – Casma) de la Red Vial 4.



HIPÓTESIS

El cálculo del IRI mediante el software Roadroid es similar al calculado con el perfilómetro láser. Además, la variación de velocidad influye significativamente en los cálculos obtenidos por el Roadroid.

PROGRAMA DE TRABAJO

El desarrollo de la tesis considerará los siguientes temas:

- Planteamiento del problema, objetivos e hipótesis de la investigación.
- Revisión de la literatura - marco teórico: serviciabilidad y rugosidad del pavimento, índice de rugosidad internacional, métodos de medición del IRI, especificaciones del IRI aplicadas en otros países, antecedentes sobre las mediciones del IRI en el Perú, normativa peruana respecto al IRI.
- Metodología de la investigación.
- Resultados.
- Conclusiones y recomendaciones.

METODOLOGÍA

La investigación es cuantitativa y la metodología consistió en seleccionar la zona de estudio, luego se recolectaron los datos de campo mediante un smartphone que tenía la aplicación Roadroid. El smartphone se colocó en el parabrisas de una camioneta Toyota Prado que viajaba a una velocidad de entre 60 y 95 km/h, entre Huarmey y Casma. Posteriormente, se procesó la información y se realizaron pruebas de correlación para comparar los resultados obtenidos con la aplicación Roadroid y el perfilómetro laser. Se resalta que los datos obtenidos con el perfilómetro laser fueron obtenidos en un proyecto anterior.

REVISIONES

Primera Revisión:

- Objetivo general y objetivos específicos.
- Hipótesis de la investigación.
- Marco teórico (revisión de la literatura).

Segunda Revisión

- Metodología del trabajo.
- Recolección de datos de campo.

Tercera Revisión:

- Procesamiento y análisis de la información de campo.
- Conclusiones y recomendaciones.

NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.

VB°
Dr. Rafael Aguilar
Director de Investigación



ii



Índice

Índice	i
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Objetivos del proyecto	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
1.2 Hipótesis del proyecto	2
1.3 Alcance y limitaciones	2
Capítulo 2. Revisión de la literatura	3
2.1 Serviciabilidad y rugosidad del pavimento.....	3
2.1.1 Serviciabilidad	3
2.1.2 Rugosidad	5
2.1.3 Costos generados	6
2.2 Índice de rugosidad internacional (IRI)	7
2.2.1 Definición.....	7
2.2.2 Modelo del cuarto de carro (Quarter Car O Golden Car).....	8
2.3 Métodos de medición del IRI	10
2.4 Especificaciones internacionales de IRI aplicadas en otros países	12
2.5 Antecedentes sobre las mediciones de IRI en el Perú	14
2.6 Normativa peruana respecto al IRI	15
Capítulo 3. Roadroid	16
3.1 Reseña histórica.....	16
3.2 Definición.....	20
3.3 IRI estimado (eIRI).....	22
3.4 IRI calculado (cIRI)	23
3.5 Índice Roadroid (RI).....	24
Capítulo 4. Metodología.....	25
4.1 Sector de estudio.....	25
4.2 Organización	26
4.3 Recopilación de datos	28
4.4 Importar datos a la página web	33

4.5 Visualización de la información	34
4.6 Descarga de archivos	36
4.7. Realizar gráficos en Excel	37
Capítulo 5. Resultados.....	39
5.1 Resultados Índice Roadroid.....	39
5.2 Resultado eIRI, cIRI.....	41
5.3 Elección de sub tramo comparable – Calzada izquierda	47
5.4 Elección de sub tramo comparable – Calzada derecha.....	50
5.5 Coeficiente de determinación de los datos calculados.	53
5.6 Determinación de tramos homogéneos	58
5.7 Análisis de velocidad	65
5.7.1 Tramo homogéneo 1	65
5.7.2 Tramo homogéneo 2	67
5.7.3 Tramo homogéneo 3	69
5.7.4 Tramo homogéneo 4	71
5.7.5 Tramo homogéneo 5	73
Capítulo 6. Conclusiones	75
Capítulo 7. Bibliografía.....	77

Figuras

Figura 01. Modelo del cuarto de carro.	8
Figura 02. Perfilómetro láser de clase 1	10
Figura 03. Perfilómetro APL.....	11
Figura 04. Primer prototipo Roadroid.....	17
Figura 05. Segundo prototipo.....	17
Figura 06. Tercer prototipo Roadroid	18
Figura 07. Calidad de superficie de rodadura de la ciudad de Gavle.....	20
Figura 08. Logo Roadroid	20
Figura 09. Uso de la aplicación Roadroid en carreteras	21
Figura 10. Visualización de la carretera analizada en Google Maps	21
Figura 11. Perfilómetro láser vs aplicación Roadroid.....	22
Figura 12. Comparativo entre el cIRI y el software ARAN	23
Figura 13. Índice Roadroid (RI) en un tramo de carretera en Camboya.	24
Figura 14. Tramo 3 de la Red Vial 4.	25
Figura 15. Carriles Casma-Huarmey	26
Figura 16. Presencia de vehículos pesados en el carril de medición.....	27
Figura 17. Vehículo utilizado para la toma de muestras.	27
Figura 18. Celular Samsung y sujetador empleado en la toma de datos.....	28
Figura 19. Posición del celular en el parabrisas del vehículo.	29
Figura 20. Menú aplicación Roadroid.	29
Figura 21. Settings-Software Roadroid.....	29
Figura 22. User Email.	30
Figura 23. Enable HTTP Upload	30
Figura 24. Vehicle Type.	31
Figura 25. cIRI Vehicle Sensivity.	31
Figura 26. Auto Photo Capture Segment.	32
Figura 27. Fitting adjustment.....	32
Figura 28. Calibración del software Roadroid Classic.....	33
Figura 29. Opción Upload-Roadroid	33
Figura 30. Cargar archivos a la página web de Roadroid	34
Figura 31. Fotografía registrada en un sector de la carretera.....	35

Figura 32. Mediciones realizadas con el app Roadroid	36
Figura 33. Descargar archivos en formato texto	37
Figura 34. Gráficos de eIRI en un sector de la carretera.	38
Figura 35. Área seleccionada para el cálculo de IRI estimado	39
Figura 36. Autopista de dos calzadas. Tramo Huarmey-Casma.....	41
Figura 37. Gráfico eIRI vs IRI perfilómetro C.I	42
Figura 38. Gráfico cIRI vs IRI perfilómetro	42
Figura 39. Puente Culebras.	43
Figura 40. Vibradores en la Panamericana Norte.	44
Figura 41. Presencia de arena en la plataforma de la vía.....	44
Figura 42. Gráfico eIRI vs IRI perfilómetro C.D.....	45
Figura 43. Gráfica cIRI vs IRI perfilómetro C.D.....	45
Figura 44. Gráfico IRI vs eIRI – Calzada derecha (C.D.)	46
Figura 45. Perfil calzada izquierda.....	47
Figura 46. Selección de un sub tramo del gráfico eIRI vs IRI.	48
Figura 47. Sub tramo a analizar del gráfico eIRI vs IRI.....	48
Figura 48. Selección de un sub tramo del gráfico cIRI vs IRI.	49
Figura 49. Sub tramo a analizar del gráfico cIRI vs IRI.....	49
Figura 50. Perfil calzada izquierda.....	50
Figura 51. Selección de un sub tramo del gráfico eIRI vs IRI.	51
Figura 52. Sub tramo a analizar del gráfico eIRI vs IRI.....	51
Figura 53. Selección de un sub tramo del gráfico cIRI vs IRI.	52
Figura 54. Sub tramo a analizar del gráfico cIRI vs IRI.....	52
Figura 55. eIRI vs IRI.	53
Figura 56. Gráfica de barra de IRI de la calzada izquierda.	54
Figura 57. Gráfica de barra de IRI de la calzada derecha.	56
Figura 58. Sectorización - Método de diferencias finitas acumuladas.	61
Figura 59. eIRI vs cIRI – Tramo 1	62
Figura 60. eIRI vs cIRI – Tramo 2.....	62
Figura 61. eIRI vs cIRI – Tramo 3.....	63
Figura 62. eIRI vs cIRI – Tramo 4.....	63
Figura 63. eIRI vs cIRI.	64

Figura 64. IRI vs velocidad – Tramo 1.	65
Figura 65. eIRI vs cIRI – T1 utilizando velocidad de correlación.	66
Figura 66. eIRI vs cIRI (filtrada) T1 utilizando velocidad de correlación.	66
Figura 67. eIRI vs cIRI (filtrada) T2 sin utilizar velocidad.	67
Figura 68. IRI vs velocidad – Tramo 2	67
Figura 69. eIRI vs cIRI–T2 utilizando velocidad de correlación.....	68
Figura 70. eIRI vs cIRI (filtrada) T2 utilizando velocidad de correlación.	68
Figura 71. eIRI vs cIRI (filtrada) T2 sin utilizar velocidad.	69
Figura 72. IRI vs velocidad – Tramo 3.	69
Figura 73. eIRI vs cIRI–T3 utilizando velocidad de correlación.....	70
Figura 74. eIRI vs cIRI (filtrada) T3 utilizando velocidad de correlación.	70
Figura 75. eIRI vs cIRI (filtrada) T3 sin utilizar velocidad.	71
Figura 76. IRI vs velocidad – Tramo 4.	71
Figura 77. eIRI vs cIRI–T4 utilizando velocidad de correlación.....	72
Figura 78. eIRI vs cIRI (filtrada) T4 utilizando velocidad de correlación.	72
Figura 79. eIRI vs cIRI (filtrada) T4 sin utilizar velocidad.	73
Figura 80. IRI vs velocidad – Tramo 5.	73
Figura 81. eIRI vs cIRI–T5 utilizando velocidad de correlación.....	74

TABLAS

Tabla 01. Escala de clasificación de serviciabilidad.....	4
Tabla 02. Especificaciones de otros países para el control del IRI.	12
Tabla 03. Estado de la vía según Roadroid.	19
Tabla 04. Condiciones de los puntos analizados y el eIRI en la carretera	40
Tabla 05. Valores de IRI en el tramo analizado – calzada izquierda.	55
Tabla 06. Valores del IRI en el tramo analizado – calzada derecha	56
Tabla 07. Valores promedio de IRI en el tramo seleccionado.....	57
Tabla 08. Datos generales para la determinación de tramos homogéneos.	58
Tabla 09. Datos de estaciones y valores de IRI.....	58
Tabla 10. Datos de y estacionamiento, identificadores valores de respuesta...	59
Tabla 11. Distancias acumuladas.	59
Tabla 12. Promedio de IRI (i-1, i).....	59
Tabla 13. Cálculo del área bajo la curva.....	60
Tabla 14. Cálculo de área acumulada.	60
Tabla 15. Valores de Zx.....	60
Tabla 16. Progresivas de tramos homogéneos.	61
Tabla 17. Coeficientes determinísticos de tramos homogéneos.....	64

Capítulo 1. Introducción

Las redes viales en el Perú se han sometido a una política de privatización por parte del Estado Peruano a través de concesiones desde la década de los 90 con el objetivo de resolver los problemas de infraestructura vial.

Una de las obligaciones de las diversas empresas que asumen la concesión por un determinado periodo es mejorar los niveles de servicio de la vía. De esta manera, el Estado asegura que los costos de operación vehicular disminuyan y el IMDA aumente. Esto implica un mayor desarrollo económico y social, ya que está ligado estrechamente al mejoramiento de los sistemas de transporte.

Uno de los parámetros más importantes para controlar el nivel de servicio es la rugosidad de la carretera que es promovida por el Banco Mundial y se cuantifica a través del IRI (Índice de Rugosidad Internacional). Este índice estandariza la rugosidad superficial en la vía.

Existen diferentes tipos de equipos que calculan el IRI, estos se clasifican según el nivel de precisión en cuatro clases siendo la primera la más confiable. Cada uno de los instrumentos de medición presenta costos y rendimientos diferentes. En el Perú, el equipo más usado, en la actualidad, para el cálculo de IRI en carreteras es el perfilómetro láser.

Desde el 2010, se desarrolló la aplicación Roadroid la cual mide la rugosidad de las carreteras utilizando el acelerómetro del teléfono inteligente y a través de diferentes ecuaciones de correlaciones lineales y a través del modelo del cuarto de carro. Es un software que agiliza el cálculo del IRI de una manera eficaz y económica en la gestión de infraestructuras viales. Ganó diferentes premios sobre innovación y se está aplicando en diferentes proyectos viales a nivel mundial.

El presente proyecto de tesis consiste en comparar los resultados de cálculo de IRI de un perfilómetro láser con un acelerómetro de smartphone en el tramo Huarmey – Casma que pertenece a la Red Vial 4 de la Panamericana Norte

Teniendo en cuenta que ya se posee el cálculo del IRI por el perfilómetro láser del tramo a analizar, se procederá a recopilar los datos en campo empleando el software Roadroid para calcular el IRI del mismo segmento de la carretera. Se darán conclusiones de factibilidad y confiabilidad del uso de la aplicación considerando la variación de velocidad debido al tráfico de la Red Vial Nacional.

1.1 Objetivos del proyecto

1.1.1 Objetivo general

Explicar el concepto de rugosidad en pavimentos y la importancia del IRI en carreteras; así como comparar los resultados de los cálculos del IRI obtenidos con una aplicación para smartphone y un perfilómetro láser en un tramo de la vía nacional.

1.1.2 Objetivos específicos

Los objetivos de la presente tesis son explicar la importancia de la rugosidad como parámetro de control que determina el nivel y la calidad de servicio de la carretera, exponer las especificaciones técnicas generales para la construcción de las carreteras EG-2013 enfocado en el IRI. Finalmente, analizar el nivel de precisión de los IRI calculados por el software Roadroid y exponer las ventajas y desventajas del uso de la aplicación en el tramo 3 (Huarmey – Casma) de la Red Vial 4.

1.2 Hipótesis del proyecto

El cálculo del IRI mediante el software Roadroid es similar a lo calculado por el perfilómetro láser. Además, la variación de velocidad influye significativamente en los cálculos obtenidos por el Roadroid.

1.3 Alcance y limitaciones

El presente proyecto de tesis explicará los conceptos de rugosidad de carreteras y evaluará el tramo 3 de la Red Vial 4 utilizando la aplicación para smartphone Roadroid. Además, se explicará el proceso de cálculo y la metodología a usar para obtener el IRI. Asimismo, a partir del IRI calculado, por una empresa especialista en rugosidad de carreteras, con un perfilómetro láser de clase uno se comparará con el IRI que se obtendrá con el software Roadroid. Adicionalmente, se analizará la influencia del tráfico para el cálculo del IRI con la aplicación y se verificará las hipótesis presentadas anteriormente.

Capítulo 2. Revisión de la literatura

2.1 Serviciabilidad y rugosidad del pavimento

2.1.1 Serviciabilidad

La Serviciabilidad es un indicador que representa el nivel de servicio que el pavimento proporciona a los usuarios (Yogesh U. Shah, 2013), esto está relacionado al manejo seguro y confortable en las carreteras. Sin embargo, esta definición presenta una dificultad conceptual porque depende para qué se está evaluando el pavimento, si bien puede ser una función estructural o si importa más la condición funcional. La evaluación estructural y funcional del pavimento son actividades distintas pero están ligadas entre sí (Solminihaç, 2001). Por ejemplo, se puede afirmar que una vía presenta un buen diseño estructural, no obstante puede presentar una exagerada ondulación vertical. De la misma manera, una carretera puede presentar una buena capacidad funcional, pero la presencia de grietas en la superficie de la carretera representa un deficiente diseño estructural. Para ello, se debe tener una metodología estándar de evaluación, ya que la medición de una persona puede variar con otra.

En el año 1960 los investigadores Carey e Irick desarrollaron un procedimiento para la American Association of State Highway Officials (AASHO) las cuáles presentan diferentes características sobre el concepto de serviciabilidad (Carey & Irick, 1960)

Los expertos afirman que el pavimento debe proporcionar confort y seguridad al usuario. Sin embargo, el confort es un aspecto subjetivo o de opinión del usuario al igual que la calidad del rodado. Además, existen algunas características físicas del pavimento que pueden medirse objetivamente y relacionarse con las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento permite obtener un índice objetivo denominado *Present Serviceability Index* (PSI). Asimismo, el comportamiento del pavimento puede ser representado por la historia de la serviciabilidad de dicho pavimento

La medición de serviciabilidad que se utiliza en la actualidad en varios países del mundo proviene de los resultados de la prueba AASHO. En 1962, se realizaron estudios en un tramo de una carretera y se estableció el índice Present Serviceability Rating (PSR). El cálculo de esta escala es de carácter subjetivo y se elaboró por un grupo de personas pertenecientes al panel evaluador. Se calificó la calidad del pavimento entre los valores 0 (muy malo) y 5 (muy bueno). A continuación se presenta la tabla desarrollada por la AASHO.

Tabla 01. Escala de clasificación de serviciabilidad. Fuente AASHO (1962)

PSR	Condición del pavimento	Descripción
4 - 5	Muy buena	Sólo los pavimentos nuevos (o casi nuevos) son lo suficientemente suaves y sin deterioro para clasificar en esta categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos recarpeteados durante el año de inspección normalmente se clasificarían como muy buenos.
3 - 4	Buena	Los pavimentos de esta categoría, si bien no son tan suaves como los "Muy buenos", entregan un manejo de primera clase y muestran muy poco o ningún signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden estar comenzando a mostrar signos de ahuellamiento y fisuración aleatoria. Los pavimentos rígidos pueden estar empezando a mostrar evidencias de un leve deterioro superficial, como desconches y fisuras menores.
2 - 3	Regular	En esta categoría la calidad de manejo es notablemente inferior a la de los pavimentos nuevos, y puede presentar problemas para altas velocidades de tránsito. Los defectos superficiales en pavimentos flexibles pueden incluir ahuellamiento, parches y agrietamiento. Los pavimentos rígidos en este grupo pueden presentar fallas en las juntas, agrietamiento, escalonamiento y pumping.
1 - 2	Mala	Los pavimentos en esta categoría se han deteriorado hasta un punto donde pueden afectar la velocidad de tránsito de flujo libre. Los pavimentos flexibles pueden tener grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye pérdida de áridos, agrietamiento y ahuellamiento, y ocurre en un 50% o más de la superficie. El deterioro en pavimentos rígidos incluye desconche de juntas, escalonamiento, parches, agrietamiento y bombeo.
0 - 1	Muy mala	Los pavimentos en esta categoría se encuentran en una situación de extremo deterioro. Los caminos se pueden pasar a velocidades reducidas y con considerables problemas de manejo. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75% o más de la superficie.

Los investigadores de la AASHO buscaron relacionar el índice PSR que es de carácter subjetivo con un índice objetivo llamado Pavement Serviceability Index (PSI). Para ello, desarrollaron modelos de regresión lineal con los datos obtenidos en un "tramo de carretera" de prueba construida por la misma organización. De esta manera se estimó el PSR como una función derivada de las variables como Slope Variet (SV) y se consideró el aporte de agrietamientos y bacheos. A partir de esto se definieron las siguientes ecuaciones del PSI (AASHO, 1993):

Para pavimentos asfálticos:

$$PSI = 5.03 - 1.91 * \log(1+SV) - 1.38*(RD)^2 - 0.01 * (C + P)^{0.5}$$

Para pavimentos de concreto hidráulico:

$$PSI = 5.41 - 1.78 * \log(1+SV) - 0.09*(C + P)^{0.5}$$

Donde:

SV = Varianza de la pendiente longitudinal (Slope Variance) medida con un perfilómetro CHLOE, $\text{rad} \times 10^{-6} (\text{in}/\text{ft})^2$

RD = Ahuellamiento promedio en pavimentos de asfalto, in

C = (en asfalto) Superficie agrietada, $\text{ft}^2/1.000 \text{ ft}^2$

C = (en concreto) Longitud total (transversales y longitudinales) de grietas, selladas o abiertas, $\text{ft}/1.000 \text{ ft}^2$

P = Superficie bacheada, $\text{ft}^2/1.000\text{ft}^2$

2.1.2 Rugosidad

La rugosidad se define como una expresión de las irregularidades en la superficie del pavimento la cual afecta negativamente a la calidad de conducción de un vehículo (y consecuentemente al usuario) (Pavia Sytems, 2007). La rugosidad es una característica importante del pavimento porque no solo afecta la calidad del rodado, sino también a los costos del retardo de tiempo de viaje, consumo de combustible, costo de mantenimiento y seguridad.

La rugosidad de la superficie de pavimentos es importante porque está relacionado con la seguridad y comodidad, costos de operación vehicular y la conservación vial.

Una regularidad superficial óptima permite condiciones de seguridad y comodidad, ya que las vibraciones del vehículo serán mínimas. Esto está ligado al costo de operación vehicular, debido a que las irregularidades superficiales, disminución de velocidad, se reflejan en un mayor desgaste de llantas, aumento del tiempo de viaje, incremento del consumo de combustible. Además, los efectos dinámicos no solo se reflejan en vehículos, sino también en modificaciones de estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento, lo que aumentaría el costo de conservación (mantenimiento, rehabilitación). Adicionalmente, si el pavimento presenta una buena regularidad superficial su vida útil será mayor que otro que tenga mayores deformaciones. No obstante, se debe tener en cuenta que el aumento de irregularidades depende de las cargas impuestas por el tráfico, el clima, el estado de la subrasante, los diversos materiales de construcción empleados, las variaciones de la topografía, entre otros. Por consiguiente, se considera importante conocer la regularidad superficial del pavimento desde el inicio de su periodo para establecer labores de conservación (mantenimiento, rehabilitación) pertinentes. (Badilla, 2009)

Según las ecuaciones para obtener el PSI, la variable SV (variación de pendientes), que está directamente relacionada con la rugosidad, domina los valores estimados de serviciabilidad, esto denota que la rugosidad tiene una

mayor importancia en la valoración de los usuarios que evalúan la calidad del pavimento.

Debido a que existe una gran variedad de técnicas, indicadores y equipos en cada país surgen inconvenientes a la hora de evaluar la calidad y comodidad de la carretera; por eso, se propuso desarrollar un índice único independiente de la técnica de obtención del perfil y que simbolice las percepciones de los usuarios de las carreteras de cada país. Consecuentemente se desarrolló el experimento internacional nombrado International Road Roughness Experiment (IRRE) cuyo producto fue el desarrollo del concepto, definición y método del cálculo del IRI (Sayers, et al., 1986).

2.1.3 Costos generados

El Estado Peruano al invertir en la construcción de vías tiene un presupuesto limitado para la ejecución, mantención y rehabilitación de las carreteras peruanas. Estos costos de inversión se dividen en tres categorías: costos iniciales, costos de conservación y costos de operación (Arriaga, et al., 1998). El primero hace referencia a todos a todos los gastos necesarios para realizar el proyecto de construcción; el segundo, son las inversiones para mantener en condiciones óptimas la vía, ya que los pavimentos quedan expuestos al ataque permanente de agentes naturales y a las cargas que soportan sus elementos estructurales; y el tercero, son los costos que se generan por la circulación diaria de los vehículos.

De los tres tipos de costos el que se debe de minimizar es el costo de operación vehicular debido a que superan a los costos iniciales y de conservación.

Para obtener el costo de operación vehicular se calcula la velocidad promedio de operación por cada grupo de vehículos, se computa la cantidad de recursos consumidos por vehículo – kilómetro por cada grupo para los siguientes componentes: combustibles, consumo de neumáticos, repuestos de mantención, mano de obra en mantención, lubricantes, tripulación, depreciación, interés y gastos generales. Luego, se multiplica la cantidad de recursos consumidos por sus correspondientes precios unitarios, para obtener los costos por vehículo – km de cada grupo. Seguidamente, se multiplica por la longitud de la sección y por el volumen de tránsito medio diario anual (TMDA) de cada grupo y por 365 días, para obtener el total de costos de usuarios por año y por grupo de vehículos. Al sumar los totales por grupo se obtienen los costos de usuarios totales por año. (Solminihac, 2001)

El software HDM –III evalúa los costos de operación basándose en los estudios que se desarrollaron en Brasil las cuáles participaron empresas como *Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT)*, *Texas Research and Development Foundation (TRDF)* y el Banco Mundial.

El costo de operación vehicular aumenta significativamente cuando la vía está en mal estado es por esa razón que el Estado debe tener un plan de mantenimiento preventivo de carreteras.

2.2 Índice de rugosidad internacional (IRI)

2.2.1 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 & Peña, 2012).

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

Una vía recién construida tiene un IRI muy cercano al valor 0. Cuando por esta carretera empiecen a circular los vehículos con el transcurso del tiempo la geometría empezará a variar y el valor del IRI ascenderá, debido a que se tendrá mayores irregularidades en la superficie de rodadura de la vía.

Actualmente, se ha reemplazado el uso de la varianza de la pendiente longitudinal (SV) como medida de rugosidad por el IRI y es aceptado por la mayoría de países. Su principal ventaja es que es un modelo matemático y el resultado es independiente del equipo o técnica del cual se haya conseguido el perfil. Sin embargo, para obtener un IRI real es necesario que los equipos de medición de irregularidades en la superficie del pavimento sean muy precisos.

Se debe tener en cuenta que el IRI se calcula a partir de un solo perfil. El intervalo de muestreo debe ser menos a 300 mm para obtener cálculos precisos. Una resolución de 0.5 mm en la obtención del perfil sería lo adecuado para cualquier condición. Además, el perfil se analizará mediante un análisis estadístico (media móvil) cuya base es de 250 mm. Esto se realiza para simular el comportamiento de la envolvente de las ruedas y reducir la sensibilidad de la simulación del cuarto de carro al espaciamiento de muestreo del perfil longitudinal. Asimismo, se filtra el perfil suavizado utilizando la simulación del cuarto de carro a una velocidad de 80 km/h. Finalmente, la suspensión simulada se acumula y se divide entre la longitud del perfil para obtener el valor del IRI. (Sayers, 1995)

El cálculo del IRI está linealmente vinculado las irregularidades en la superficie del pavimento; es decir, si las elevaciones disminuyen a la mitad, el cálculo

del IRI se reducirá a la mitad y viceversa. Por lo general, si se desea calcular el IRI por pista se deben tomar perfiles longitudinales del ahuellamiento que genera el vehículo al pavimento. Luego, se promedia cada IRI calculado en cada perfil para obtener el IRI por pista. Se debe tener en cuenta que las variaciones de la rugosidad acumuladas y la longitud de la vía analizada son promediadas.

2.2.2 Modelo del cuarto de carro (Quarter Car O Golden Car)

En la definición del IRI como se detalla en el acápite 2.2.1 se puede afirmar que está ligado a la mecánica vibratoria de sistemas dinámicos. A partir de ello, se puede modelar simplificada el movimiento de un vehículo por un conjunto de masas conectadas mediante resortes y amortiguadores.

La circulación de un carro sobre la carretera genera desplazamientos, velocidades y aceleraciones. Este sistema está sustentado por la primera ley de Newton la cual es fuerza = masa x aceleración. Con estas declaraciones se puede simplificar un carro por simetría a un cuarto de carro.

Para calcular el IRI se realizan dos procedimientos previos: primero se mide las cotas del terreno para elaborar un perfil de la carretera y luego se somete por dos filtros.

El filtro inicial consiste en generar un perfil corregido mediante la media móvil. A este nuevo perfil se vuelve a filtrar mediante el modelo del cuarto de carro.

El modelo del cuarto de carro busca representar las vibraciones del pasajero en un vehículo; es decir, los movimientos verticales ocasionados por la irregularidad de la carretera. Este modelo presenta dos sistemas: una masa de suspensión o amortiguada y una masa no amortiguada las cuales están conectadas a través de un amortiguador y un resorte. Además, la llanta del vehículo es representado por un resorte lineal.

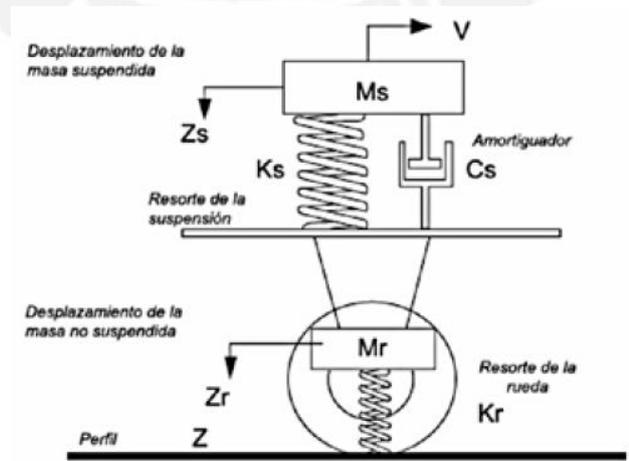


Figura 01. Modelo del cuarto de carro. Fuente (Badilla, 2009)

Los parámetros para la obtención del IRI son (Solminihac, 2001):

$$u = M_r/M_s = 0.15$$

$$k_2 = K_s/M_s = 63.3 \text{ (s}^{-2}\text{)}$$

$$c = C_s/M_s = 6 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$k_1 = K_r/M_s = 653 \text{ (s}^{-2}\text{)}$$

Las variables son:

C_s : razón de amortiguación

K_s : razón de amortiguación

K_r : razón de suspensión del neumático

M_s : masa amortiguada

M_r : masa no amortiguada

Z_s : altura de la masa amortiguada

Z_r : altura de la masa no amortiguada

Para calcular el IRI se deben asignar estos valores correspondientes al modelo del cuarto de carro y fijar una velocidad de referencia de 80 km/h.

A partir del modelo, se puede calcular el IRI en cada punto como el valor absoluto de la variable $|Z_r' - Z_s'|$, la cual representa a la pendiente rectificadora del perfil filtrado. Además, el IRI es la media aritmética de la suma de todos los resultados de la variable $|Z_r' - Z_s'|$.

La ecuación algebraica para cada punto de análisis es:

$$IRI = \frac{\sum_1^n |Z_r' - Z_s'|}{n}$$

Si el perfil está en forma continua, la ecuación sería la siguiente:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^L |Z_r' - Z_s'| dx$$

Las variables de estas ecuaciones son:

n = número de puntos a analizar

L = longitud del análisis

$|Z_r' - Z_s'|$ = Valor absoluto de la pendiente rectificadora

2.3 Métodos de medición del IRI

Los cuatro métodos potenciales para la medición del IRI se basan en la precisión del cálculo del IRI real (Sayers, et al., 1986).

Clase 1. Perfiles de alta precisión

Este método de clase 1 representa el más alto estándar de precisión para el cálculo del IRI. Requiere que el perfil longitudinal se medido de manera precisa por una serie de levantamientos topográficos cada 25 cm y con una precisión de 0.5 mm aproximadamente.

A este grupo pertenecen los equipos de medición estáticos como los levantamientos con mira y nivel, perfilómetro de barra del TRRL, Face Dipstick. Sin embargo, presentan un bajo rendimiento y no es recomendable su uso en carreteras de larga longitud a excepción de usarlos como referencia en la comparación de cálculos con otros equipos modernos como los perfilómetros dinámicos.

Actualmente, existen modernos perfilómetros que miden el IRI rápidamente y de gran calidad sin requerir esfuerzos de mantenimiento y calibración; no obstante, son instrumentos costosos y complejos y se demanda operadores calificados.



Figura 02. Perfilómetro láser de clase 1.

Fuente (<http://komsa.com.tr/tr/road-surface-profilometer-rsp>, 2015)

Clase 2. Otros métodos perfilométricos

Agrupar otros métodos que se basan en el cálculo del IRI en función del perfil longitudinal pero sin tener la precisión de la clase 1. Incluye métodos estáticos y perfilómetros de alta velocidad. Algunos ejemplos de perfilómetro de clase dos son el perfilómetro inercial GMR, que fue convalidado durante el IRRE para vías con un IRI menor a 3km/m, y el perfilómetro dinámico APL.



Figura 03. Perfilómetro APL. Fuente (Nava, 2007)

Clase 3. Estimaciones del IRI mediante correlaciones

Anteriormente, para medir la regularidad superficial se realizaban con sistemas tipo respuesta o sistemas de medición de rugosidad por reacción la cual estaba ligado a las características dinámicas del vehículo. Estos datos recogidos se corregían y convertían a la escala del IRI mediante ecuaciones de correlación obtenidas de la calibración de los equipos de clase 1 o 2. Adicionalmente, se tomaban controles muy rigurosos debido a que las características mecánicas varían fácilmente. Ante estas variaciones el vehículo se volvía a calibrar (Sayers, et al., 1986).

Algunos de los equipos más usados son el NAASRA Meter, *Bump Integrator* y el *Mays meter*, etc. (Del Águila, 1999). Además, a esta clase pertenece el instrumento MERLIN a pesar de que no mida el perfil longitudinal se puede obtener valores de irregularidad superficial correlacionales con el IRI. Este instrumento de medición requiere una calibración periódica.

Clase 4. Valoraciones subjetivas y medidas sin calibrar

Se usa para obtener datos referenciales para estimar el nivel de la uniformidad superficial del pavimento y relacionarlo con el IRI. Se puede usar un instrumento tipo respuesta sin calibrar para estimar el estado del camino y/o se puede evaluar mediante sensaciones de seguridad y confort al transitar por la vía. Estas apreciaciones sobre el estado de la carretera se pueden convertir a la escala del IRI a través de un estándar de la vía en función del valor del IRI (Sánchez & De Solminihac, 1989)

2.4 Especificaciones internacionales de IRI aplicadas en otros países

Diferentes países han desarrollado proyectos viales en los cuales han afinado la metodología de medición del IRI inicial en la construcción de carreteras. Estas investigaciones apuntan a proponer estrategias de mantenimiento, delimitar valores del IRI para cada tipo y antigüedad de pavimento. Además, presentan distintos procedimientos en la toma de datos para el cálculo del IRI, algunos países obtienen datos cada 1000 metros, otros cada milla, etc.

A continuación se presentan las especificaciones para el control del IRI usada en diferentes países.

Tabla 02. Especificaciones de otros países para el control del IRI.

Fuente (Badilla, et al., 2008)

Lugar	Procedimiento general	Requerimientos de IRI según tipo de pavimento o superficie		
		Asfalto	Hidráulico	Tratamiento superficial
Ministerio de Obras Públicas de Chile	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con un intervalo de medición de 200 m.	Promedio de tramos consecutivos ≤ 2.0 m/km Promedio individual ≤ 2.8 m/km		Promedio de 5 tramos consecutivos ≤ 3.0 m/km Promedio individual ≤ 4.0 m/km
	Recepción de Obra Nueva			
	No se indica el intervalo de medición	IRI ≤ 1.5 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 1.9 m/km, en el 85% de los datos IRI ≤ 2.3 m/km, en el 99% de los datos	IRI ≤ 2.0 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km, en el 85% de los datos IRI ≤ 2.8 m/km, en el 99% de los datos	IRI ≤ 2.4 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.9 m/km, en el 85% de los datos IRI ≤ 3.4 m/km, en el 99% de los datos
CR – 2002, Costa Rica	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con un intervalo de medición de 200 m	Promedio de 5 tramos consecutivos IRI ≤ 2.0 m/km Promedio individual ≤ 3.0 m/km		----
Ministerio de Fomento de España	IRI obtenido en tramos con un intervalo de medición de 100 m	IRI ≤ 1.5 m/km, en el 50% de los tramos del proyecto IRI ≤ 2.0 m/km, en el 80% de los tramos del proyecto IRI ≤ 2.5 m/km, en el 100% de los tramos del proyecto		

WisDOT, Wisconsin Estados Unidos	IRI obtenido en tramos de 1.609 km (1 milla)	IRI m/km	Tiempo	---	---
		< 1.1 < 1.17 < 1.29 < 1.33 < 1.37 < 1.45	Pav. nuevo 1 año 2 años 3 años 4 años 5 años		
Suecia	IRI obtenido en tramos de 20 m IRI obtenido en tramos de 20 m	IRI ≤ 1.4 m/km IRI ≤ 2.4 m/km		---	
Ministerio de Obras Públicas de El Salvador	Caminos rurales				
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 3.0 m/km		---	---
	Vías interurbanas				
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 2.0 m/km		IRI ≤ 2.5 m/km	
Quebec, Canadá	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 1.2 m/km, en el 70% de los datos IRI ≤ 1.4 m/km, en el 100% de los datos		---	---
Eslovenia	Carreteras de alto tránsito				
	IRI obtenido en tramos de 20 m	2.0 ≤ IRI ≤ 2.6 m/km 1.2 ≤ IRI ≤ 1.8 m/km			
	Carreteras de bajo tránsito				
	IRI obtenido en tramos de 20 m IRI obtenido en tramos de 100 m	4.0 ≤ IRI ≤ 4.6 m/km 3.0 ≤ IRI ≤ 3.8 m/km			
Portugal	No se indica el intervalo de medición	IRI ≤ 1.5 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km, en el 80% de los datos IRI ≤ 3.0 m/km, en el 90% de los datos		IRI ≤ 2.0 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km, en el 75% de los datos IRI ≤ 3.0 m/km, en el 100% de los datos	

2.5 Antecedentes sobre las mediciones de IRI en el Perú

A inicios de la década de los noventa, el Estado Peruano se vio en la necesidad de mejorar las deficientes carreteras y elaboró un Plan de Emergencia Vial para mejorar la transitabilidad de las vías nacionales mediante la rehabilitación. El primer instrumento de medición de rugosidad fue el MERLIN, acrónimo de la terminología inglesa *Machine for Evaluating Roughness using Low-Cost Instrumentation*, la cual fue promocionada por consultores con el fin de cumplir con los requisitos del Banco Mundial. También, se utilizó el equipo tipo respuesta *Bump Integrator* para la implementación de los controles de calidad de carreteras y definir estrategias de mantenimiento vial. Sin embargo, el uso fue limitado debido a la falta de personal capacitado para calibrar adecuadamente el equipo y mantener en estado óptimo la calibración durante las mediciones en campo. Consecuentemente, los resultados fueron imprecisos.

El 12 de agosto de 1994 el Estado Peruano concedió la buena pro de la Licitación Pública Especial de Rehabilitación y Mantenimiento de la Carretera de Arequipa Matarani a Concesiones de Carreteras S. A. (Concar), formada por Graña y Montero. Se definió como control de rugosidad el cálculo del IRI promedio; es decir, dar un IRI promedio del tramo concesionado.

En octubre de 1995 se difundió las especificaciones técnicas para la rugosidad por el Proyecto Especial de Rehabilitación de la Infraestructura de Transportes, las cuales se incluyeron como requisitos para la recepción de obra. Estas determinaciones se basaron en el control de la rugosidad por medio del IRI característico (IRI_c) que para el caso de pavimentos asfálticos nuevos o rehabilitados es igual al IRI promedio (IRI_p) del tramo evaluado más el coeficiente 1.645 multiplicado por la desviación estándar. Se precisó que para pavimentos nuevos el IRI_c debe ser menor a 2m/km, pavimentos con recapado asfáltico menor a 2.5 m/km y para pavimentos con sellado asfáltico el valor máximo debe ser 3 m/km (del Águila R., 1999).

En el año 2005, Provías Nacional adquiere un perfilómetro láser (Road Profile Surface - RSP) de la marca Dynatest para medir la rugosidad de las carreteras y obtener información actualizada sobre el valor patrimonial de las redes viales nacionales hasta esa fecha. Fue la primera vez que se utilizó un instrumento de medición del IRI de clase 1 en el Perú.

Actualmente, se usa el Manual de Carreteras EG-2013 la cual determina que para un tratamiento superficial el IRI debe ser menor o igual a 2.5 m/km, para un pavimento recién construido de concreto asfáltico en caliente la medición de la rugosidad se efectuará en toda la longitud y debe incluir ambas huellas aprobadas por el supervisor y se realizará en secciones de cada 100 m y el valor máximo del IRI será de 2 m/km al igual que el pavimento asfáltico en frío. Y para un pavimento de concreto hidráulico el IRI no podrá ser mayor que 3 m/km (MTC, 2013).

2.6 Normativa peruana respecto al IRI

El IRI es el principal índice que mide y controla la serviciabilidad en una carretera debido a que está relacionado con los costos de operación vehicular, la calidad de la conducción (comodidad) y la seguridad de los usuarios al transitar por las carreteras. Sin embargo, no existe una norma (como Norma Técnica Peruana) que se utilice actualmente en Redes Viales, departamentales. Solo existe la Norma Técnica Peruana CE.010 que se enfoca en pavimentos urbanos en el Perú.

La importancia de una Norma Técnica Peruana radica en establecer requisitos de diseño, mantenimiento, rehabilitación, definir una metodología de medición de rugosidad y tener un respaldo por parte de entidades nacionales. Actualmente, existen parámetros de IRI en la recepción de obras y se establece márgenes de valores de IRI en la mayoría de contratos de las concesiones viales. Además, las especificaciones de IRI se basan en las investigaciones realizadas por el Banco Mundial y se utiliza la norma internacional ASTM E950 para la utilización de equipos de clase 1 que se viene utilizando en el Perú en forma continua. (Montoya, 2013)



Capítulo 3. Roadroid

3.1 Reseña histórica

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) es un indicador estándar de rugosidad en pavimentos y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de la superficie de rodadura. Es ampliamente aceptado a nivel mundial y se utiliza para la gestión y evaluación de carreteras.

Debido a su importancia existen diferentes equipos de medición que se clasifican en cuatro clases de acuerdo al nivel de precisión de cálculo del IRI. Los equipos de primera clase son lo más precisos como los perfilómetros láser; sin embargo, el uso de estos es costoso y se requiere de personal capacitado. Además, los equipos estáticos de medición presentan un rendimiento muy bajo para un análisis de vía de varios kilómetros.

Debido al clima, tránsito, factores externos, etc. la regularidad superficial del pavimento varía por lo cual es necesario realizar mediciones cada cierto periodo de tiempo para disponer de un plan de conservación vial (mantenimiento, rehabilitación). Con el uso de equipos modernos y tradicionales (perfilómetros, levantamiento topográficos, etc.) calcular el IRI presentaría un costo elevado, por lo que el empleo de un nuevo equipo de medición de fácil uso, portable y eficaz representaría una preeminencia frente a los demás equipos.

Un grupo de ingenieros de nacionalidad sueca realizaban trabajos con dispositivos móviles, GPS desde 1997 enfocándose en mediciones de fricción, adaptaciones dinámicas de velocidad, recolección de datos de vías. La idea original de Roadroid surgió cuando en el año 2001 el *Transportation Research Board* (TRB), ubicado en Washington, monitoreó un proyecto en la cual las velocidades de los camiones eran bajas debido a la mala condición del camino. A partir de esta afirmación, nació el concepto de medir las vibraciones del vehículo para evaluar el estado de la carretera.

Junto con el *Royal Institute of Technology* se fabricó el primer piloto en el año 2002. En ese año los teléfonos inteligentes aún no existían, en consecuencia se utilizó una PC, un acelerómetro externo, un GPS y un amplificador de señal. Con estos equipos se usó un *software* para el análisis de las señales.

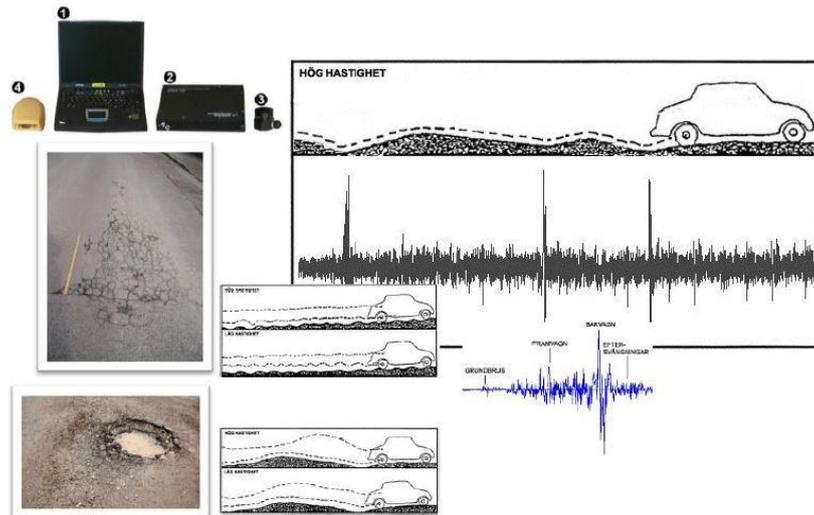


Figura 04. Primer prototipo Roadroid. Fuente (ROADROID, 2014)

Debido a los buenos resultados del primer prototipo la Administración Nacional de Carreteras de Suecia (SNRA por sus siglas en inglés) financió el proyecto para su desarrollo orientado a caminos no pavimentados de grava. El sistema se desarrolló con una PC con sistema operativo Windows integrado a un vehículo, un GPS, un acelerómetro colocado en el eje trasero del vehículo, datos móviles y la utilización de un sistema de información geográfica en la web para visualizar la calidad de las carreteras a través de colores.

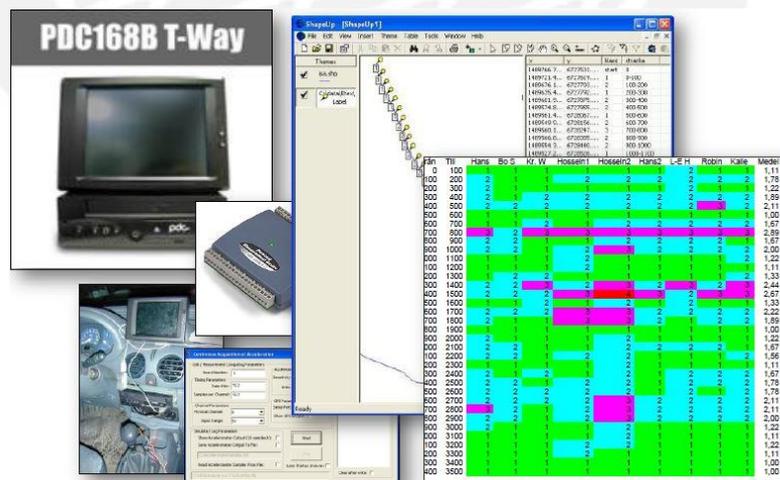


Figura 05. Segundo prototipo. Fuente (Forslöf, 2013).

La validación de los sistemas de medición y las inspecciones visuales fueron presentadas en el foro de transporte de Linköping en el 2005. Este coloquio se enfocaba en comparar las estimaciones visuales para determinar el IRI y lo desarrollado por Roadroid. El estudio consistía en analizar 35 segmentos de 100 metros de carretera de diferentes condiciones. El análisis se enfocó en las amplitudes medidas por el acelerómetro, algoritmos basados en la media cuadrática, velocidades de los vehículos y la cantidad de datos obtenidos en las distintas muestras. .

Los expertos expusieron sus resultados y se tuvo una coincidencia de aproximadamente del 70% con los cálculos obtenidos por el prototipo. Sin embargo, al realizar varias pruebas en los segmentos de carretera el porcentaje de coincidencias aumentó; aunque, estas comparaciones no son válidas debido a que las repuestas dadas por los expertos son subjetivas.

Este segundo prototipo llegó a su límite en el 2006, ya que presentaban diversas limitaciones como la interacción de cables y sensores con el medio ambiente, para diferentes condiciones climáticas los resultados eran poco confiables.

En el 2010, se fabricaron teléfonos inteligentes que incluían acelerómetro, procesador de datos, memoria, datos móviles. El equipo Roadroid con la experiencia adquirida años atrás decidió enrumbar su proyecto; no obstante, surgieron nuevas interrogantes sobre cómo utilizar las vibraciones del carro, definir las frecuencias de muestreo, conocer la sensibilidad del acelerómetro del móvil, diferenciar cada tipo de vehículo para la toma de datos.

La aplicación se desarrolló para celulares con sistema operativo Android. La elección de Android en vez de un dispositivo Iphone (iOS) se basa en la arquitectura, relación precio-rendimiento. Se empezó a realizar las pruebas con obstáculos en una carretera en el 2011.



Figura 06. Tercer prototipo Roadroid. Fuente (Forslöf, 2013).

Se eligieron los mejores celulares de esa época (Samsung Galaxy Tab GT P1000, Samsung GT-i9000 con Android OS 2.3 y Galaxy Tab con Android OS 2.2). Los ensayos se realizaron con diferentes tipos de vehículos a diversas velocidades (20, 40, 60, 80, 100, 120 km/h) y se colocaron 5 variedades de obstáculos.

Durante los ensayos se descubrió que hay variación entre los modelos de cada vehículo, específicamente a bajas velocidades y a la mayor velocidad de análisis. En el rango de 40 a 80 km/h las diferencias son más limitadas. Además, se presentaron diferencias entre los acelerómetros, frecuencias de muestreo entre los teléfonos inteligentes, por lo cual fue importante calibrar y estandarizar los aparatos de cada dispositivo. Asimismo, el elemento de montaje del *smartphone* debe ser estable.

A partir de los ensayos realizado en el 2011, la aplicación se mejoró y analiza 100 vibraciones por segundo y guarda valores de velocidad y coordenadas GPS.

Los usuarios de la aplicación pueden recolectar datos sin necesidad de tener conexión a internet, ya que la información se comprime y se envía a la nube. Por medio del portal web Google Maps se muestra la condición del camino analizado a través de cinco colores que guardan relación con el IRI calculado.

Tabla 03. Estado de la vía según Roadroid. Fuente (Roadroid, 2014)

Estado de la vía	IRI	Color
Buena	< 2.5	Verde
Satisfactoria	2.5 - 4	Amarillo
No satisfactoria	4 - 6	Rojo
Pobre	> 6	Negro

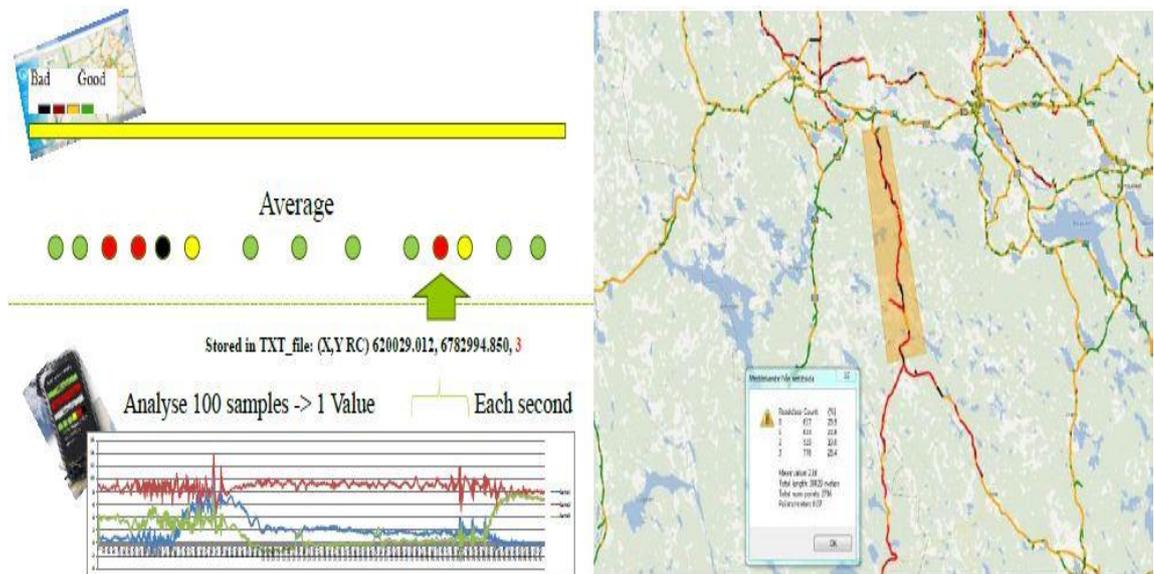


Figura 07. Calidad de superficie de rodadura de la ciudad de Gavle.

Fuente (Forsl f, 2012)

3.2 Definición

Roadroid es un aplicativo para smartphone cuya funcionalidad es monitorear la condición de las carreteras por medio del acelerómetro del teléfono que capta las vibraciones del vehículo y transforma por medio de ecuaciones correlacionales o el modelo del cuarto de carro a unidades IRI (m/km). Además, utiliza el GPS y los datos móviles para transferir la información del estado de la vía la cual se puede aprovechar para diferentes propósitos como gestionar el mantenimiento vial, entre otros.



Figura 08. Logo Roadroid. Fuente (www.roadroid.com, 2016)

El sistema Roadroid analiza el camino 100 veces por segundo (en 90km/h una señal cada 25 cm). Con estos datos calcula el IRI y guarda la condición de la carretera con sus respectivas coordenadas GPS. Los datos se guardan en el teléfono y posteriormente son transferidos a la nube.



Figura 09. Uso de la aplicación Roadroid en carreteras.

Fuente (Roadroid, 2014)

Con la información obtenida y a través de un sitio web (Google Maps) se puede visualizar el recorrido analizado y el estado de la vía por medio de colores los cuales son: verde para una condición óptima, amarillo para satisfactorio, rojo para insatisfactorio y negro para un camino pobre o malo.

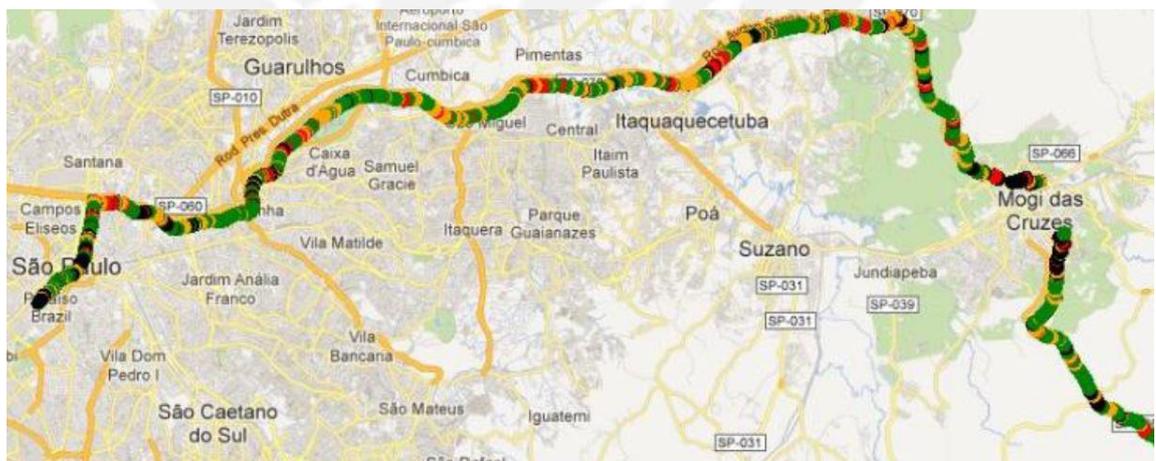


Figura 10. Visualización de la carretera analizada en Google Maps.

Fuente (Roadroid, 2014)

3.3 IRI estimado (eIRI)

El IRI estimado es una variación del cálculo de IRI propuesto por el Banco Mundial, ya que usa correlaciones lineales con instrumentos de medición de alta precisión. Además, el eIRI pertenece a la clase 3 del método de precisión propuesto por Sayers (Sayers, et al., 1986).

El análisis se basa en medir tramos de 20 metros con un perfilómetro láser y el Roadroid en diferentes secciones de las carreteras. Al realizar la comparación, se estableció un factor de correlación para estimar el IRI. El coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.5 lo que significa que se correlaciona moderadamente.

No obstante, el análisis presenta algunas limitaciones en las superficies de pavimento en mal estado y en vehículos pequeños, debido a que son más sensibles que un coche estándar.

Las investigaciones para encontrar soluciones a las limitaciones aún continúan por diferentes instituciones como el Banco Mundial, UN OPS, la compañía SpeaAutostrade y algunas universidades.

La universidad de Auckland determinó una correlación del 81% entre los datos obtenidos por la aplicación Roadroid y un perfilómetro de clase 1.

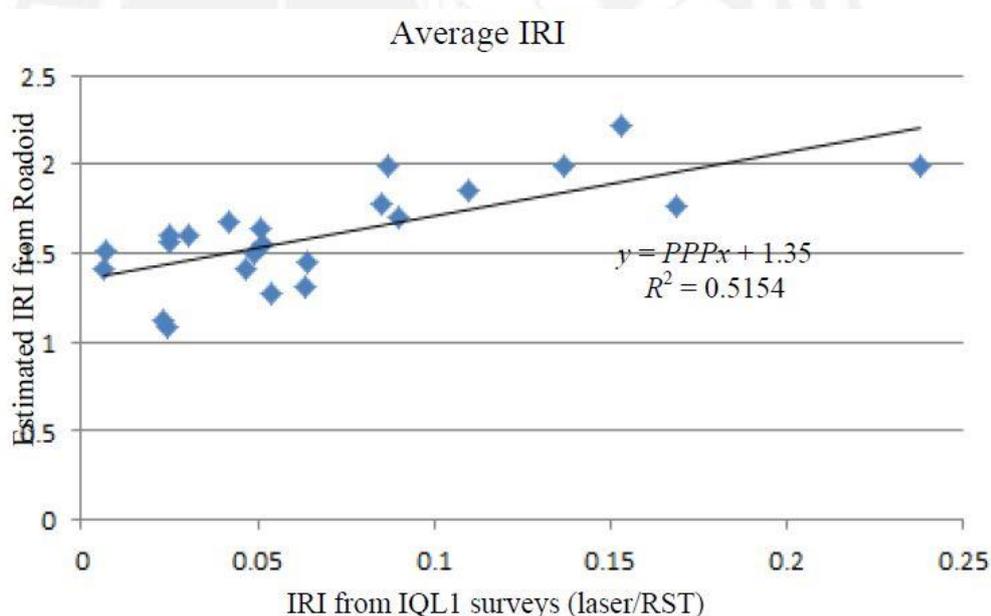


Figura 11. Perfilómetro láser vs aplicación Roadroid.

Fuente (Forsl6f, 2013)

3.4 IRI calculado (cIRI)

A partir de diferentes investigaciones por parte del equipo Roadroid se estableció el IRI calculado que al ser calibrado correctamente se obtiene resultados muy confiables en la medición de la rugosidad de las carreteras. Asimismo, pertenece a la clase 2 del método de precisión propuesto por Sayers (Sayers et al., 1986).

El cIRI se basa en el modelo del cuarto de carro planteado por el Banco Mundial y recomienda que durante la toma de datos para el cálculo del IRI sea a velocidad constante o a un rango entre los 60 a 80 km/h.

La validación de los datos se efectuó con el software PROVAL la cual es una herramienta validada y utilizada por instituciones norteamericanas como la FHWA (Federal Highway Administration) y la LTPP (Long Term Pavement Performance Program). Sin embargo, presenta algunas limitaciones al realizar las mediciones en superficies muy rugosas como caminos de adoquines o pavimentos con sellado superficial de grava, pero se obtiene excelentes resultados para pavimentos de asfalto.

Las investigaciones aún continúan para mejorar el cIRI. Actualmente, el cIRI presenta una mayor precisión que el eIRI.

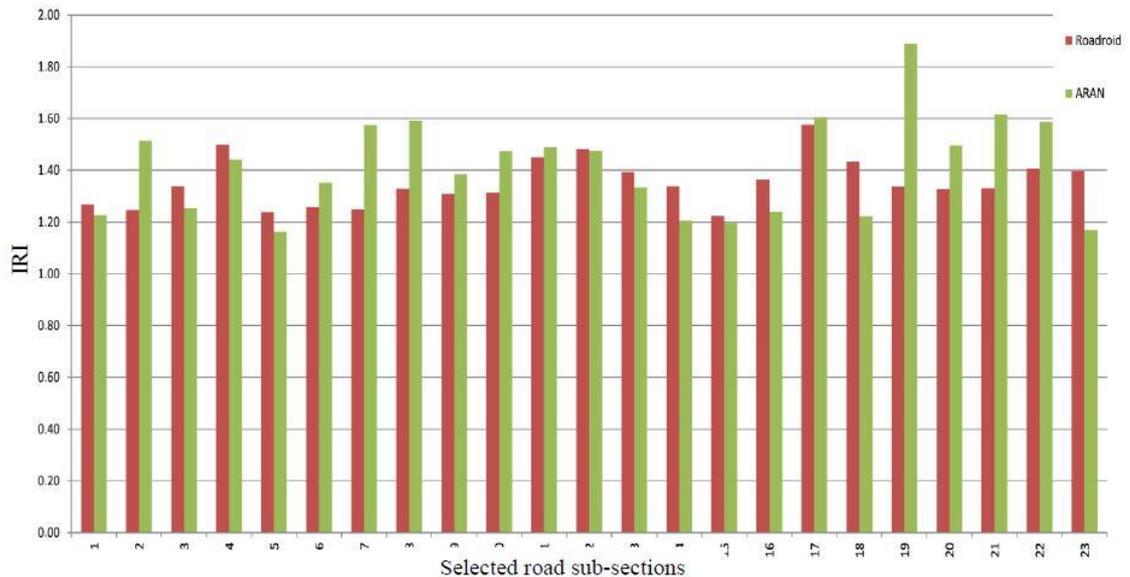


Figura 12. Comparativo entre el cIRI y el software ARAN.

Fuente (Forslöf, 2013)

3.5 Índice Roadroid (RI)

Roadroid diferencia las vías analizadas por medio del IRI (calculado o estimado) en cuatro clases y los representa a través de colores (verde, amarillo, rojo y negro). El objetivo es presentar los datos de manera global y escalable.

El Índice Roadroid muestra el porcentaje de cada clase de ruta gracias a la base de datos que se genera al analizar una carretera. Por ejemplo, para un segmento de ruta examinada se consigue un 94.6% de bueno (color verde), 3.3% de satisfactorio (color amarillo), 1.5% de no satisfactorio (color rojo) y 0.6% de pobre (color negro). La ventaja de este índice radica en añadir datos de varias mediciones en el tiempo; además, se genera informes automáticamente facilitando la comparación de los resultados obtenidos de la calidad de pavimentos de diferentes longitudes de carreteras.

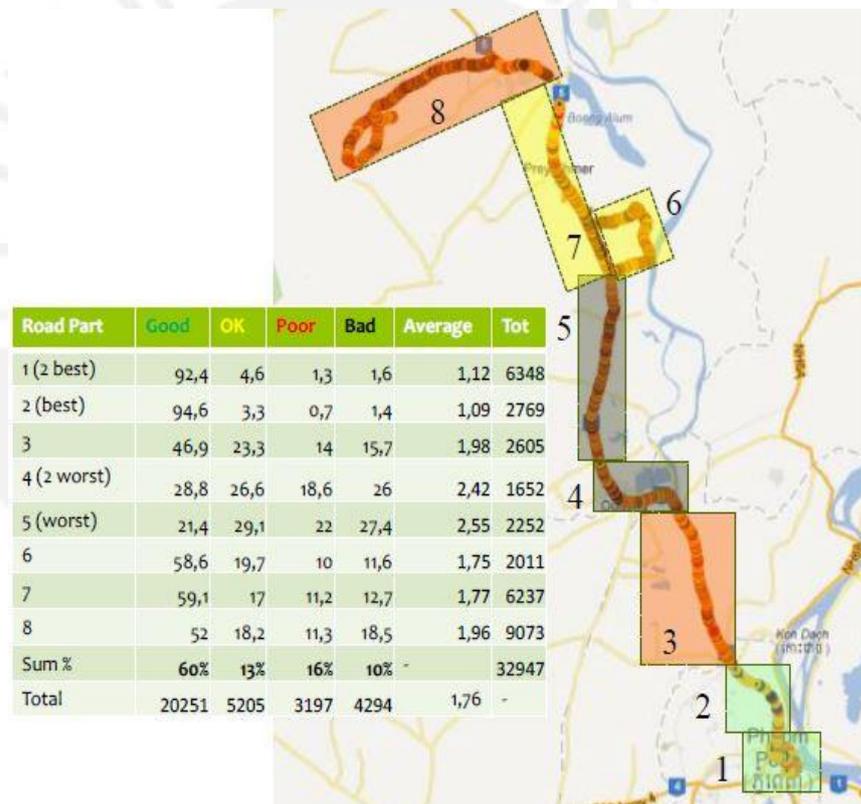


Figura 13. Índice Roadroid (RI) en un tramo de carretera en Camboya.

Fuente (Forsslöf, 2012)

Capítulo 4. Metodología

En este capítulo, se explicarán los procesos a seguir para la obtención de los datos medidos en campo a través del software Roadroid en el tramo Huarmey-Casma de la carretera Panamericana Norte. Se presentará un mapa del recorrido realizado; además, se explicará el orden del trayecto en cada carril de la autopista. Asimismo, se detallará los pasos a seguir para la configuración de la aplicación según el tipo de vehículo. También, se presentará la forma correcta de importación de los datos recopilados y la visualización de la información en la página web del software para su posterior descarga y análisis de datos.

4.1 Sector de estudio

El sector de estudio está localizado entre las provincias de Casma – Huarmey de la carretera Pativilca – Trujillo, en el distrito Las Culebras, en la región de Ancash.



Figura 14. Tramo 3 de la Red Vial 4.

Fuente (Google Earth)

El inicio de la toma de datos se realizó en la progresiva 369+100, cerca de la ciudad de Casma, hacia la progresiva 299+100 (Huarmey). Además, el sector

analizado presenta dos calzadas, con sentido de sur a norte y viceversa respectivamente. Asimismo, cada calzada consta de dos carriles. El análisis del IRI se realizó en cada carril (4 en total).

4.2 Organización

El inicio de la toma de datos fue en la progresiva 369+100 km hasta la progresiva 299+100 km. El primer carril analizado fue el derecho tanto como de norte a sur y de sur a norte. Luego, se realizó el cálculo de IRI para el carril izquierdo utilizando el mismo criterio de viaje.

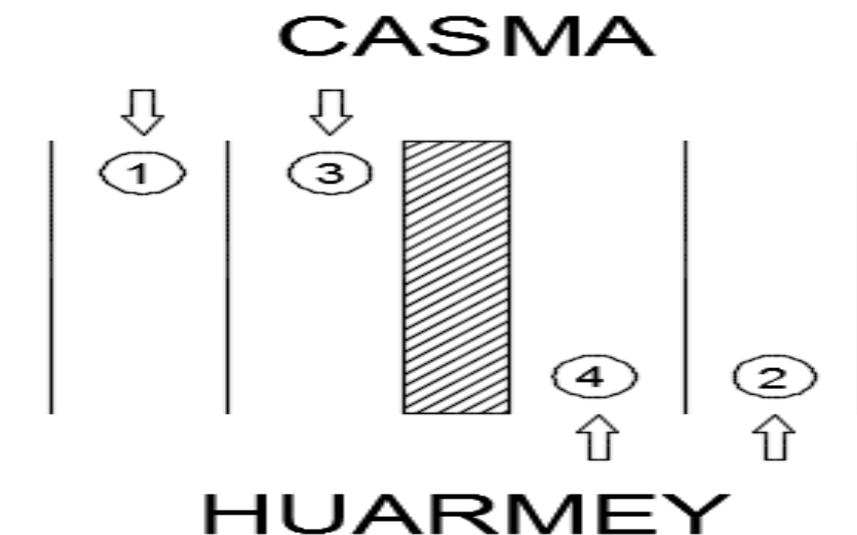


Figura 15. Carriles Casma-Huarmey.

Fuente (Propia)

El horario escogido fue turno día aproximadamente a las 2 de la tarde. La elección de este horario se debe por motivo de seguridad, específicamente por la visibilidad ya que el sector de estudio es una vía rápida y el tráfico es elevado.

En el tramo estudiado hay presencia constante de vehículos de carga pesada que utilizan el carril derecho de la calzada, por lo cual, al hacer las mediciones con la aplicación Roadroid en el carril mencionado se tuvo que acelerar el vehículo y desplazar hacia el carril izquierdo hasta adelantarlo y retornar a la posición inicial (carril derecho) para continuar con la medición. Estas aceleraciones repentinas para adelantar a vehículos pesados que implica salir y retornar a la trayectoria generan datos incorrectos. Para eso, se hará un filtro posterior para obtener solamente datos válidos.



Figura 16. Presencia de vehículos pesados en el carril de medición.

Fuente (Propia)

Como se puede apreciar en la Figura 16, por el carril derecho transitan dos semi tráiler a una velocidad de 80 km/h aproximadamente. En esta situación se aceleró la camioneta hasta llegar a una velocidad mucho mayor para adelantar a los dos vehículos hasta regresar al carril derecho. Además, al acelerar se salió de la velocidad límite del software Roadroid, 100 km/h; por lo cual, se obtuvieron resultados erróneos en ese sector.

El viaje se realizó en un vehículo marca Toyota modelo Prado que clasifica como vehículo grande. La velocidad de muestreo estuvo en un rango de 60 a 95 km/h para obtener resultados óptimos de IRI calculado e IRI estimado.



Figura 17. Vehículo utilizado para la toma de muestras.

Fuente (Propia)

El Ingeniero Lars Forsslöf CEO de la empresa Roadroid proporcionó un equipo celular con la aplicación Roadroid instalada al área de Movilidad y Transporte de la Sección de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

El celular es de marca Samsung modelo GT-I9105P y la versión de Android es 4.2.2. Además, se proporcionó el sujetador de celular de la misma marca.



Figura 18. Celular Samsung y sujetador empleado en la toma de datos.
Fuente (Propia)

4.3 Recopilación de datos

En primer lugar, se debe instalar la aplicación Roadroid en el smartphone que debe tener el sistema operativo Android. El software se puede descargar sin ninguna restricción de la página web www.roadroid.com en formato “apk”.

Luego, se registra el número IMEI del celular y la empresa Roadroid proporcionará al cliente el usuario y contraseña para acceder a la página web de la aplicación y visualizar los datos que se obtendrán en campo previo pago por los servicios del software. En este caso de estudio, la licencia fue obtenida gratuitamente por la universidad (PUCP) con fines educativos.

El sujetador del teléfono se colocó en el parabrisas de tal forma que esté rígido y el celular deberá estar en dirección horizontal. Además, para disponer de buenas fotografías durante la toma de datos se inicia la cámara del smartphone y se verifica la posición del smartphone.



Figura 19. Posición del celular en el parabrisas del vehículo.

Fuente (Propia)

Antes de empezar con el cálculo del IRI se activa el GPS del celular y se procede a configurar la aplicación.

En primer lugar, se selecciona Menú (figura 20) y *settings* (figura 21). Se podrá observar una lista de opciones para un adecuado uso del software.

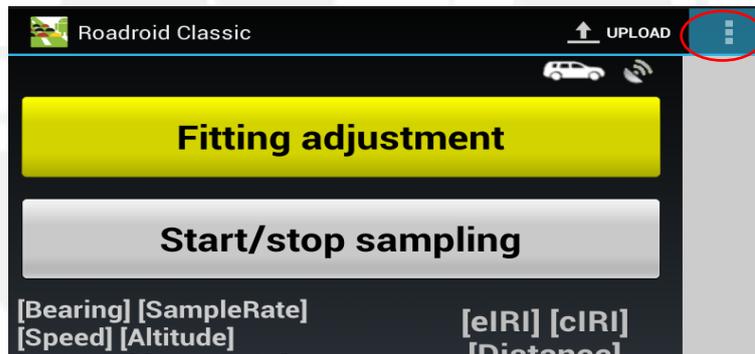


Figura 20. Menú aplicación Roadroid. Fuente (Propia)

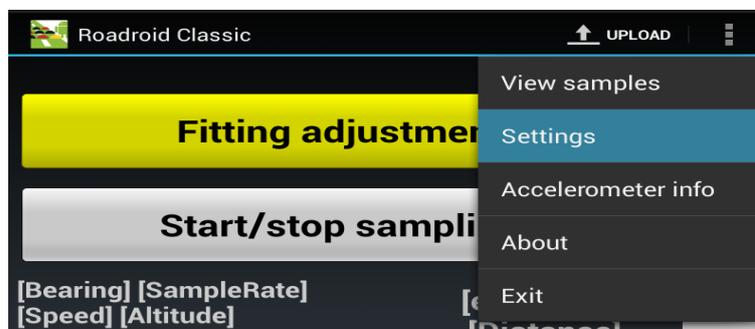


Figura 21. Settings-Software Roadroid. Fuente (Propia)

Luego, se selecciona la opción *User Email* (figura 22) y se coloca el correo del cliente. Además, la opción *Enable HTTP Upload* debe contener un check en su casilla (figura 23) para poder cargar los datos recolectados en campo a la página web de Roadroid correctamente.

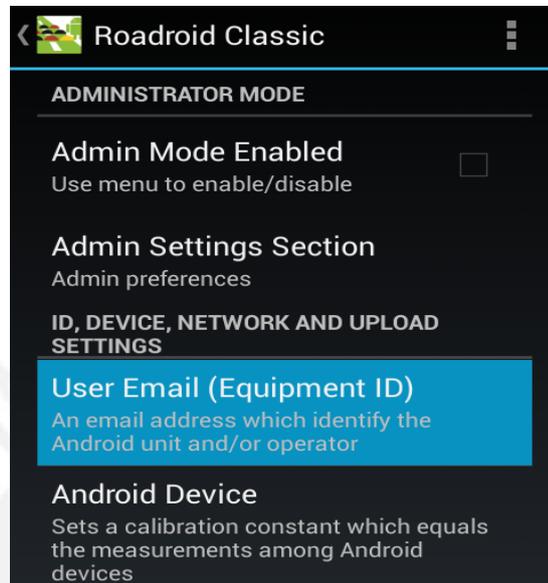


Figura 22. User Email.

Fuente (Propia)

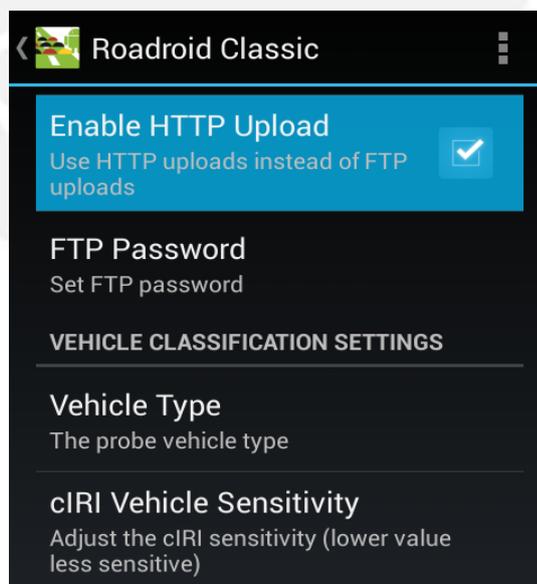


Figura 23. Enable HTTP Upload.

Fuente (Propia)

Paso seguido, se escoge la opción *Vehicle Type* (figura 24) y se elige el tipo de vehículo a utilizar. La aplicación presenta varias alternativas según el tamaño del vehículo como pequeño, mediano y grande. Para esta toma de datos se utilizó un vehículo de marca Toyota, modelo Prado que según sus características se clasifica como grande

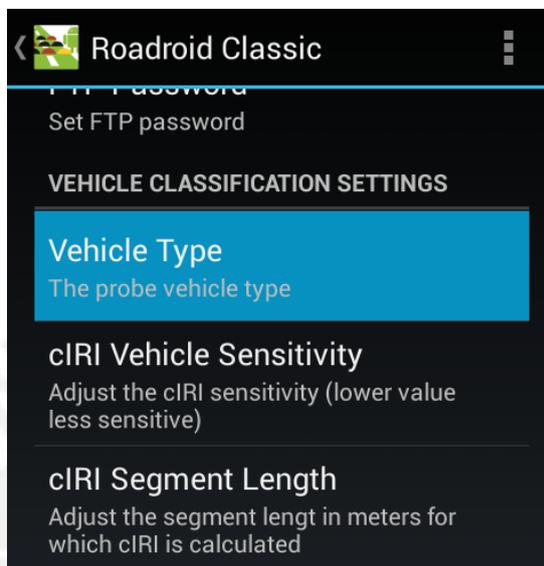


Figura 24. Vehicle Type. Fuente (Propia)

Adicionalmente, se selecciona la opción *cIRI Vehicle Sensivity* (figura 25) la cual es 1.6 para carreteras de concreto asfáltico. En caso se requiera fotografías durante el trayecto se escoge la opción *Auto Photo Capture Segment* (figura 26) y se elige la distancia que realizará dicha acción.

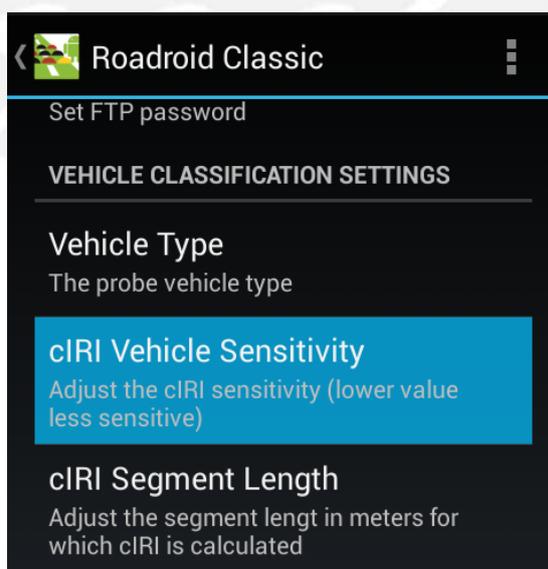


Figura 25. cIRI Vehicle Sensivity. Fuente (Propia)

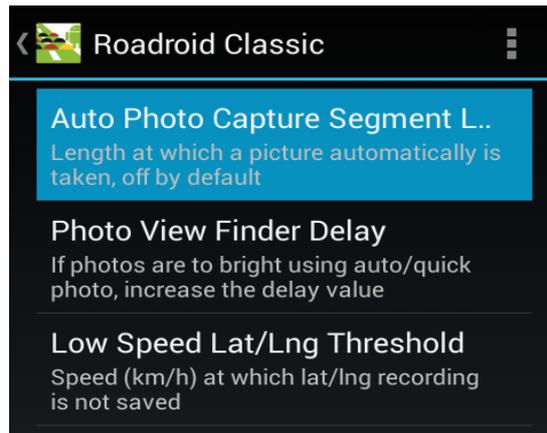


Figura 26. Auto Photo Capture Segment.

Fuente (Propia)

Luego de configurar la aplicación Roadroid se selecciona la opción *Fitting adjustment* (figura 27) para calibrar el equipo. Los valores de X, Y, Z deben estar lo más cercano a cero (figura 28) para que el botón OK se presente de color verde para proceder con los cálculos de rugosidad.

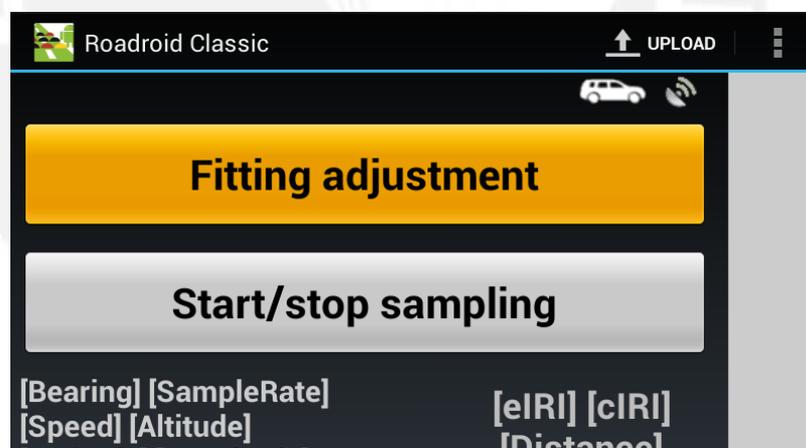


Figura 27. Fitting adjustment.

Fuente (Propia)

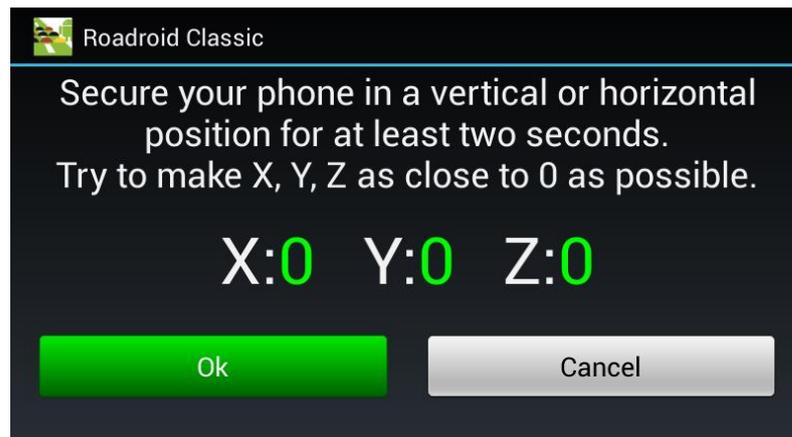


Figura 28. Calibración del software Roadroid Classic.

Fuente (Propia)

Antes de presionar el botón, *Start/stop sampling* el vehículo debe estar en marcha a una velocidad constante en el rango de 60-90 km/h para un adecuado cálculo de IRI calculado o estimado. Se sugiere estar 200 metros antes desde el punto de partida de la toma de datos.

4.4 Importar datos a la página web

Al finalizar la toma de datos en campo se procedió a cargar los archivos a la página web de Roadroid. Se debe verificar que el equipo esté conectado a una red wi-fi o datos móviles, aunque la última no es recomendable si se van a cargar fotografías del recorrido de la carretera ya que presentan una capacidad de memoria mayor.

Se procede a iniciar la aplicación Roadroid y en la interfaz se puede observar la opción *upload* (figura 29). Al seleccionarla presentará un cuadro con los botones *Data* (figura 30) y *Media*. La primera alternativa carga los datos relacionados al cálculo del IRI y la segunda opción carga las imágenes obtenidas durante el trayecto de la vía (ROADROID, 2015).

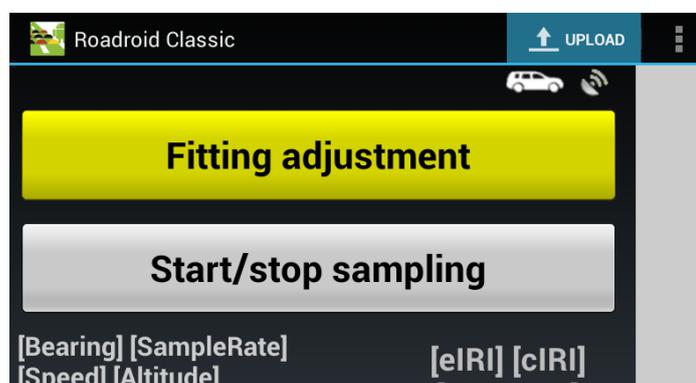


Figura 29. Opción Upload-Roadroid. Fuente (Propia)

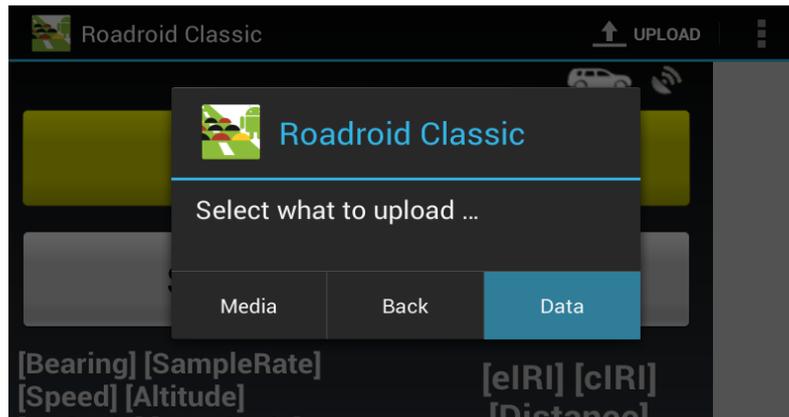


Figura 30. Cargar archivos a la página web de Roadroid.

Fuente (Propia)

Los archivos generados durante la toma de datos se guardan automáticamente en la carpeta roadroid del celular en formato “zip”. Asimismo, las fotografías se almacenan en la misma carpeta.

Al cargar los datos exitosamente a la web los archivos encontrados en la carpeta Roadroid se trasladan a la carpeta roadroid/backup. Además, en la pantalla del smartphone aparecerá el mensaje “upload complete”.

4.5 Visualización de la información

Los archivos cargados exitosamente se visualizarán después de una hora, aproximadamente, en la página web de Roadroid.

Transcurrido el periodo de tiempo descrito se ingresa el usuario y contraseña a la dirección web www.roadroid.com para observar la ruta analizada y los datos para hallar el IRI calculado del sector de estudio.

En la pestaña Map se observará el recorrido realizado, esta se presentará de diferentes colores según el estado de la carretera.

Al presionar el botón *Change* se desplegará un menú con diferentes opciones como *set period time*, *create reports* y *manage map layers*. La primera permite modificar la fecha de medición. Esta alternativa es importante, debido a que permite comparar estados de la carretera según los IRI calculados en diferentes periodos de tiempo.

La opción *create reports* presenta la alternativa *draw polygon* para delimitar la carretera en la cual se tomó los datos usando la aplicación. Se presiona el clic derecho del mouse para formar el polígono en el tramo de la carretera que se desea analizar y para finalizar se presiona doble clic. El polígono cerrado

estará de color naranja. Luego, se presiona en el botón calcular y se observará un cuadro en la que detallará el estado de la ruta y el IRI estimado promedio.

Finalmente, el cuadro *manage map layers* permite cambiar a mapa satelital; además, de colocar los puntos GPS, agregar los datos analizados, la velocidad de muestreo y las fotos. Este último, se presentará con el dibujo de una cámara de color negro en cada punto de la carretera en la cual se capturó la imagen. Al presionar sobre cualquiera de estas se ampliará y mostrará la fotografía.

En la figura 31 se puede apreciar el mapa recorrido utilizando la aplicación Roadroid, en ella se puede observar íconos de color negro en diferentes partes de esta. Al hacerle clic izquierdo se abrirá la fotografía tomada en ese punto. Este es muy útil para poder verificar el estado de la carrera y poder comparar la serviciabilidad de la vía en el tiempo.

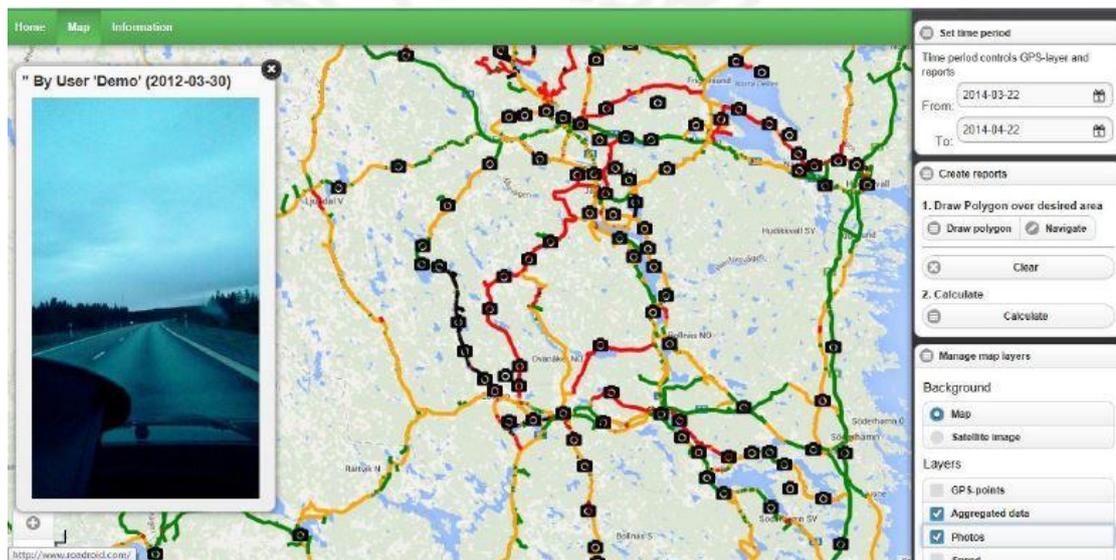
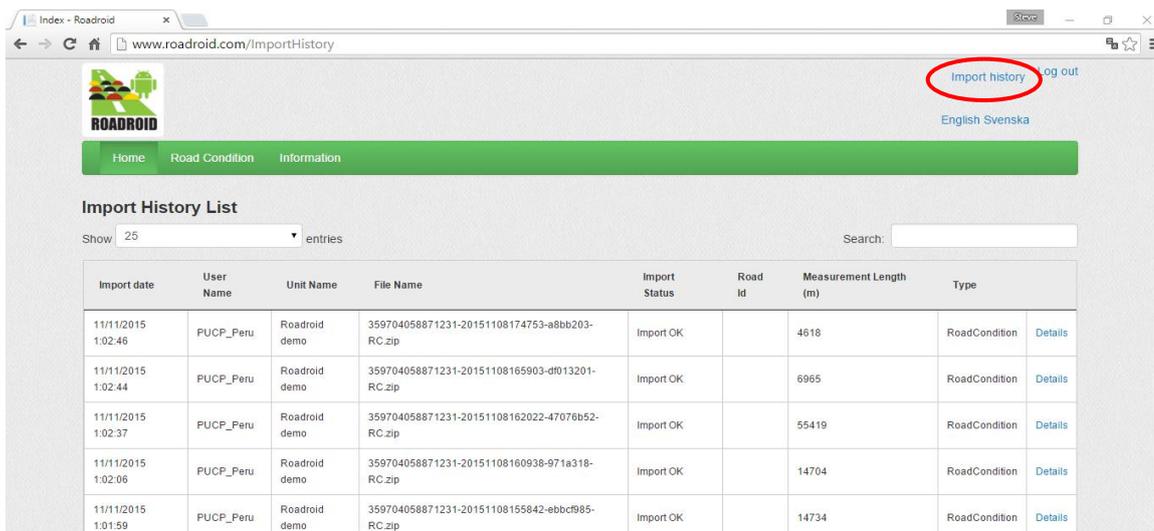


Figura 31. Fotografía registrada en un sector de la carretera.

Fuente (Roadroid, 2014)

4.6 Descarga de archivos

Para descargar los archivos cargados a la página web de Roadroid, se dirige a la pestaña *Home*. En la esquina superior derecha se podrá apreciar el hipervínculo *Import history*. Este abrirá una tabla y mostrará todas las mediciones realizadas con el equipo celular registrado, incluyendo la fecha de la toma de datos, la longitud del tramo de vía.



Import date	User Name	Unit Name	File Name	Import Status	Road Id	Measurement Length (m)	Type
11/11/2015 1:02:46	PUCP_Peru	Roadroid demo	359704058871231-20151108174753-a8bb203-RC.zip	Import OK		4618	RoadCondition Details
11/11/2015 1:02:44	PUCP_Peru	Roadroid demo	359704058871231-20151108165903-df013201-RC.zip	Import OK		6965	RoadCondition Details
11/11/2015 1:02:37	PUCP_Peru	Roadroid demo	359704058871231-20151108162022-47076b52-RC.zip	Import OK		55419	RoadCondition Details
11/11/2015 1:02:06	PUCP_Peru	Roadroid demo	359704058871231-20151108160938-971a318-RC.zip	Import OK		14704	RoadCondition Details
11/11/2015 1:01:59	PUCP_Peru	Roadroid demo	359704058871231-20151108155842-ebbcf985-RC.zip	Import OK		14734	RoadCondition Details

Figura 32. Mediciones realizadas con el app Roadroid.

Fuente (Propia)

En el lado derecho de cada medición registrada se apreciará un hipervínculo con letras de color azul con el nombre *Details*, que al presionar un clic mostrará botones para descargar los datos. Uno de estos de nombre *Generate*, permite escoger 5 longitudes de espaciamiento para el cálculo del IRI. Puede ser cada 20, 50, 100, 160 y 200 metros. Una vez escogido entre estas cinco opciones se presionará el botón *Generate* y se descargará en formato texto los cálculos de IRI calculado y estimado.

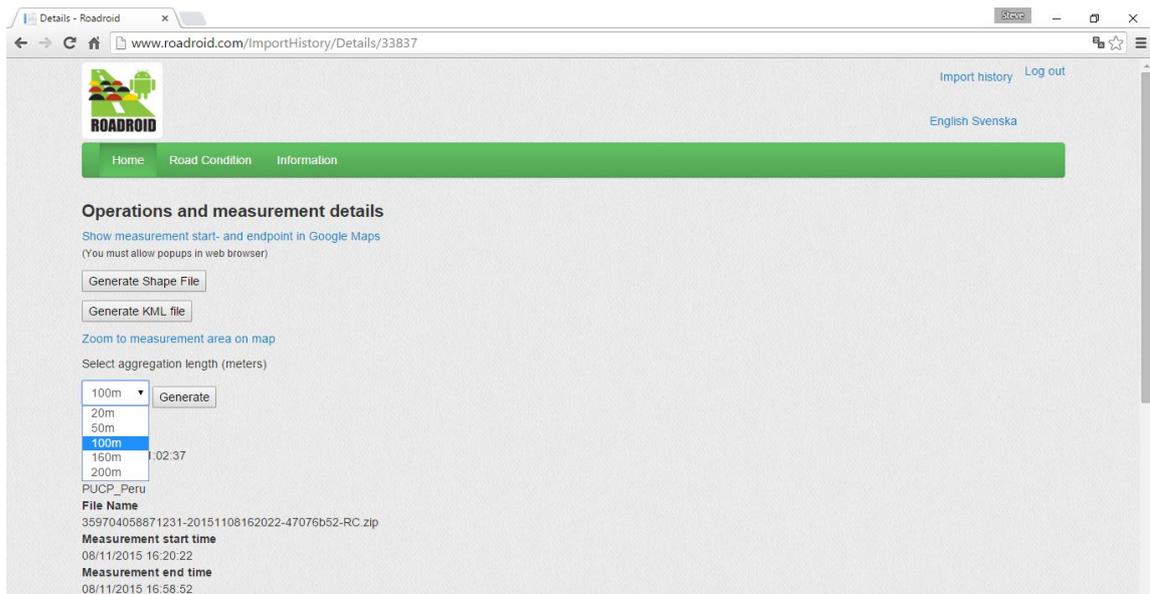


Figura 33. Descargar archivos en formato texto.

Fuente (Propia)

El botón *Generate KML file* es un archivo que permite ver la ruta recorrida en el programa *Google Earth*. Además, el hipervínculo *Show measurement start- and endpoint in Google Maps* abre la dirección de la página web de *Google Maps* y muestra el recorrido realizado.

4.7. Realizar gráficos en Excel

Los archivos descargados en formato texto (.txt) se importarán al software Excel para realizar los gráficos. Estos servirán para realizar un análisis comparativo con las mediciones del perfilómetro láser. Además, de comprobar la influencia de la velocidad del vehículo para el cálculo del IRI y obtener el perfil del tramo recorrido

En cada columna de la hoja de cálculo estarán los datos de fecha y hora de la toma de dato, latitud, longitud, distancia (m), velocidad (km/h), altura (m), eIRI y cIRI.

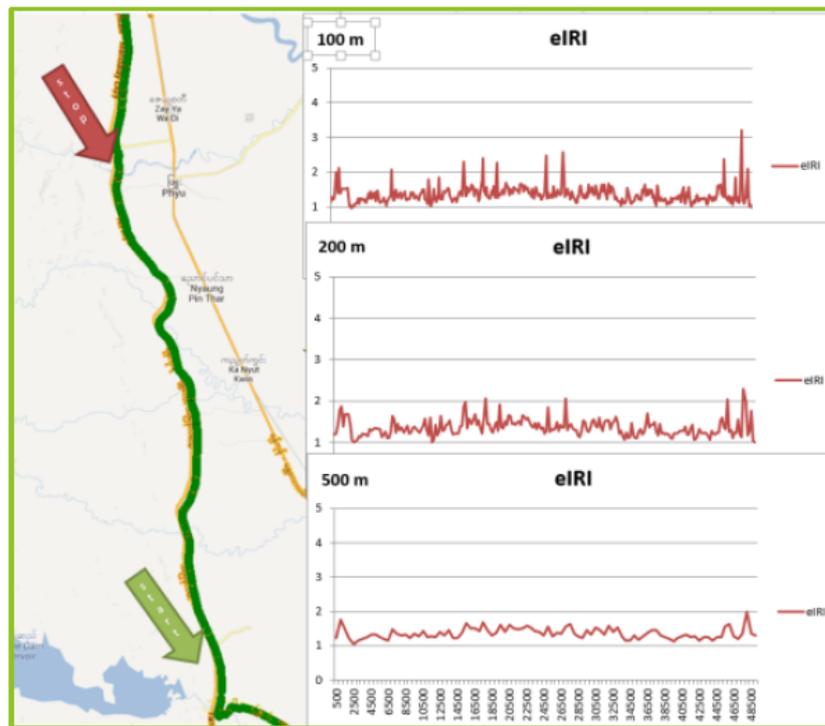


Figura 34. Gráficos de eIRI en un sector de la carretera.

Fuente (Roadroid, 2014)

Es importante resaltar que cada vez que se presiona la opción Stop durante los trabajos en campo, el software va a crear otro documento de texto en otra carpeta, pero en la misma ruta mencionada líneas arriba. Es recomendable llevar un cuaderno de notas para escribir la hora y la progresiva aproximada cada vez que se detiene la toma de datos. Por ejemplo, en el tramo Huarmey – Casma existe un peaje, por lo cual, se detuvo la aplicación y se anotó la hora y la progresiva aproximada. De igual manera, al terminar el recorrido de un carril de la autopista se tuvo que girar en U para continuar con las mediciones. Antes de cambiar de carril, se presionó Stop. Al posicionarse en el siguiente carril y al estar a una velocidad constante se presiona el botón play en la pantalla del celular y los trabajos de medición continúan. Por diferentes razones se puede detener la aplicación; sin embargo, se debe saber con precisión el inicio de la toma de datos. Esto es importante ya que al importar los datos de texto al Excel, se tendrá la hora exacta de los diferentes puntos de la trayectoria recorrida. En este caso en particular se detuvo para evitar datos erróneos en el peaje debido a la presencia de varias gibas y además el vehículo se detuvo para hacer el pago del servicio de la autopista. Entonces, se importa los dos documentos de texto a la hoja de cálculo del Excel para analizar todo el carril.

Capítulo 5. Resultados

En el presente capítulo se presentará los resultados obtenidos de la aplicación Roadroid en el tramo Huarmey – Casma. Se visualizará la carretera recorrida y se mostrará el índice Roadroid. Además, la comparación de los diferentes IRI calculados tales como el IRI estimado y calculado con el IRI del perfilómetro láser se presenta en diferentes gráficos. Adicionalmente, se evaluará las velocidades realizadas en la vía y su influencia en el cálculo del IRI.

5.1 Resultados Índice Roadroid

El viaje se inició desde la ciudad de Casma con dirección al distrito de Huarmey. Se recorrió los cuatro carriles pertenecientes a la autopista de dos calzadas independientes. La distancia aproximada es de 70 km.

La autopista se encuentra en estado óptimo. El Índice Roadroid (RI) muestra los carriles recorridos de color verde y amarillo, cuyo significado es bueno y satisfactorio respectivamente.



Figura 35. Área seleccionada para el cálculo de IRI estimado.

Fuente (Propia)

Como se puede apreciar en la figura 35, casi la totalidad de la carretera está en estado “bueno”; es decir, el IRI tiene un valor bajo. En los segmentos de color amarillo el IRI se incrementa levemente debido a la presencia de curvas, variaciones de velocidad.

El número de puntos por metro calculado por la aplicación fue de 0.08; es decir, en 100 metros recorridos se tomaron 8 puntos (8 valores de IRI). La relación de puntos calculados es inversamente proporcional a la velocidad recorrida. La velocidad del vehículo durante la toma de datos estuvo en el rango de 60 a 95 km/h. En la siguiente tabla se presenta el resumen de los puntos calculados y el valor del IRI estimado (eIRI) del área seleccionada.

Tabla 04. Condiciones de los puntos analizados y el eIRI en la carretera. Fuente (Propia)

Condición de la carretera	Número de puntos	Porcentaje (%)	IRI estimado (eIRI)
Buena (verde)	11430	96.6	1.46
Satisfactoria (amarilla)	222	1.9	
No satisfactoria (rojo)	50	0.4	
Pobre (negro)	21	0.2	

Los puntos cuya condición es no satisfactoria y pobre se debe a la presencia de reductores de velocidad, presencia de vehículos pesados que obligó a realizar cambios de velocidades en poco tiempo. Además, en el trayecto recorrido se encuentra el peaje Las culebras en la cual se tuvo que reducir la velocidad por presencia de gibas y detenerse para pagar el derecho al tránsito en la autopista. Estas circunstancias generan un IRI alto y se refleja en las condiciones no satisfactoria y pobre. Sin embargo, el porcentaje de estos puntos analizados son bajos.

El IRI estimado en la carretera es de 1.46 m/km. Este valor indica que la carretera está en estado óptimo para un viaje confortable y seguro.

5.2 Resultado eIRI, cIRI

Los cálculos del IRI se realizaron cada 100 metros para compararlos directamente con los resultados del perfilómetro láser.

Los cálculos del IRI se realizaron para cada carril de la calzada izquierda y derecha respectivamente. Luego de obtener la información requerida se realizó un promedio entre ambos carriles de la calzada y se obtuvo el valor final para compararlo con los resultados del perfilómetro láser. Se procedió de esta manera debido a que los resultados del perfilómetro láser están por calzada (izquierda y derecha) y no por cada carril. La calzada izquierda incluye los carriles número uno y tres; y para la calzada derecha los carriles dos y cuatro detallados en la figura 15.



Figura 36. Autopista de dos calzadas. Tramo Huarmey-Casma. Fuente (Propia)

El recorrido del tramo 3 de la Red Vial 4 presenta varias curvas horizontales y verticales en algunos sectores. Esto genera una disminución de velocidad antes de ingresar a una curva. De la misma manera, se presenta un puente, vibradores en la plataforma, parches, peaje, gibas, personal de la concesión realizando mantenimiento rutinario de limpieza de plataforma, accesos a pequeños poblados donde las mototaxis y motos lineales circulan por la berma de la carretera; por lo cual, se tuvo que mantener prudencia al controlar la velocidad del vehículo. Todas estas descripciones particulares se pudieron observar durante los trabajos en campo cuyas consecuencias se ve reflejado en la alteración del IRI estimado y calculado generado por el software Roadroid.

A continuación se presentan dos gráficos comparando el IRI estimado y calculado con el IRI obtenido con el perfilómetro láser. Ambos gráficos pertenecen a la calzada izquierda (carril 1 y 3) descrito en la figura 15.

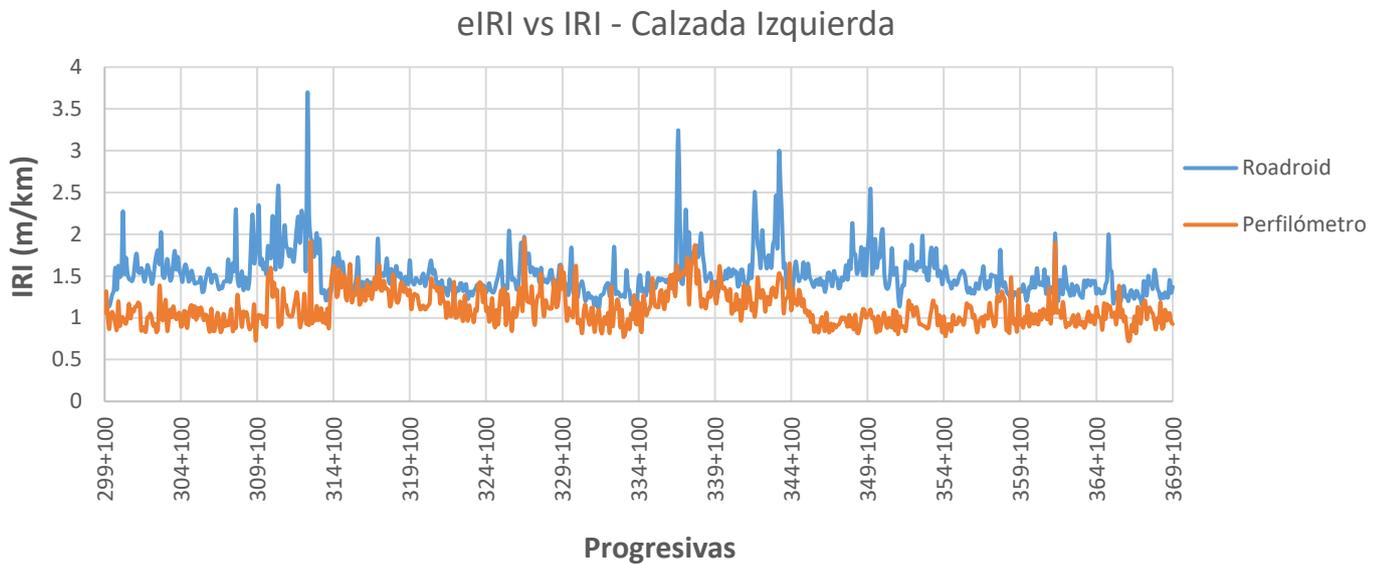


Figura 37. Gráfico eIRI vs IRI perfilómetro C.I. Fuente (Propia)

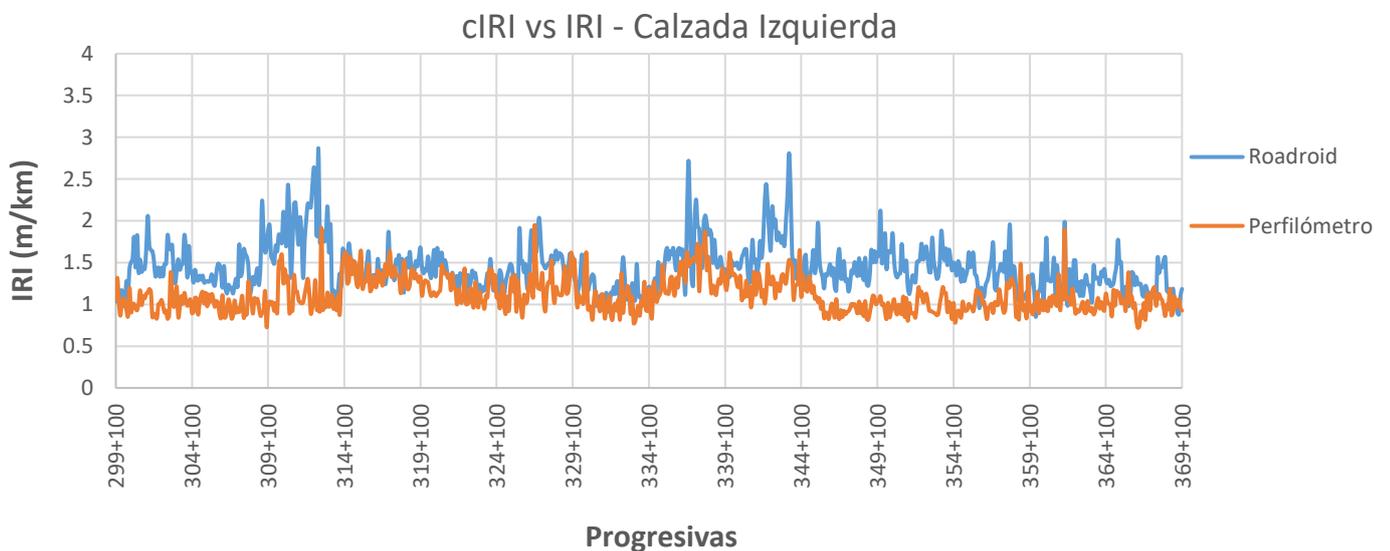


Figura 38. Gráfico cIRI vs IRI perfilómetro. Fuente (Roadroid)

Estos datos son el promedio de los dos carriles pertenecientes a la calzada izquierda cuya dirección es de Casma a Huarmey (carriles 1 y 3). Los valores del Roadroid están por encima de los del perfilómetro láser. En algunos sub tramos de la carretera los valores se asemejan mucho. Posteriormente, se analizarán las posibles causas de un incremento de IRI en comparación con el equipo de clase uno. Ahora, se explicará las causas de los valores picos en ambas figuras. Es importante reconocer estos puntos altos para no tomarlos en cuenta la dar el valor real del IRI en la carretera. En los gráficos se pueden apreciar picos en algunas progresivas las cuales representan el aumento de la rugosidad en la plataforma o están presentes estructuras adheridos a la vía.

En la PR 312+400 se encuentra un pequeño puente de 21 metros de longitud llamado Puente Culebras. Al transitar por la estructura se sobrepasa una junta, empalme entre el puente y la plataforma de la carretera, al inicio y final, este genera vibración en el automóvil e incrementa el valor del IRI, ya que existe un desnivel respecto al pavimento. Debido a que los IRI están calculados cada cien metros solo se aprecia un punto pico que alcanza un valor de IRI mayor a 3.5 m/km.



Figura 39. Puente Culebras. Fuente (Propia)

En la PR 336+700 se presenta un parche en toda la calzada. Al parecer, esa parte de la vía servía como un acceso a un botadero, ya que se puede apreciar las huellas de vehículos pesados y una gran cantidad de volumen de arena acopiado al lado de la vía. Este parche presenta un desnivel con respecto al pavimento; consecuentemente, el valor de IRI sobrepasa los 3 m/km.

La presencia de un vibrador en la plataforma en la PR 343+300 también produjo un incremento en el IRI. Esta estructura se coloca en tramos rectos y prolongados para disminuir el riesgo que el chofer se duerma o se distraiga. Esto produce una vibración en todo el vehículo y se refleja en el valor del IRI.



Figura 40. Vibradores en la Panamericana Norte. Fuente (Propia)

En el intervalo de las progresivas 348 al 349 se puede observar presencia de pequeños parches y varias curvas verticales, por lo que generó un incremento del IRI. Además, la presencia de arena era notoria en la carretera. La presencia de personal obrero de la concesión realizando labores de limpieza rutinaria es importante. Esto generó que no se tome datos de un carril de la calzada (aproximadamente 300 metros)



Figura 41. Presencia de arena en la plataforma de la vía. Fuente (Propia)

Estas causas descritas están relacionadas directamente al aumento del IRI a lo largo de la Panamericana Norte. Los cambios de velocidad también están vinculadas al cambio de IRI pero en menor dimensión. La presencia de vehículos pesados dificultó de la misma manera la toma correcta de datos de un carril de la vía.

Con respecto al gráfico del IRI calculado (cIRI), se observa que es similar a la figura del eIRI; salvo, que no presenta picos solitarios en las progresivas descritas y los valores pico son menores que el calculado por el IRI estimado (eIRI). Es decir, al lado de los valores altos hay datos cuya diferencia no es

tan distante como en la figura del eIRI vs IRI. Por ejemplo, al lado del pico de la PR 312+400 el valor sobrepasa los 3.5 m/km y el dato adyacente es cercano al 2.3 m/km. Empero, en el gráfico del cIRI vs IRI el pico es 2.87 m/km y el valor próximo es 2.6 m/km.

La mayoría de los puntos cIRI son menores que los eIRI por lo que se deduce que hay una corrección de datos por parte del software Roadroid.

A continuación se presenta los gráficos de la calzada derecha comparando el IRI estimado y calculado con el IRI obtenido con el perfilómetro láser. La dirección de la calzada es de sur a norte (Huarney – Casma).

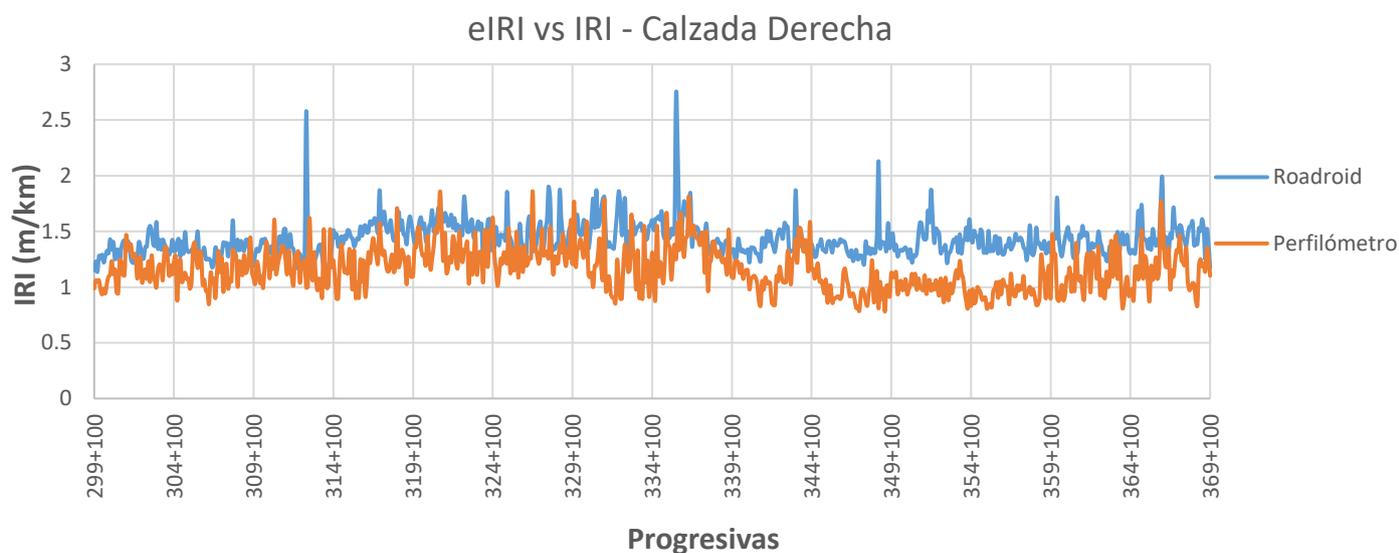


Figura 42. Gráfico eIRI vs IRI perfilómetro C.D. Fuente (Propia)

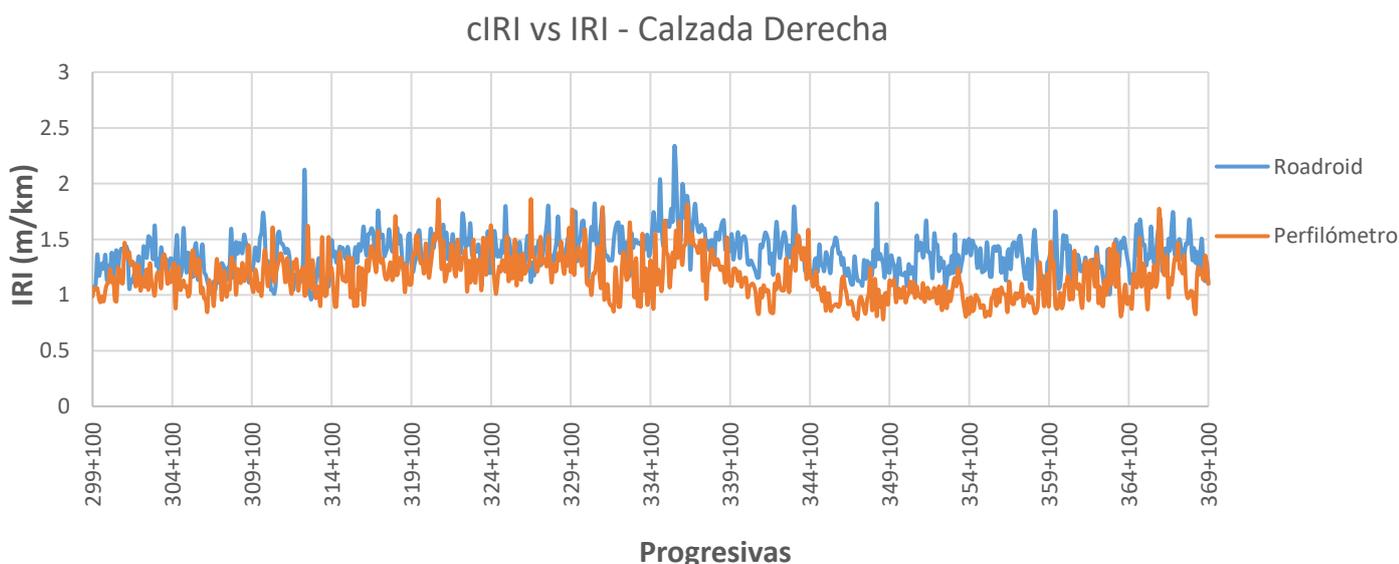


Figura 43. Gráfica cIRI vs IRI perfilómetro C.D. Fuente (Propia)

En la calzada derecha los puntos picos son similares y se ubican en las mismas progresivas de la calzada izquierda.

A partir de las figuras mostradas de la comparación de los valores del IRI, se deduce que los datos obtenidos presentan una mayor similitud del IRI calculado por el software Roadroid y del perfilómetro láser. La principal razón es la poca presencia de vehículos grandes en la calzada derecha; por lo cual, se pudo controlar la velocidad del vehículo al momento de la medición en campo. La toma de datos fue a las 3 de la tarde. En ese horario la mayoría de vehículos de transporte van de norte a sur, ya que en su mayoría parten de Chimbote, Trujillo, Chiclayo.

Además, la calzada derecha fue construida a partir del año 2009; por consiguiente, el tiempo de servicio es menor que al de la calzada izquierda y se refleja en un menor valor de IRI.

La velocidad recorrida en la calzada derecha fue mayor que en la calzada adyacente por la disminución de tráfico principalmente. Se tuvo cuidado en controlar los rangos de velocidades recomendada por la aplicación que es de 60 a 95 km/h, en su mayoría la velocidad oscilaba alrededor de 90 km/h. Esto produjo las oscilaciones del IRI calculado observada en la figura 40. Analizando esta figura, se afirma que al tomar datos a una velocidad casi límite del intervalo, el vehículo vibra un poco más y se ve reflejado en los valores altos y bajos del IRI calculado.

Con todos los datos obtenidos con la aplicación Roadroid se procedió a realizar una comparación con los valores de IRI del perfilómetro para analizar en que tanto se parecen los valores calculados.

Se obtuvo la siguiente gráfica:

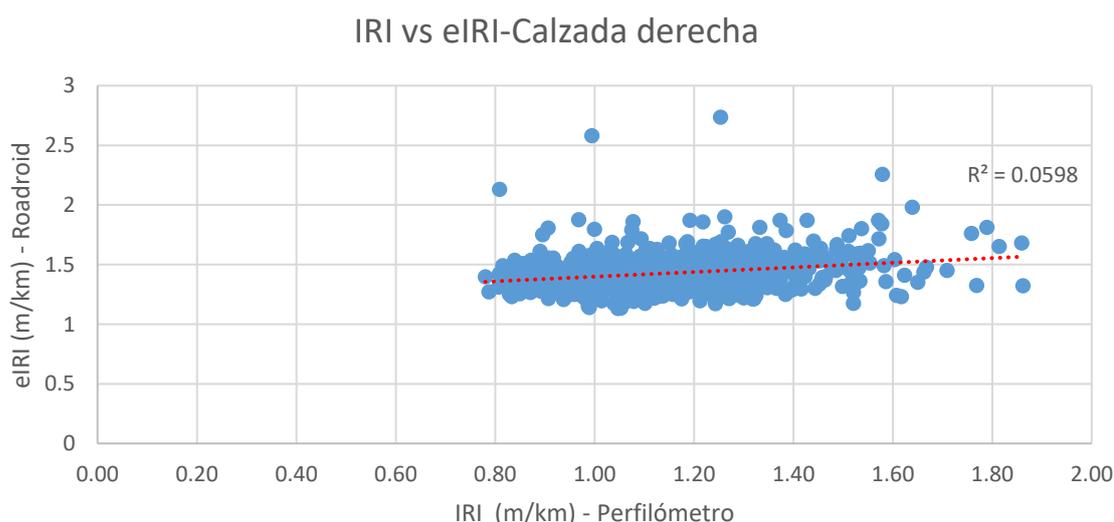


Figura 44. Gráfico IRI vs eIRI – Calzada derecha (C.D.).

Fuente (Propia)

En la figura 43 se aprecia que el R^2 es muy bajo; por lo cual, esa comparación no es la adecuada. Una situación similar ocurre para la calzada izquierda. Una de las causas son los outliers, valores excepcionales lejanos del centro y la variación de datos a lo largo de la vía.

Para realizar una comparación adecuada y limitar en lo posible el efecto de los factores externos y variaciones de pendiente notorias en el perfil de la carretera, se seleccionará un sub tramo de la vía.

5.3 Elección de sub tramo comparable – Calzada izquierda

Una vez obtenido los dos gráficos para cada calzada, izquierda y derecha, se selecciona un sub tramo para analizar si existen similitudes entre los valores calculados por el Roadroid y el perfilómetro láser.

En las figuras 37 y 38 se pueden apreciar que hay intervalos de progresivas en la vía en la cual los resultados son muy similares o varían muy poco. Sin embargo, hay segmentos en la carretera en la cual los resultados son distantes.

Entonces, se graficó en Excel el perfil de la carretera analizada para verificar si el cambio de pendiente tiene influencia en los resultados del IRI. Este gráfico se obtuvo debido a que la aplicación para smartphone también calculó los diferentes puntos de altitud utilizando la función de GPS del smartphone para cada punto de cálculo, en este caso cada 100 metros.



Figura 45. Perfil calzada izquierda.

Fuente (Propia)

A partir del perfil de la calzada izquierda, se verifica que en el intervalo de progresivas del 314+100 al 334+100 inician dos pendientes prolongadas. Se verificará la similitud de resultados en dicha zona.

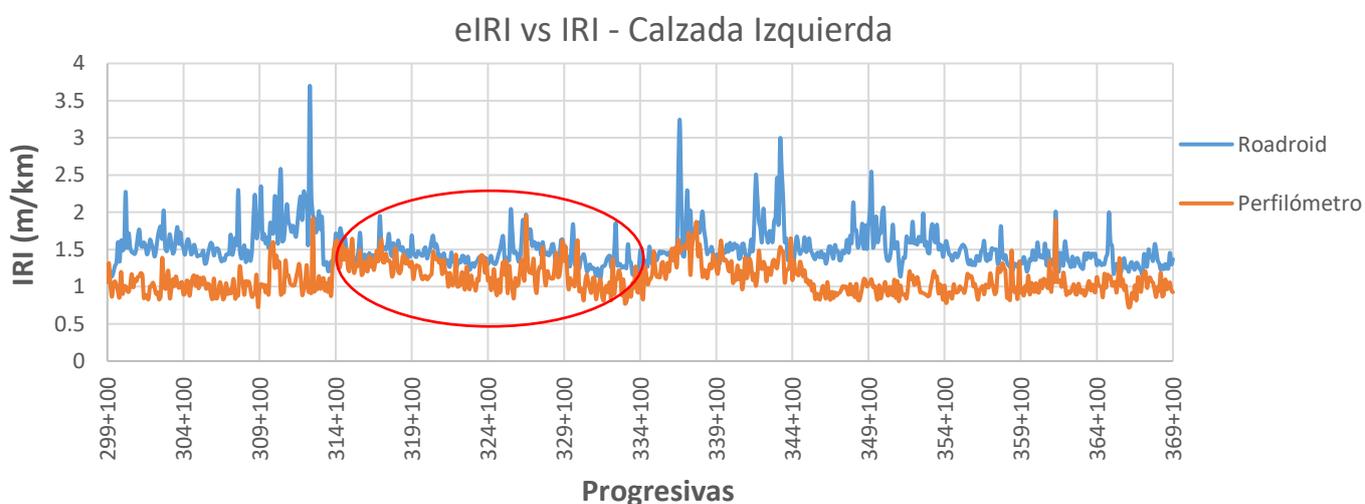


Figura 46. Selección de un sub tramo del gráfico eIRI vs IRI. Fuente (Propia)

Como se puede apreciar según las figuras mostradas, de la progresiva 314+100 al 334+100 los valores calculados por el Roadroid y el perfilómetro son menores que en otros segmentos de la carretera. Una pendiente continua presenta valores cercanos al equipo estándar que es el perfilómetro.

Se muestra a continuación el tramo a analizar del gráfico eIRI vs IRI de la calzada izquierda

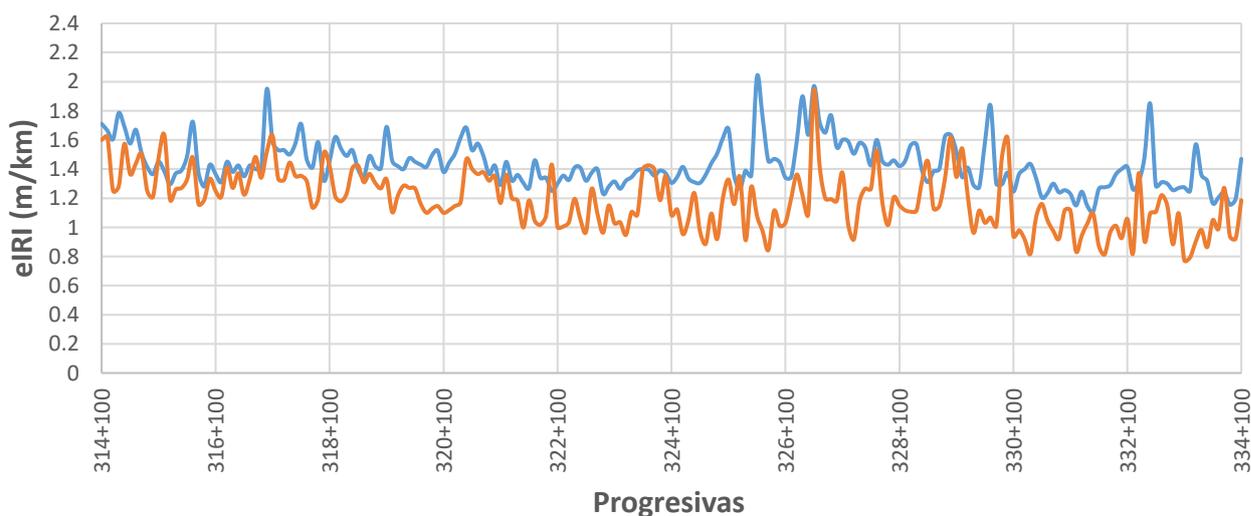


Figura 47. Sub tramo a analizar del gráfico eIRI vs IRI.

Fuente (Propia)

En la figura 44, en la progresiva 325+000 aproximadamente se puede visualizar el valor más alto del IRI que es 2.035 m/km. En esa progresiva se produce un cambio de pendiente del perfil de la carretera. Por lo que se sospecha que la variación de la pendiente genera un aumento del IRI. De igual forma sucede en el kilómetro 317, hay un cambio de pendiente en el perfil y se aprecia en la gráfica que el IRI también aumenta, cuyo valor de IRI es 1.95 m/km.

Se procede a seleccionar el mismo intervalo en la gráfica cIRI vs IRI de la calzada izquierda.

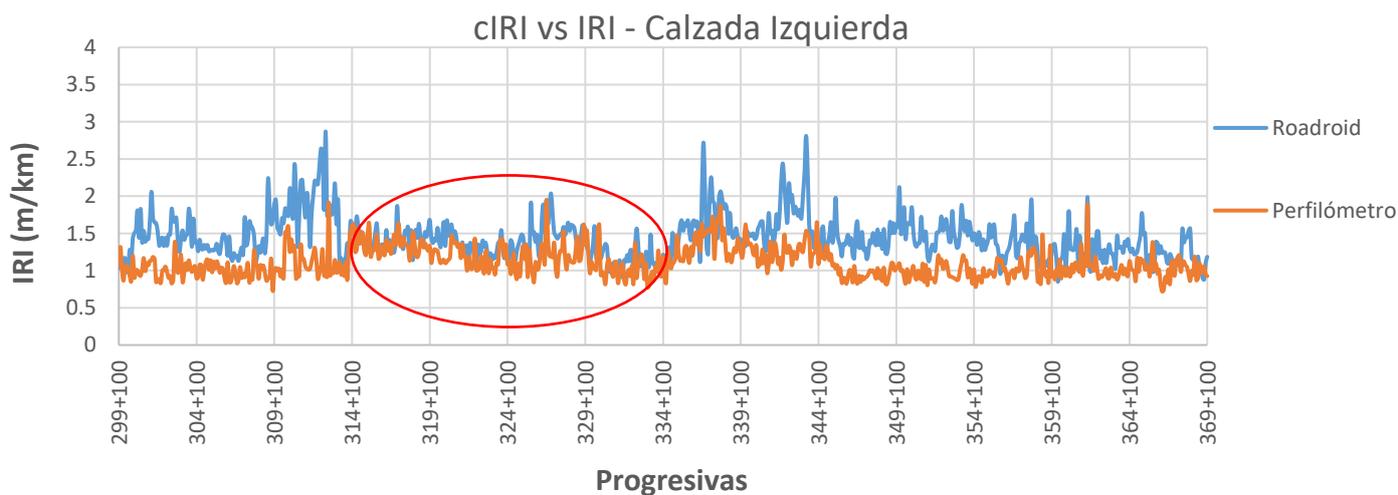


Figura 48. Selección de un sub tramo del gráfico cIRI vs IRI. Fuente (Propia)

El IRI calculado vs el IRI del perfilómetro se asemejan entre las progresivas 314+100 y 334+100, debido a la pendiente constante del perfil como se describió en el párrafo anterior. Se mostrará el tramo seleccionado para visualizar mejor el comportamiento de los valores de los índices de rugosidad.

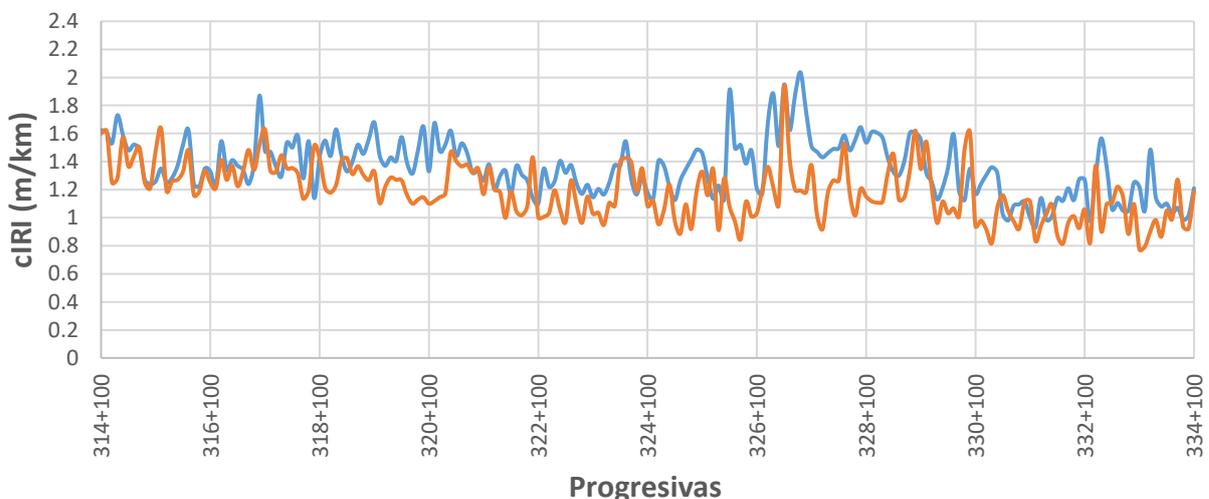


Figura 49. Sub tramo a analizar del gráfico cIRI vs IRI. Fuente (Propia)

La figura 46 presenta el mismo comportamiento que la figura 44, el cambio de pendiente del perfil implica un aumento del valor del IRI. Adicionalmente, los valores del IRI calculado son menores que el estimado, ya que la media es 1.36 m/km frente al 1.43 m/km del IRI estimado en el intervalo de las progresivas 314+100 al 334+100.

5.4 Elección de sub tramo comparable – Calzada derecha

De la misma manera, se repite el procedimiento del acápite 5.3 para la calzada derecha. Con los datos de altitud otorgados por el software Roadroid se procede a graficar el perfil de la calzada derecha.



Figura 50. Perfil calzada izquierda. Fuente (Propia)

La figura del perfil de la calzada derecha es similar a la figura 42. Durante el recorrido de la toma de datos con el software, se verificó que las dos calzadas están en el mismo nivel de altitud en gran parte del tramo. En algunos kilómetros de vía la calzada derecha está a un nivel superior con respecto a la calzada izquierda.

Se seleccionó el mismo intervalo de progresivas para el mismo análisis realizado en la calzada izquierda.

A continuación se presenta la selección de valores del gráfico IRI estimado versus IRI calculado por el perfilómetro.

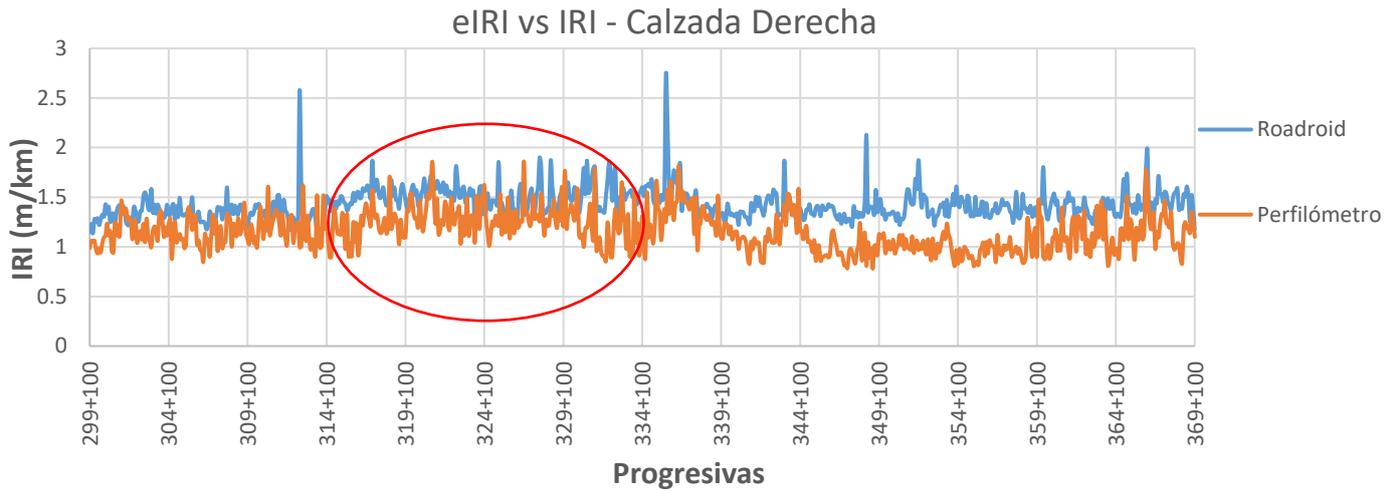


Figura 51. Selección de un sub tramo del gráfico eIRI vs IRI. Fuente (Propia)

A continuación se muestra el tramo seleccionado.

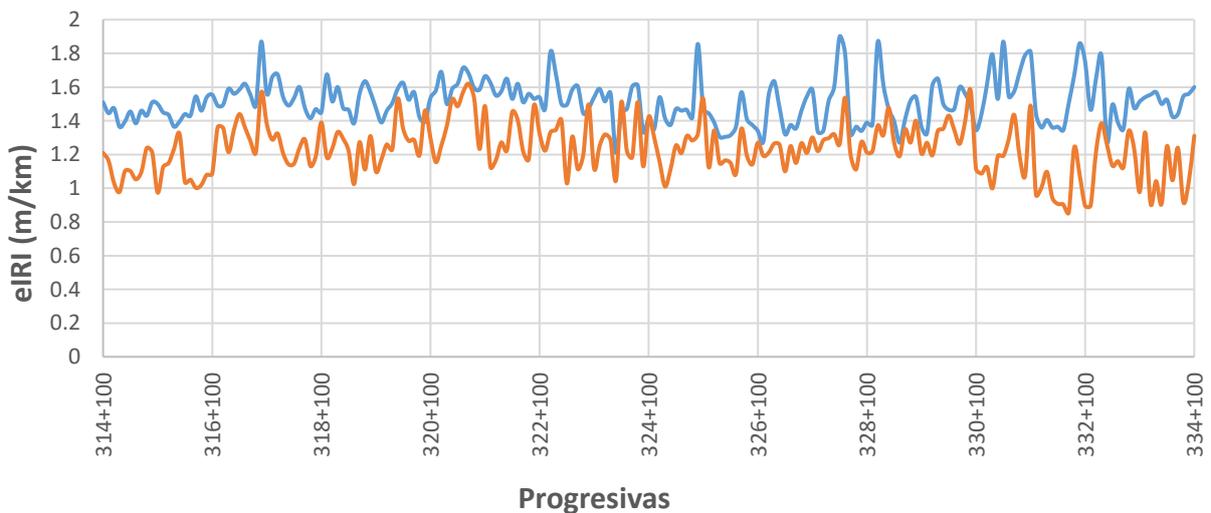


Figura 52. Sub tramo a analizar del gráfico eIRI vs IRI. Fuente (Propia)

Ahora, se presenta la gráfica del IRI calculado por Roadroid (cIRI) vs el IRI calculado por el perfilómetro láser.

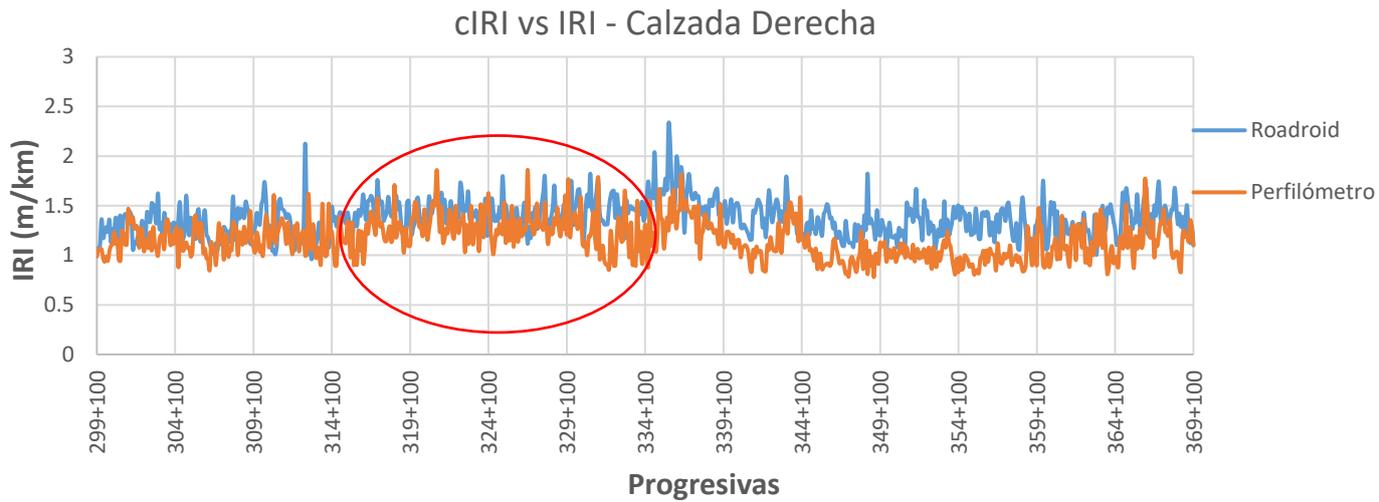


Figura 53. Selección de un sub tramo del gráfico cIRI vs IRI. Fuente (Propia)

El gráfico seleccionado es el siguiente:

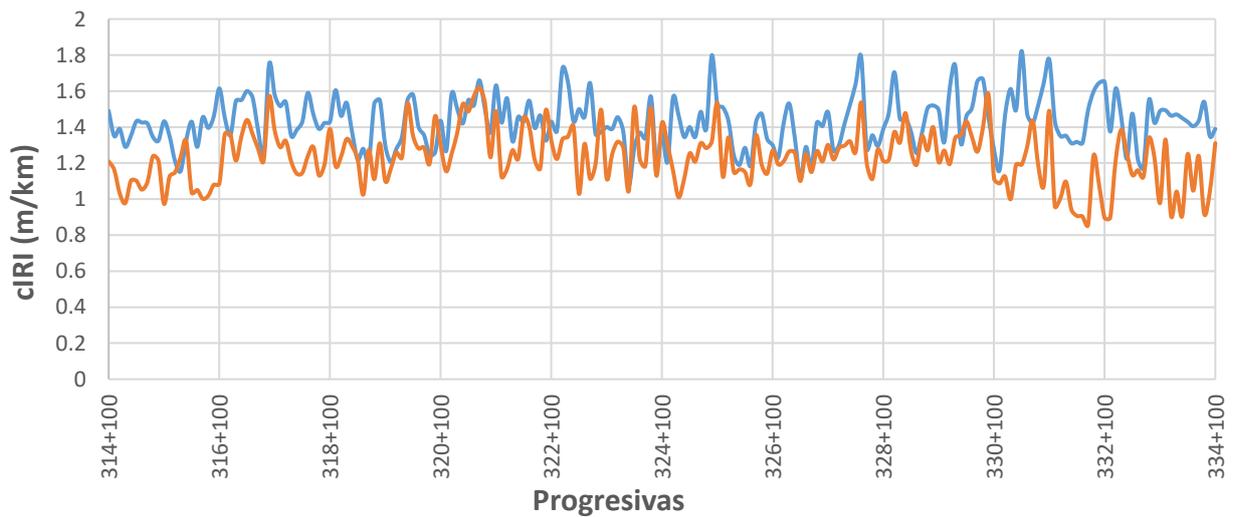


Figura 54. Sub tramo a analizar del gráfico cIRI vs IRI. Fuente (Propia)

5.5 Coeficiente de determinación de los datos calculados.

Debido a que ya se realizó la correlación para todos los datos de la carretera, y al no encontrar ninguna correlación; ahora, se hallará el coeficiente de determinación determinístico para los tramos seleccionados en el acápite 5.4.

Se procede a graficar la correlación lineal que presentan los valores de IRI calculado por la aplicación Roadroid y el perfilómetro láser.

En primer lugar se analizará los valores calculados de la calzada izquierda tanto como el IRI estimado (eIRI) y el IRI calculado (cIRI) de la aplicación Roadroid.

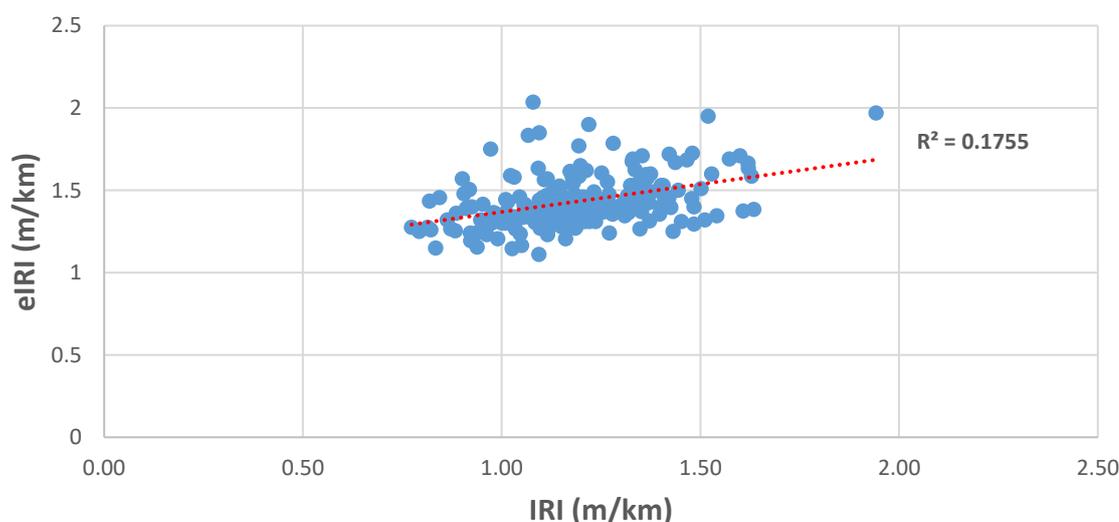


Figura 55. eIRI vs IRI. Fuente (Propia)

El R^2 salió 17.55%, mejoró con respecto al utilizar todos los valores calculados de la carretera; sin embargo, ese valor es muy bajo para verificar que existe algún tipo de correlación.

Este valor era de esperarse debido a que los IRI calculados difieren en algunos puntos en un 30% con los puntos del perfilómetro; es decir, si el equipo de clase uno calculaba un IRI de 1 m/km, el Roadroid calculaba un valor de 1.3 m/km. En varios segmentos calculados arroja un resultado similar. En otros intervalos los valores son muy parecidos y muy pocas veces el IRI es mayor que el eIRI.

Esto se debe a múltiples razones como los cambios de pendiente en la ruta, como ya se comprobó anteriormente, las oscilaciones de velocidad también influyen. El vehículo no se mantuvo constante todo el trayecto, oscilaba entre los 60 y 90 km/h. Además, las curvas verticales y horizontales provocaron un incremento de IRI.

Los demás cálculos de IRI calculado y estimado arrojan un valor similar al mostrado con respecto a la correlación.

Otra posible causa de la correlación débil de IRI entre los dos equipos es el inicio y fin de la toma de datos. En esta investigación, se guío por los hitos kilométricos, a partir del hito 299 se empezó la toma de datos. Los datos otorgados por la concesión de la Red Vial 4 no especificaron si utilizaron los hitos kilométricos como guía en la toma de datos. Al ser equipos de costo elevado y estar acompañados de tecnología avanzada, es posible que hayan tomado como referencia hitos topográficos para una mayor exactitud, ya que los hitos kilométricos están en un rango de más o menos diez metros desfasados de la progresiva real. Esta sospecha se incrementa al verificar que la progresiva del puente Las Culebras según los hitos kilométricos y los puntos calculados por el software Roadroid que utiliza el GPS del móvil, lo señala como la progresiva 312+420; sin embargo, en la página web de la concesionaria figura la progresiva 312+564 (OHL, 2016). Esta diferencia puede influir en el bajo valor de correlación entre ambos equipos de cálculo de IRI.

A partir de la anterior premisa, el GPS del móvil puede que no sea tan preciso y el margen de error de cálculo se eleve. Además, los amortiguadores del vehículo utilizado pueden influir en los cálculos. En esta investigación se utilizó una camioneta que es considerada de tipo grande y el factor de sensibilidad fue de 1.6 según la configuración del software Roadroid.

Para realizar una comparación de valores cuantitativos se mostrará un diagrama de barras de los valores eIRI, cIRI, IRI de cada calzada (izquierda y derecha).

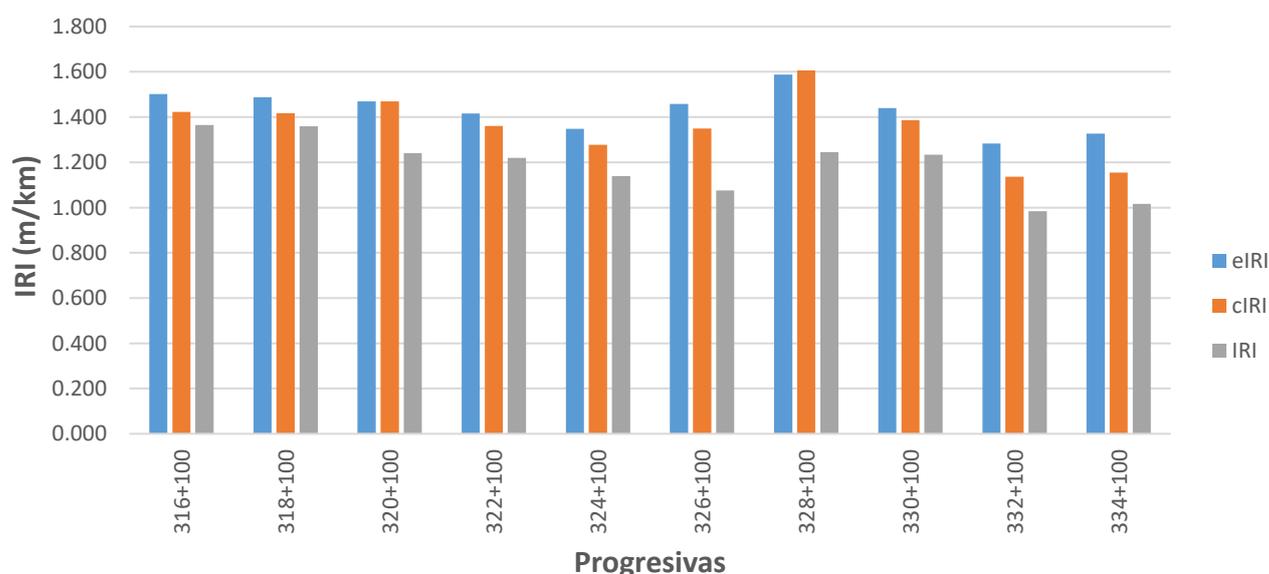


Figura 56. Gráfica de barra de IRI de la calzada izquierda. Fuente (Propia)

En la figura 53 se aprecia una cierta tendencia en los valores por cada grupo. El eIRI presenta un valor mayor que los demás y el IRI calculado por el perfilómetro es el que tiene un menor valor.

Los valores presentados eran de esperarse debido a que el perfilómetro es de clase uno y es preciso en sus cálculos, no toma la rugosidad de las dos huellas del vehículo, sino presenta deferentes láser y acelerómetros que dan un cálculo mucho más preciso de todo el carril; sin embargo, los IRI obtenidos por el Roadroid se asemejan. Las diferencias radican en lo ya explicado anteriormente, como es la influencia de la velocidad, las curvas verticales y horizontales, agentes externos al pavimento, amortiguadores de la camioneta, la sensibilidad de la aplicación, el posible desfase en la toma de datos, y el tiempo de la recopilación de datos en campo. Este último puede influenciar, ya que los datos calculados por el perfilómetro se obtuvieron en noviembre del 2014 y los datos obtenidos por el software Roadroid un año después. Esta podría ser otra probable razón del leve incremento del IRI calculado y estimado.

Tabla 05. Valores de IRI en el tramo analizado – calzada izquierda.

Fuente (Propia)

Progresivas	eIRI	cIRI	IRI
316+100	1.502	1.423	1.365
318+100	1.488	1.417	1.359
320+100	1.469	1.470	1.241
322+100	1.416	1.360	1.220
324+100	1.348	1.277	1.139
326+100	1.458	1.350	1.076
328+100	1.588	1.607	1.245
330+100	1.440	1.386	1.233
332+100	1.283	1.137	0.983
334+100	1.327	1.155	1.016

Como se puede apreciar en la tabla 05, los valores oscilan entre 1.016 m/km al 1.607 m/km. Estas diferencias de valores de IRI en cada progresiva no son significativas, ya que un IRI menor a 2 m/km indica que la carretera está en óptimas condiciones.

Por otro lado, se presenta el diagrama de barras de la calzada derecha.

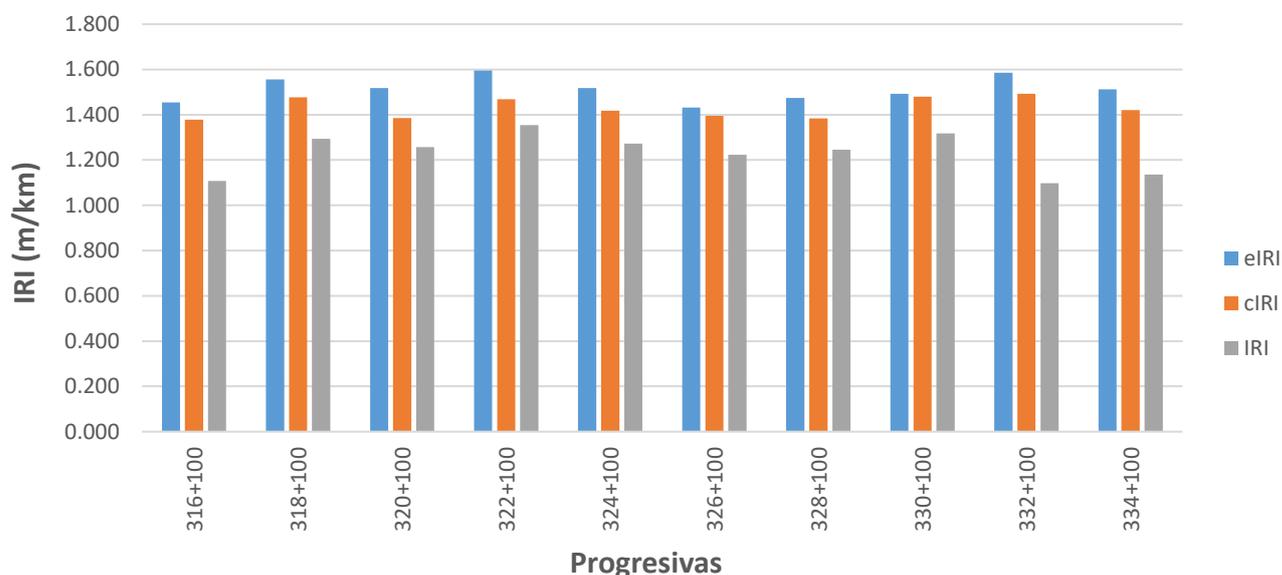


Figura 57. Gráfica de barra de IRI de la calzada derecha. Fuente (Propia)

De la figura 54 se verifica que los grupos de IRI están ordenados de forma descendente. Teóricamente deberían salir en ese orden, ya que el cIRI (IRI calculado) debe ser menor al eIRI debido a que es una corrección del eIRI (IRI estimado). Los IRI del perfilómetro, como se esperaba son de un valor menor que el cIRI.

Para esta calzada, la adecuada recolección de datos se debe, principalmente, al poco tránsito de vehículos pesados en comparación con la calzada izquierda que obligaban a variar repetidas veces la velocidad del vehículo.

A continuación se mostrará los valores del eIRI, cIRI e IRI.

Tabla 06. Valores del IRI en el tramo analizado – calzada derecha.

Fuente (Propia)

Progresivas	eIRI	cIRI	IRI
316+100	1.455	1.378	1.108
318+100	1.556	1.477	1.294
320+100	1.519	1.386	1.258
322+100	1.596	1.468	1.355
324+100	1.518	1.418	1.272
326+100	1.432	1.395	1.223
328+100	1.475	1.384	1.246
330+100	1.492	1.480	1.318
332+100	1.586	1.493	1.098
334+100	1.513	1.421	1.136

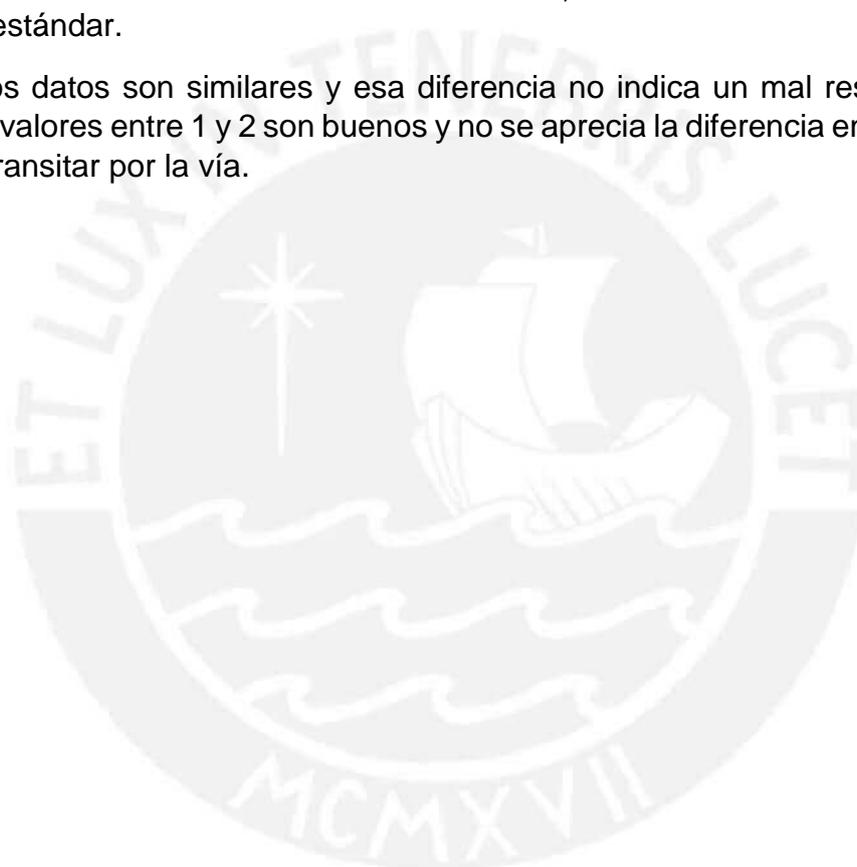
Se halló el IRI promedio del tramo seleccionado; es decir, de las progresivas 314+100 al 334+100.

Tabla 07. Valores promedio de IRI en el tramo seleccionado. Fuente (Propia)

IRI (m/km)	Calzada izquierda	Calzada derecha
eIRI	1.43	1.51
cIRI	1.36	1.43
IRI	1.19	1.23

El eIRI de la calzada izquierda es 20.16% mayor que el IRI calculado por el perfilómetro láser. Para la calzada derecha, el eIRI es 22.76% mayor que el IRI estándar.

Estos datos son similares y esa diferencia no indica un mal resultado dado que valores entre 1 y 2 son buenos y no se aprecia la diferencia en el momento de transitar por la vía.



5.6 Determinación de tramos homogéneos

Se procederá a realizar un comparativo entre los dos tipos de valores de IRI calculado por el software Roadroid, el IRI estimado y el IRI calculado. Para tal fin se identificará los tramos homogéneos señalados en la AASHTO 1993.

Para determinar los tramos homogéneos en la vía analizada se utilizará el método de las diferencias acumuladas, proceso establecido en la Guía de Diseño de Pavimentos AASTHO 1993, la cual permite delimitar estadísticamente tramos homogéneos utilizando las mediciones del IRI.

El principio básico parte en definir la variable Z_x , que es la diferencia entre el área bajo la curva de respuesta a cualquier distancia y el área total desarrollada por la respuesta promedio de todo el proyecto hasta la misma distancia, y graficar como función de la distancia a lo largo de la vía analizada. Los límites de los tramos homogéneos ocurren en los puntos donde la pendiente de la línea que representa la variación de Z_x con la longitud, cambia de signo.

Se procede a colocar los datos generales del eIRI de medición de la carretera. En este caso se utilizó los eIRI de la calzada izquierda.

Tabla 08. Datos generales para la determinación de tramos homogéneos.

Fuente (Barrantes, 2008)

Datos Generales	Valor
Datos a utilizar	IRI
Distancia entre cada medición	100 metros
Longitud total del tramo estudiado	70100 metros
Número de datos	701 datos

En la primera columna se coloca las distancias de cada punto, que para este caso sería de 100 metros. En la segunda columna se escribe el IRI para cada distancia definida.

Tabla 09. Datos de estaciones y valores de IRI. Fuente (Barrantes, 2008)

Estación	Respuesta
Distancias	eIRI
0	1.160
100	1.225
100	1.165
....	...
100	1.370

Para la tercera y cuarta columna se escribe el número de dato correspondiente y la distancia de cada medición realizada respectivamente. La medición en este estudio es constante.

Tabla 10. Datos de y estacionamiento, identificadores valores de respuesta.

Fuente (Barrantes, 2008)

Estación Distancia	Respuesta IRI	Número de intervalo	Distancia intervalo
0	1.160	1	100
100	1.225	2	100
100	1.165	3	100
100	1.195	4	100
...
100	1.370	710	100

Luego, se procedió a calcular la distancia acumulada como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Distancias acumuladas. Fuente (Barrantes, 2008)

Distancia intervalo	Intervalo de distancia acumulada
100	100=100
100	100+100=200
100	100+100+100=300
100	100+100+100+100=400
...	...
100	100+100+...+100=70100

Una vez obtenido las distancias acumuladas, se procede a calcular el promedio del eIRI de cada intervalo (i-1, i) $\bar{r}_1 = r_1 \rightarrow r_1 = 1.1$; $\bar{r}_2 = (r_1+r_2)/2$.

Tabla 12. Promedio de IRI (i-1, i). Fuente (Barrantes, 2008)

Respuesta IRI	Promedio de intervalo
1.160	1.160
1.225	1.1925
1.165	1.195
...	...
1.370	1.335

Se procede a calcular el área bajo la curva. Se calcula multiplicando el promedio del intervalo del IRI por la distancia.

Tabla 13. Cálculo del área bajo la curva. Fuente (Barrantes, 2008)

Distancia intervalo	Promedio de intervalo	Área bajo la curva
100	1.160	=100*1.16=160
100	1.1925	=100*1.1925=119.25
100	1.195	=100*1.195=119.5
...
100	1.335	=100*1.335=133.5

Con el área bajo la curva calculada se halla el área acumulada como se presenta en la tabla 10.

Tabla 14. Cálculo de área acumulada. Fuente (Barrantes, 2008)

Área bajo la curva	Área acumulada
116	=0+116=116
119.25	=110+119.25=235.25
119.5	=110+116.25+119.5=354.75
...	...
133.5	=110+119.25+119.5+...+133.5=106189

Al culminar de realizar los cálculos mostrados en las tablas anteriores se halla el valor promedio ponderado del IRI. Este se calcula dividiendo la suma total del área acumulada entre el intervalo de distancias acumuladas.

$$F^*=106189/70100 \rightarrow F^*=1.5148$$

Para hallar Zx se resta el área acumulada con la multiplicación del promedio ponderado del IRI y la distancia del intervalo acumulado ($Zx = \text{área acumulada} - F^* \cdot \text{Intervalo distancia acumulada}$).

Tabla 15. Valores de Zx. Fuente (Barrantes, 2008)

Área acumulada	Intervalo distancia acumulada	Zx
116	100	116-F*.100=-35.48
235.25	200	235.25-F*.200=-67.71
354.75	300	354.75-F*.300=-99.70
...
106189	70100	106189-F*.70100=0

Con los datos obtenidos se procede a graficar en Excel y se obtiene el siguiente gráfico.

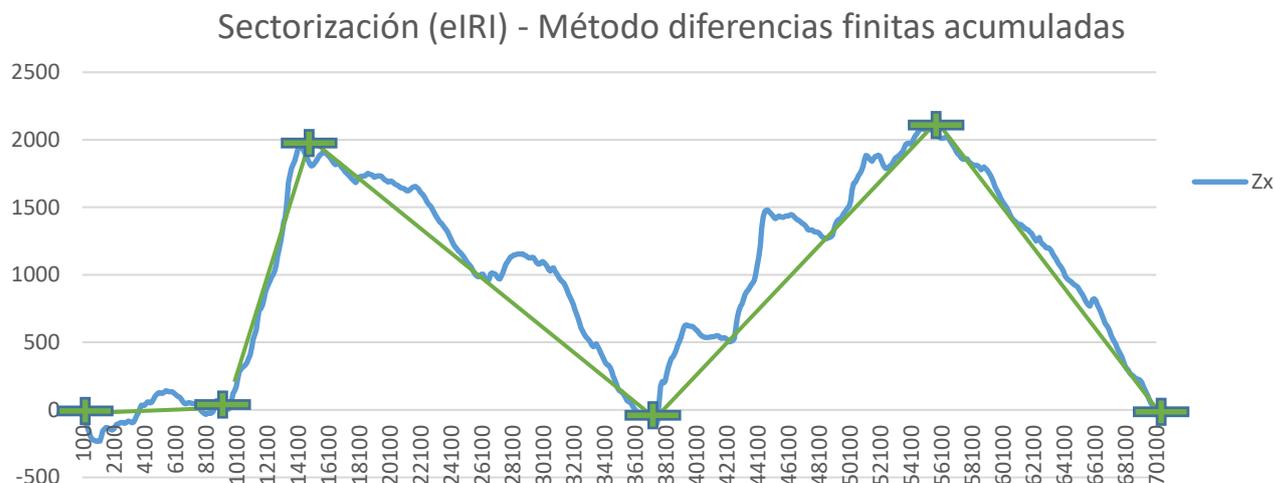


Figura 58. Sectorización - Método de diferencias finitas acumuladas.

Fuente (Propia)

Una vez obtenidos estos valores, se procede a enumerar el rango de las progresivas calculadas de cada tramo homogéneo.

Tabla 16. Progresivas de tramos homogéneos. Fuente (Barrantes, 2008)

Tramos homogéneos	Distancias (m)	Progresivas
1	0 - 9700	299+000 - 308+700
2	9700 - 14600	308+700 - 313+600
3	14600 - 37600	313+600 - 336+600
4	37600 - 55600	336+600 - 354+600
5	55600 - 70100	354+600 - 369+100

El tramo 1 comprende las progresivas 299+000 al 308+700, por lo que se procederá a realizar una regresión lineal para hallar el coeficiente determinístico y verificar la relación entre cada IRI.

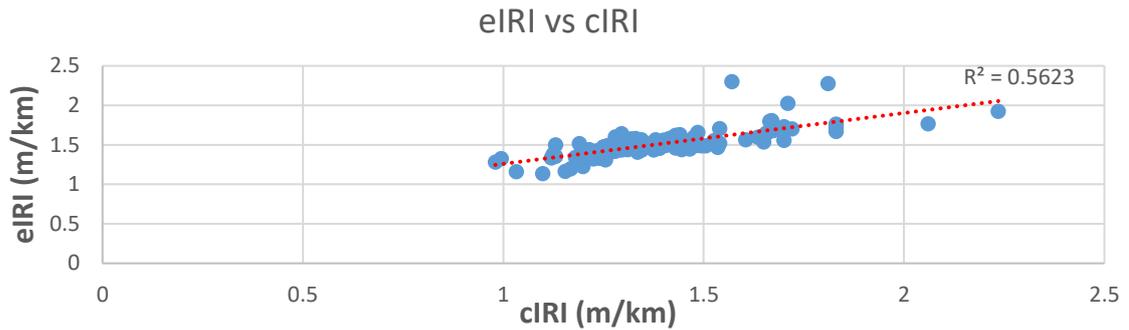


Figura 59. eIRI vs cIRI – Tramo 1.

Fuente (Propia)

El coeficiente determinístico para el primer tramo homogéneo es de 56.23%. Para una correlación adecuada debería ser como mínimo 80%, como lo indica en ingeniero Forslöf, CEO de Roadroid. Después, se analizará otros factores para realizar un filtro respectivo y analizar la correlación lineal.

El segundo tramo homogéneo abarca las progresivas 308+700 al 313+600. Se presentará el gráfico eIRI vs cIRI.

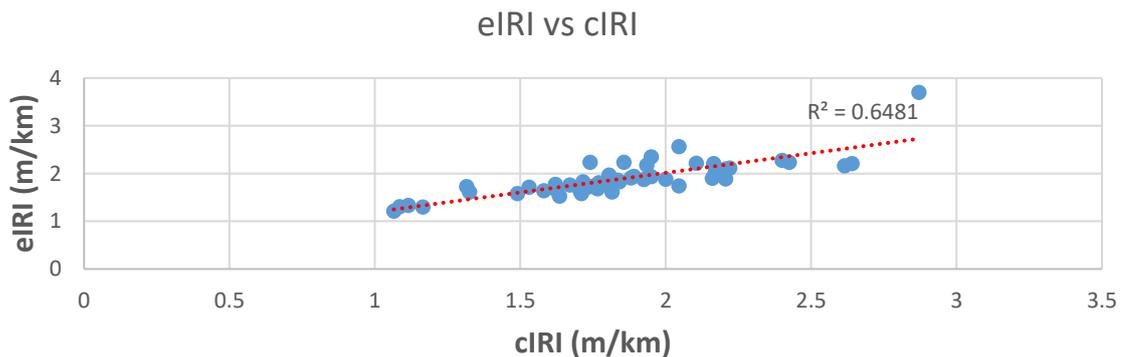


Figura 60. eIRI vs cIRI – Tramo 2. Fuente (Propia)

El R^2 del tramo 2 mejoró con respecto al tramo 1, su valor es de 64.81%, aunque no es un valor óptimo para una correlación lineal.

El tramo 3 comprende las progresivas 313+600 al 336+600. Se presentará la gráfica eIRI vs cIRI para calcular el coeficiente determinístico.

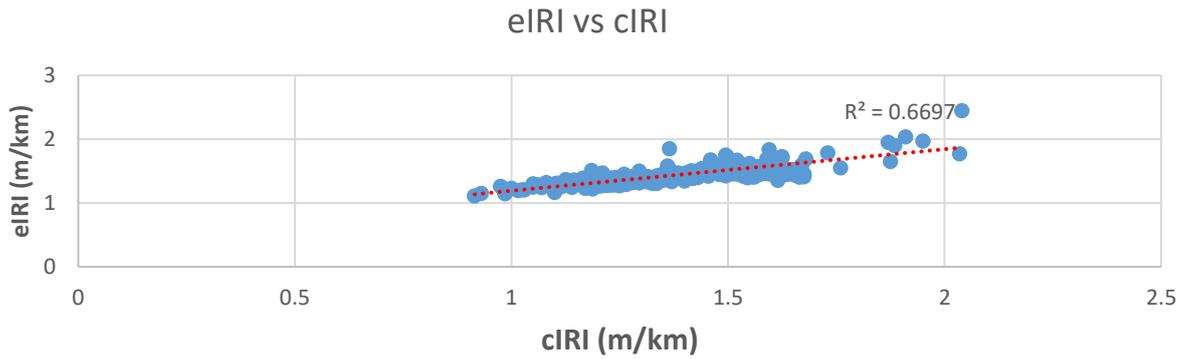


Figura 61. eIRI vs cIRI – Tramo 3. Fuente (Propia)

El coeficiente determinístico en el tramo 3 es 66.97%. Esto refleja que presenta una correlación lineal regular.

El cuarto tramo homogéneo está entre las progresivas 336+600 al 354+600.

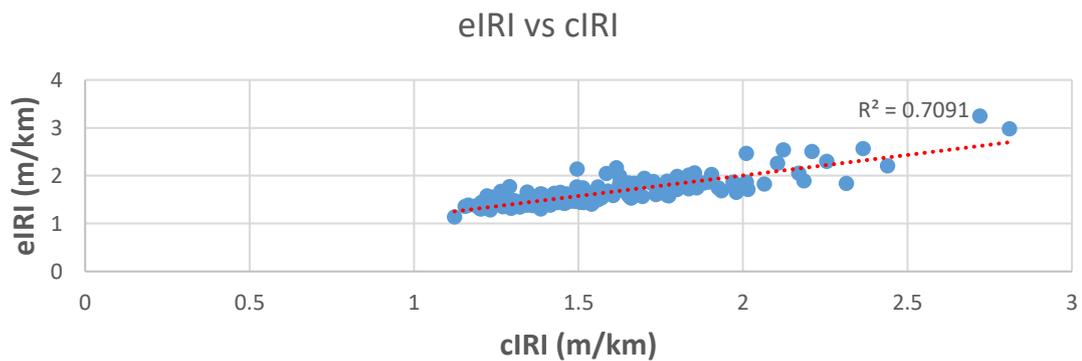


Figura 62. eIRI vs cIRI – Tramo 4. Fuente (Propia)

La figura 59 muestra el R^2 del tramo 4, cuyo valor es 70.91%. Este coeficiente determinístico está muy cerca al óptimo

El tramo 5 comprende las progresivas 354+600 al 369+100. A continuación se muestra el gráfico eIRI vs cIRI.

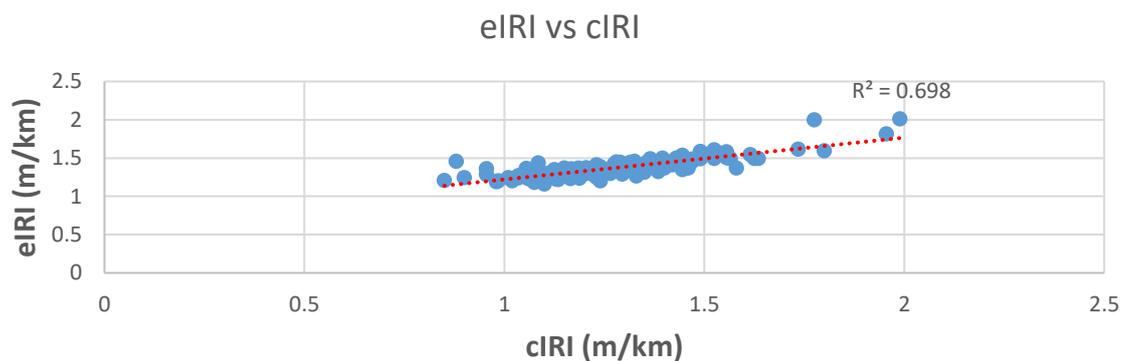


Figura 63. eIRI vs cIRI. Fuente (Propia)

El coeficiente determinístico es 69.8%. Este tramo presenta una correlación regular.

A continuación se presentará un resumen de los R^2 hallados en cada tramo homogéneo.

Tabla 17. Coeficientes determinísticos de tramos homogéneos.

Fuente (Propia)

Tramos	R^2 (%)
Tramo 1	56.23
Tramo 2	64.81
Tramo 3	66.97
Tramo 4	70.91
Tramo 5	69.80

Los coeficientes determinísticos de los tramos homogéneos evidencian que hay una cierta correlación entre los valores de IRI estimado y calculado. En líneas generales están en una correlación lineal de regular a buena.

5.7 Análisis de velocidad

Las velocidades en la toma de datos durante los trabajos en campo fueron variables por diversos factores como tráfico, curvas pronunciadas tanto verticales como horizontales, personal realizando mantenimiento rutinario, peaje, vibradores, gibas, etc.

Se verificará la relación que presenta la velocidad con las correlaciones entre el IRI estimado y el IRI calculado; es decir, a partir de qué velocidad ambos IRI coinciden y el coeficiente determinístico aumenta.

Se usarán los tramos homogéneos calculados anteriormente para comprobar la utilidad de la velocidad en las correlaciones lineales.

5.7.1 Tramo homogéneo 1

Con las progresivas ya conocidas del tramo 1 se grafica en Excel IRI vs Velocidad. Este gráfico ayudará a identificar la velocidad en la que la mayoría de valores de eIRI y cIRI coinciden.

Los datos obtenidos por el Roadroid se ordenan en columnas, al igual que sus respectivas progresivas y velocidades de cada punto. Una vez ordenado todos los datos a utilizar se ordena las velocidades de menor a mayor. Luego, se grafica los valores de cada IRI estimado y calculado versus las velocidades.

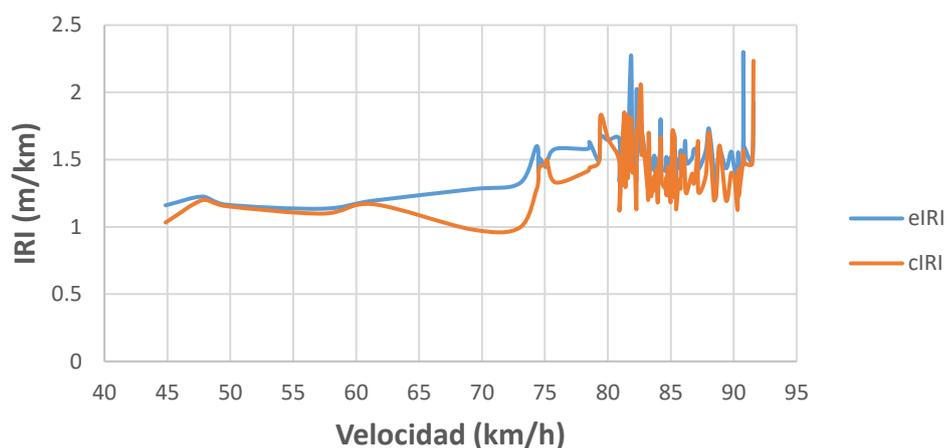


Figura 64. IRI vs velocidad – Tramo 1. Fuente (Propia)

Como se verifica en la figura 64, el eIRI y cIRI se asemejan a partir de la velocidad de 80.905 km/h. Es decir, que los datos de IRI entre las progresivas 299+100 al 308+700 se correlacionan a partir de la velocidad hallada. Para

determinar dicha velocidad solo se analiza el gráfico y se halla el punto en la cual los valores están muy cercanos.

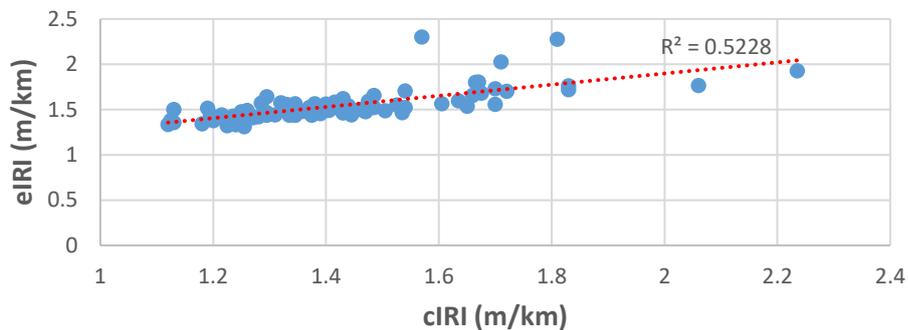


Figura 65. eIRI vs cIRI – T1 utilizando velocidad de correlación.
Fuente (Propia)

El R^2 hallado es 52.28%, y es menor que el hallado en el acápite 5.6 (56.23%) sin utilizar como punto de partida la velocidad de correlación. Es decir, para este tramo homogéneo la velocidad no influyó en el incremento de R^2 .

Se analizará la influencia de los *outliers*, valores excepcionalmente diferente a los demás, producido por diferentes factores como parches, curvas verticales y horizontales, etc. Estos valores incrementan el valor del IRI alejándolo del valor real, por eso, es importante filtrar estos valores.

Luego de realizar los filtros de valores de IRI, se comparará el coeficiente determinístico de los IRI de un gráfico que utiliza como punto de partida la velocidad de correlación contra otro que no parte con alguna velocidad.

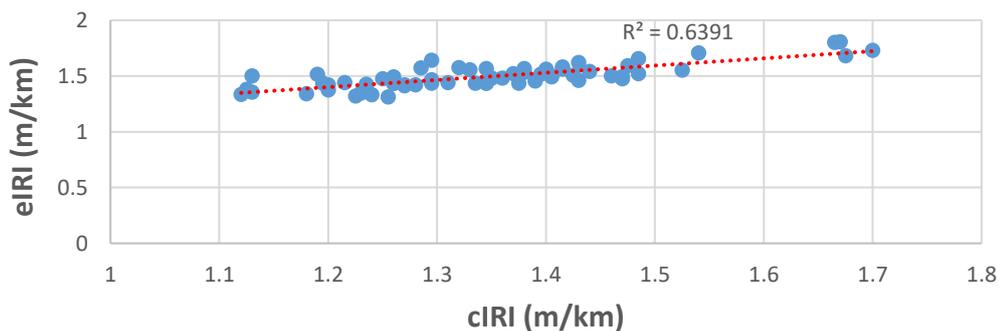


Figura 66. eIRI vs cIRI (filtrada) T1 utilizando velocidad de correlación.
Fuente (Propia)

Se eliminó los *outliers* y se obtuvo un coeficiente determinístico de 63.91%, mayor que el 56.23% calculado sin partir de una velocidad de correlación, para este tramo fue de 80.905 km/h. Los valores de eIRI y cIRI cuya velocidad es mayor o igual que 80.905 km/h fueron analizados y el resultado es la figura 66.

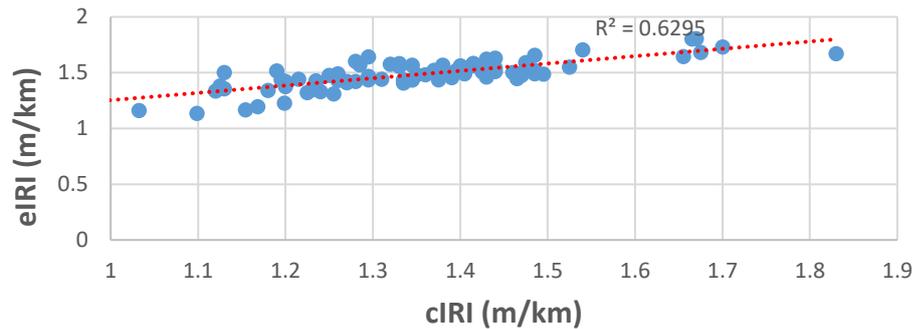


Figura 67. eIRI vs cIRI (filtrada) T2 sin utilizar velocidad. Fuente (Propia)

Se eliminó los *outliers* y se realizó una correlación lineal entre ambos IRI, el resultado fue de un R^2 igual al 62.95%

Finalmente, si se utiliza una velocidad como punto de partida de los IRI estimado y calculado; y se elimina los *outliers*, o puntos picos, el coeficiente determinístico es mayor 63.91% > 62.95%. Entonces, la velocidad de la toma de datos si influenció en la correlación de datos en el tramo homogéneo 1.

5.7.2 Tramo homogéneo 2

El tramo homogéneo 2 comprende las progresivas 308+700 al 313+600. El coeficiente determinístico calculado anteriormente fue de 64.81%. A continuación se presentará el gráfico de cada IRI (estimado y calculado) versus la velocidad obtenida en cada punto.

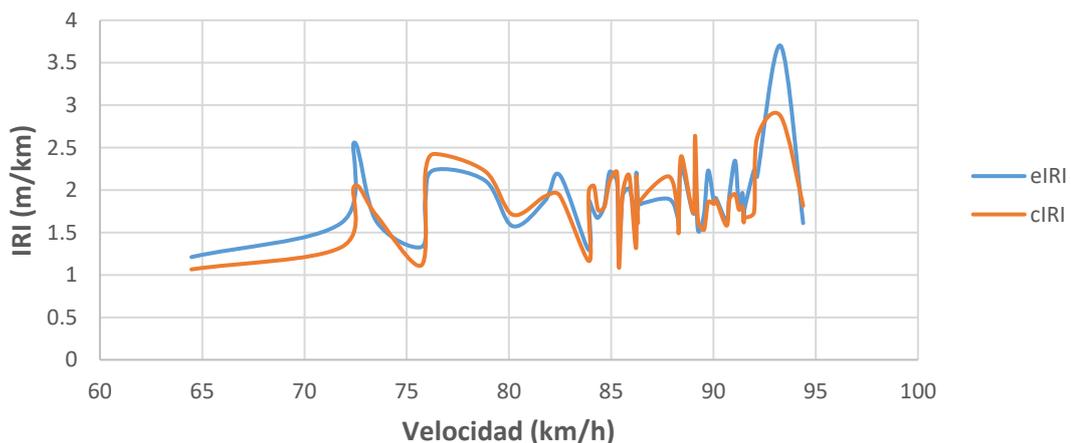


Figura 68. IRI vs velocidad – Tramo 2. Fuente (Propia)

De la figura 65 se obtiene la velocidad de correlación, cuyo valor es de 84.93 km/h. A partir de ese valor de velocidad los IRI tienden a presentar una menor diferencia en valores absolutos.

Una vez ordenado cada eIRI, cIRI con su respectiva velocidad, se eliminan los valores de IRI cuya velocidad sea menor a 84.93 km/h. Luego, se realiza un gráfico eIRI vs cIRI y se obtiene lo siguiente:

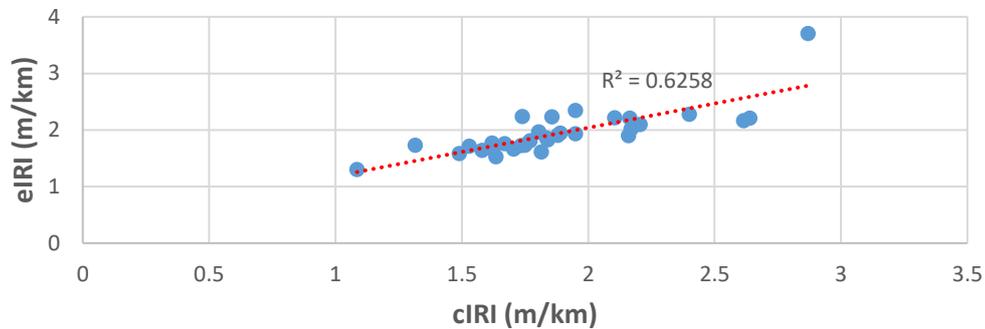


Figura 69. eIRI vs cIRI–T2 utilizando velocidad de correlación. Fuente (Propia)

El resultado del R^2 fue de 62.58%, el cual es menor que el 64.81%. Por consiguiente, se procede a filtrar los valores de IRI que tengan una diferencia significativa del resto.

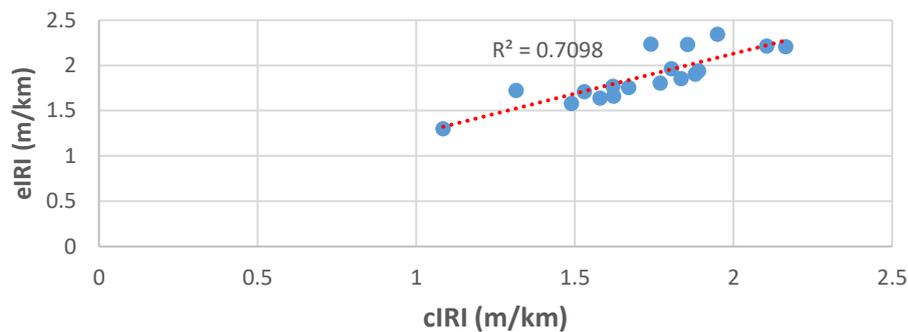


Figura 70. eIRI vs cIRI (filtrada) T2 utilizando velocidad de correlación. Fuente (Propia)

Al eliminar los valores de IRI que se diferencian notoriamente del resto, el coeficiente determinístico es 70.98%, por lo que los IRI estimado y calculado tienden a correlacionarse.

Por otro lado, se analiza los IRI sin tener en cuenta la velocidad en la cual los IRI tienen de juntarse. El resultado fue el siguiente:

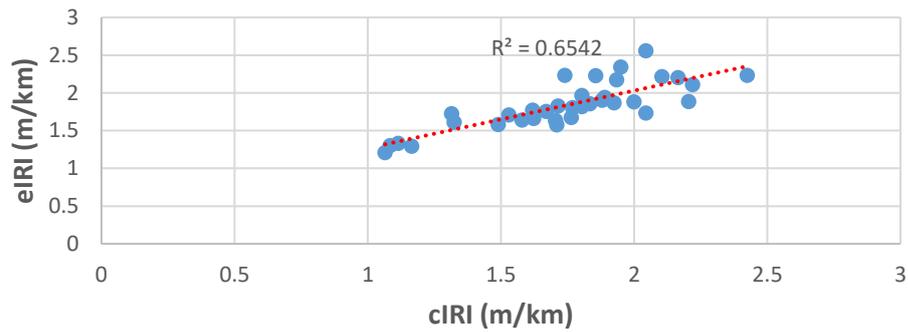


Figura 71. eIRI vs cIRI (filtrada) T2 sin utilizar velocidad. Fuente (Propia)

El R^2 del eIRI vs cIRI sin utilizar como punto de partida para la correlación la velocidad se obtuvo un valor de 65.42%.

Por consiguiente, para este tramo homogéneo, realizar un análisis definiendo la velocidad en que los valores de IRI se juntan presenta una ventaja de correlación al filtrar los IRI producto de un excesos de cálculo como en este caso fue el paso por el puente Culebras, el IRI estimado fue de 3.7 m/km y el calculado fue de 2.87 m/km. Sin embargo, ese incremento de IRI no se considera debido a que no refleja el verdadero índice de rugosidad de la carretera. AL igual que otras elevaciones de IRI por diferentes factores ya descritas anteriormente.

5.7.3 Tramo homogéneo 3

El tramo 3 abarca las progresivas 313+600 al 336+600. Se halla la velocidad en la que lo valores de IRI coinciden. Se obtiene lo siguiente:

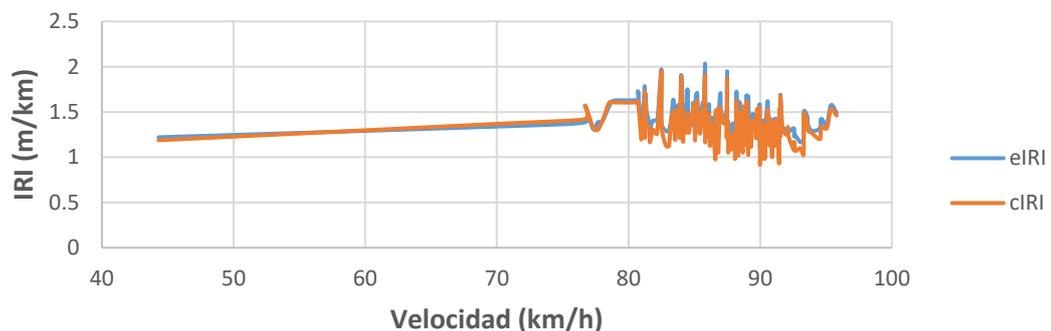


Figura 72. IRI vs velocidad – Tramo 3. Fuente (Propia)

La velocidad inicial en la que los valores de IRI se aglomeran es de 80.715 km/h. Se analizará la correlación del IRI estimado y calculado a partir de la velocidad inicial hallada en la figura 69.

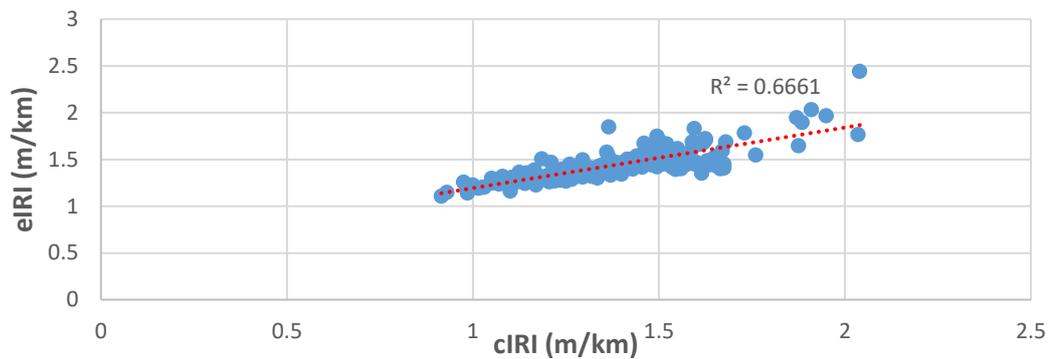


Figura 73. eIRI vs cIRI–T3 utilizando velocidad de correlación. Fuente (Propia)

El coeficiente determinístico es 66.61%, lo que indica una correlación regular. En el acápite 5.6 se halló el R^2 sin considerar la velocidad de los datos calculados y el valor es de 66.97%. Ambos valores son similares; sin embargo, se esperaba con la correlación usando la velocidad de inicio el R^2 iba a ser mayor. Entonces, se procederá a filtrar los valores de IRI para verificar la correlación lineal.

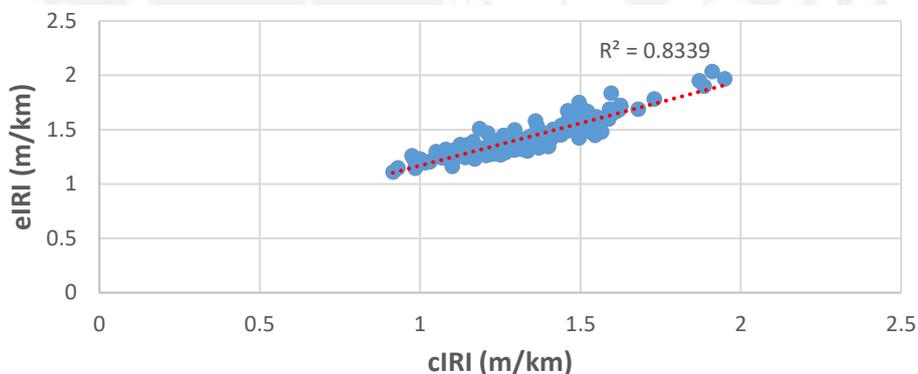


Figura 74. eIRI vs cIRI (filtrada) T3 utilizando velocidad de correlación. Fuente (Propia)

Al filtrar los valores de IRI que reflejaban un exceso en comparación a los demás valores de IRI se obtiene un coeficiente apropiado de 83.39%. Con este R^2 se afirma que en el tramo 3 los índices de rugosidad estimado y calculado se correlacionan linealmente.

Por otro lado, se analiza la correlación para los datos en la que no se tomó en cuenta la velocidad, solo se filtró algunos valores del IRI. El resultado fue el siguiente:

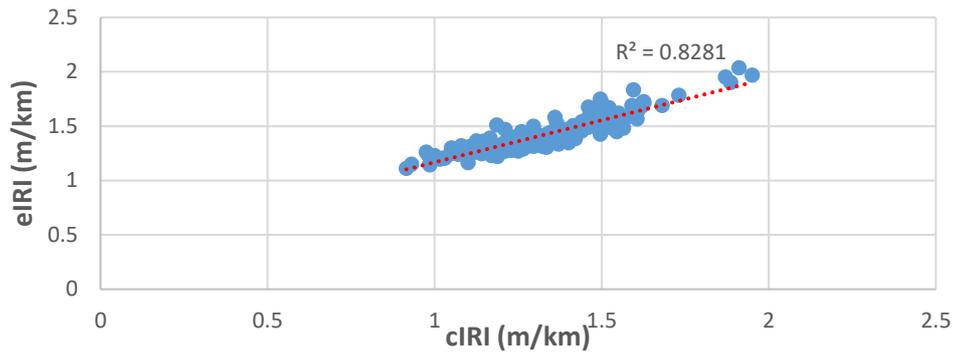


Figura 75. eIRI vs cIRI (filtrada) T3 sin utilizar velocidad. Fuente (Propia)

En este caso el R^2 es 82.81%, lo cual indica que también presenta una correlación lineal entre los valores del IRI.

Sin embargo, al utilizar la velocidad en la que los IRI empiezan a acumularse en el gráfico, presenta una correlación ligeramente mayor. Entonces, se afirma que para el tramo homogéneo 3 la velocidad influye en el correlación lineal entre los índice de rugosidad.

5.7.4 Tramo homogéneo 4

Aquí pertenecen las progresivas 336+600 al 354+600. Se busca hallar una correlación lineal a partir de una velocidad inicial en la cual los valores de IRI se acumulen en el gráfico.

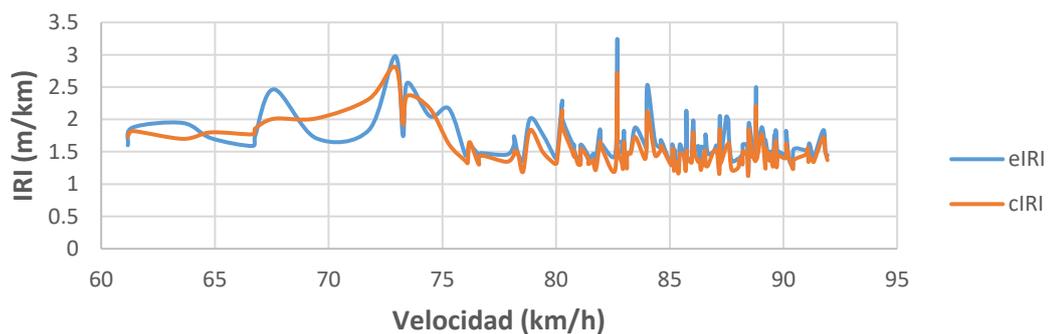


Figura 76. IRI vs velocidad – Tramo 4. Fuente (Propia)

La velocidad inicial en la que los IRI son similares es 76.2 km/h. Con este dato se graficará el eIRI vs cIRI.

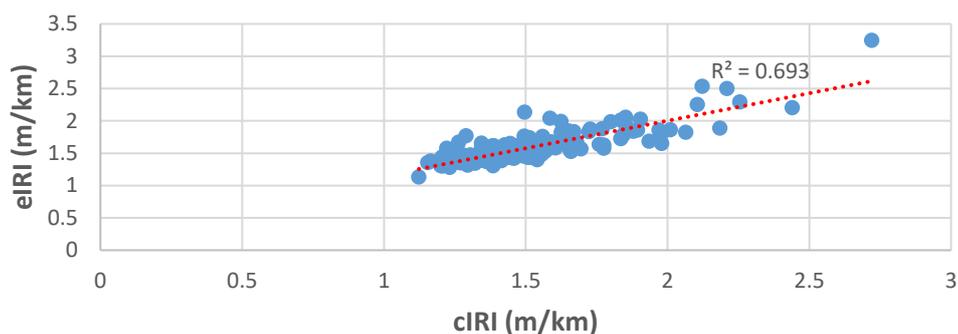


Figura 77. eIRI vs cIRI–T4 utilizando velocidad de correlación. Fuente (Propia)

El R^2 es igual a 69.3%, la cual indica que la correlación aumentó. Al hacer la comparación con el valor hallado sin usar como dato la velocidad se tuvo un coeficiente determinístico de 70.91%. Entonces, se realizará un filtro para comprobar la influencia de la toma de datos de velocidad en la correlación lineal.

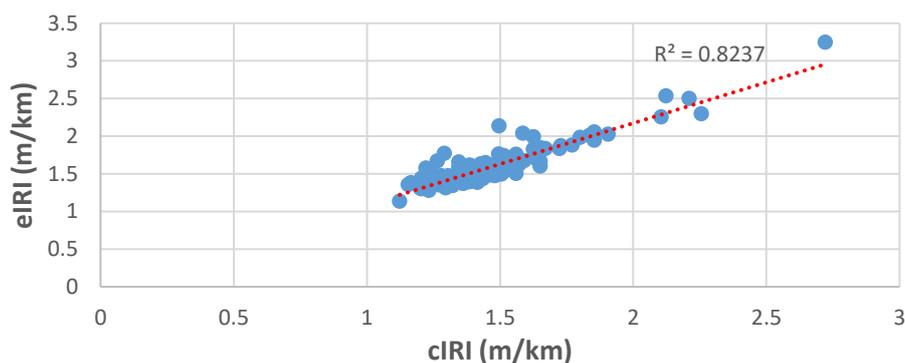


Figura 78. eIRI vs cIRI (filtrada) T4 utilizando velocidad de correlación. Fuente (Propia)

Al filtrar los valores del IRI, se excluyeron los *outliers* y se obtuvo un coeficiente determinístico de 82.37% la cual afirma la correlación lineal entre ambos IRI, estimado y calculado.

Por otro lado, al no trabajar con la velocidad de correlación se obtuvo lo siguiente:

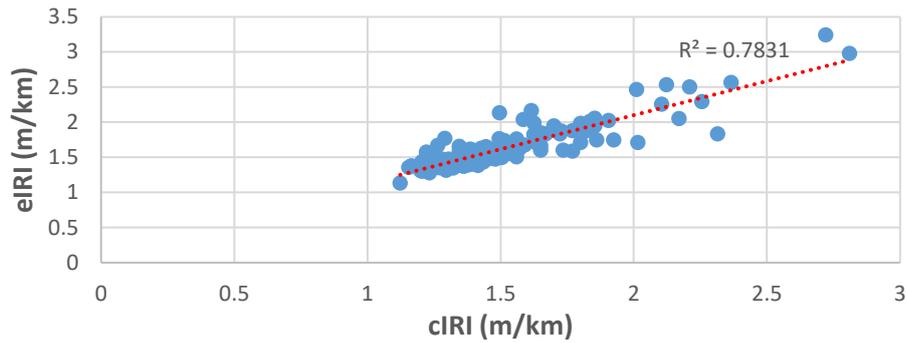


Figura 79. eIRI vs cIRI (filtrada) T4 sin utilizar velocidad.

Fuente (Propia)

El coeficiente determinístico salió 78.31%, pero es menor que el 82.37%. Por lo tanto, la influencia de tomar como punto de partida la velocidad en la correlación de datos influye en aumentar el R^2 .

5.7.5 Tramo homogéneo 5

El último tramo comprende las progresivas 354+600 al 369+100. Se hallará la velocidad inicial en la que los IRI presentan similitud.

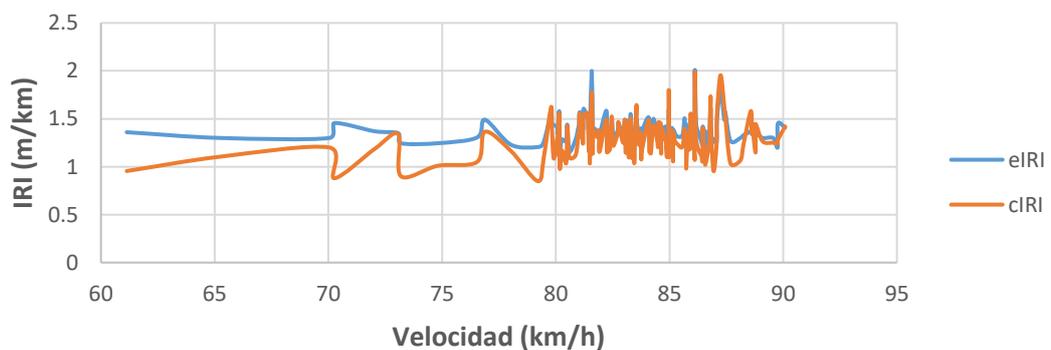


Figura 80. IRI vs velocidad – Tramo 5.

Fuente (Propia)

La velocidad en la cual los IRI se asemejan es de 81.205 km/h. Se procederá a realizar el gráfico eIRI vs IRI, tomando como punto de partida la velocidad hallada en la figura 77.

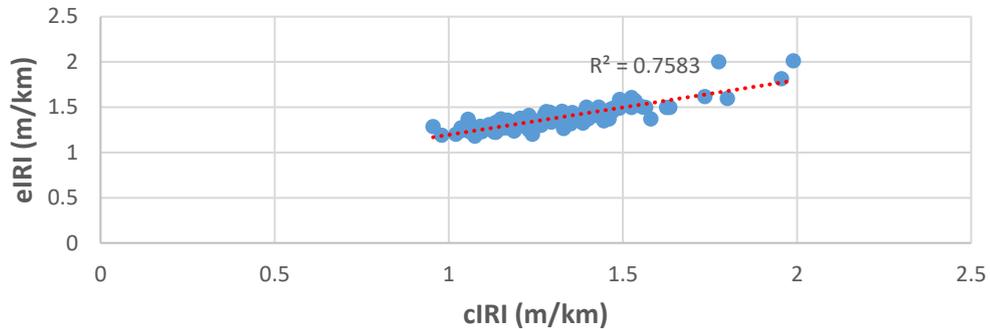


Figura 81. eIRI vs cIRI–T5 utilizando velocidad de correlación.

Fuente (Propia)

Utilizando la velocidad de correlación de 81.205 km/h, se obtuvo un R^2 de 75.83%, el cual es mayor que el valor calculado sin tomar en cuenta la velocidad que fue de 69.80%. En este caso en particular, no hay necesidad de filtrar los *outliers* ya que 75.83% es considerado una buena correlación; empero, si se requiere un R^2 mayor se procede a realizar el filtrado de los valores de IRI.

Capítulo 6. Conclusiones

Los trabajos en campo demostraron que la autopista del tramo 3 de la Red Vial 4 está en óptimas condiciones y se demostró con lo calculado utilizando el software Roadroid.

El índice de rugosidad internacional de la autopista presenta un eIRI de 1.51 m/km y un cIRI de 1.2m/km en la calzada izquierda (carril 1 y 3). Como se demostró en el capítulo de resultados, el cIRI es menor que el IRI estimado debido a que aplica un factor de corrección hallado por la empresa en sus múltiples estudios. Para la calzada derecha el IRI estimado es de 1.43 m/km y el IRI calculado es de 1.36 m/km.

Al comparar con los resultados calculados por subcontratistas de la concesionaria que utilizaron un perfilómetro láser de clase uno, para la calzada izquierda obtuvieron un valor de 1.11 m/km y para la calzada derecha un valor de 1.16 m/km. Esto refleja que ambas calzadas son similares en lo que respecta a la rugosidad.

Para la presentación de algún informe con respecto a la vía se presenta el IRI calculado (cIRI), ya que es más exacto y clasifica como método de medición de clase dos. El valor del cIRI con respecto al IRI del perfilómetro excede en 8.1% al IRI calculado por el perfilómetro en la calzada izquierda, y para la calzada derecha el exceso es de 17.24%. La diferencia no es considerable cuando se analiza una autopista cuyo IRI como máximo es de 2m/km como es el caso del contrato de la Red Vial 4.

La correlación lineal del Roadroid con el perfilómetro no fue apropiada debido a diferentes razones, entre las más importantes es el inicio y fin de la toma de datos. En esta investigación se utilizó solamente los hitos kilométricos como referencia en el punto de partida que fue en el hito 299 con dirección de norte a sur. Como se explicó en el capítulo 4, el software utiliza el GPS del móvil. Este puede ser impreciso al igual que los hitos kilométricos. Cuando se realiza el análisis de comparación se observó por medio de los datos calculados por la aplicación que el Puente Culebras se ubica en la progresiva 312+420; sin embargo, en la página web de la Concesionaria registra que el Puente está ubicado en la progresiva 312+564. Hay una diferencia de más de 100 metros lineales y los puntos calculados de IRI fueron cada 100 metros. Esto influyó en los cálculos y consecuentemente en la correlación lineal.

Otro aspecto importante que se comprobó es la tendencia de aumentar el IRI en curvas horizontales y verticales. Si bien no se observa valores picos, en la gráfica se observan valores oscilantes; es decir, valores que suben y en los puntos adyacentes disminuyen. Esto genera diferencias entre los dos tipos de IRI que calcula el software. Sin embargo, cuando la carretera presenta un pendiente casi constante, como se aprecia en el perfil mostrado en el acápite 5.3 los valores de IRI no oscilan como en los otros segmentos de la vía.

La velocidad en la toma de datos influye en la correlación. Como se comprobó, a velocidades altas, con un rango de 75 a 90 km/h los IRI estimado y calculado se correlacionan mejor. En este caso la diferencia no fue tan notoria debido a que la autopista se encuentra en estado óptimo

Un valor de IRI entre 1m/km y 2m/km es casi imperceptible por un conductor que transita por la vía, debido a que la rugosidad es muy buena e indica que la carretera está en muy buenas condiciones. Por lo que la aplicación del software Roadroid en esta autopista refleja un buen desempeño al mostrar los resultados, no presenta gran diferencia con lo calculado por el perfilómetro láser. Además, de presentar ventajas prácticas con respecto al otro equipo de medición de IRI.



Capítulo 7. Bibliografía

- AASHTO . (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Whashington DC.
- Arriaga Patiño, M., Garnica Anguas, P., & Rico Rodríguez, A. (1998). Índice Internacional de Rugosidad en la Red Carretera de México. Sanfandila, Querétaro, México.
- Badilla, Vargas, G., Elizondo Arrieta, F., & Barrantes Jiménez, R. (2008). *Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI*. Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, San José - Costa Rica.
- Badilla, G. (2009). Determinación de la regularidad superficial del pavimento mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI). (E. L. Estructurales, Ed.) *Publicación N° 21 Infraestructura Vial*, 30.
- Barrantes Jiménez, R. (2008). *Desarrollo de herramientas de gestión con base en la determinación de Índices Red Vial Nacional*. Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, San Pedro Montes de Oca.
- Carey, W., & Irick, P. (1960). The Pavement Serviceability Performance Concept. *Highway Research Board. Record 250*.
- Caro, F., & Peña, G. (enero - junio de 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(1), 57 - 72.
- del Águila Rodríguez , P. (1999). *Experiencias y resultados obtenidos en la evaluación de la rugosidad de más de 3000 km de pavimentos en el Perú y otros países*. Obtenido de <http://www.camineros.com/documentos/doc3.pdf>
- del Águila Rodríguez, P. (1999). *Metodología para la determinación de la rugosidad de los pavimentos con equipo de bajo costo y gran precisión*. Obtenido de <http://www.camineros.com/documentos/doc2.pdf>.
- Forsslöf, L. (2012). Roadroid - Smartphone Road Quality Monitoring. *19th ITS World Congress*. Vienna.
- Forsslöf, L. (2013, June 27). Roadroid - Continuous Road Condition Monitoring with Smartphones. Ljusdal, Sweden.
- Gillespie, T. D., Sayers, M. W., & Segel, L. (1980). Calibration of Response - Type Road Roughness Measuring Systems. *National Cooperative Highway Research Program(Report 228)*, 81.

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (17 de Julio de 2013). Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción EG-2013. Lima, Perú.
- Montoya Goicochea|, J. (2013). *Análisis del IRI para un proyecto de carretera sinuosa concesionada en el Perú*. Tesis , Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Lima.
- Nava. (2007). *Diseño e integración de un sistema de adquisición de datos para la medición de perfiles de pavimentos*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería Electrónica, México D.F.
- OHL. (18 de Mayo de 2016). *OHL CONCESIONES*. Obtenido de <http://www.ohlconcesiones.com.pe/autopista-pativilca-salaverry/descripcion-del-proyecto>
- Pavia Sytems. (16 de Agosto de 2007). *Pavement Interactive*. Obtenido de <http://www.pavementinteractive.org/article/roughness/>
- ROADROID. (Junio de 2014). *Referencia de proyectos Roadroid*. Obtenido de <http://roadroid.com/common/References/Roadroid%20Referencia%20de%20proyectos%200.4.pdf>
- ROADROID. (2014, September 2 - 4). Roadroid - continuous road condition monitoring with smartphones. *A multi-disciplinary approach to improve capacity & safety for road transport in Africa*. Pretoria, South Africa.
- ROADROID. (2015, January). User guide Roadroid Classic.
- Sánchez, I., & De Solminihac, H. (Enero - Junio de 1989). El IRI: Un indicador de la regularidad superficial. *Revista de Ingeniería de Construcción*, 1-16.
- Sayers. (1995, January). *On the Calculation of IRI from Longitudinal Road Profile*. Washington D.C.: The University of Michigan Transportation Research Institute. Transportation Research Board.
- Sayers, M. W., & Karamihac, S. M. (1998). *The Little Book of Profiling*. University of Michigan Transportation Research Institute.
- Sayers, M., Gillespie, T., & Queiroz, C. (January de 1986). International Experiment to Establish Correlations and Standard Calibration Methods for Road Roughness Measurements. *World Bank Technical paper N° 45*.
- Solminihac, H. d. (2001). *Gestión de Infraestructura Vial*. Santiago de Chile, Chile: Universidad Católica de Chile.
- Yogesh U. Shah, S. S. (2013). Modeling the Pavement Serviceability Index For Urban Roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 66 - 72.

