



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil

Desarrollo de la correlación entre dos indicadores de la condición de la superficie del pavimento

Autores:

Andrés Eduardo Chávez Mendieta

C.I. 0104457759

Leida Yolanda Peñarreta Tello

C.I. 1900478593

Director:

Ing. Jaime Asdrúbal Bojorque Iñiguez, PhD.

C.I. 0102857885

***Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero Civil***

Cuenca – Ecuador

Abril, 2019



RESUMEN

El presente trabajo de titulación abordó la determinación del Índice de Condición del Pavimento (PCI) y el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en un sector de la Avenida Loja, de la ciudad de Cuenca. El sector estudiado se dividió en 86 secciones de 50 metros cada una. Este estudio fue realizado con el fin de encontrar la correlación entre estos dos índices. El PCI califica la condición superficial del pavimento, siguiendo la norma ASTM D6433. El IRI mide la rugosidad del pavimento, que se obtuvo utilizando la aplicación Roadroid. Roadroid entrega dos índices, uno enfocado en la textura superficial y el otro en la rugosidad, denominados eIRI y cIRI, respectivamente.

Según los resultados obtenidos del PCI, el 45 y 35% de las secciones presenta una condición excelente y buena, respectivamente, mientras que el 11 y 9% restante tiene una condición aceptable y mala. En todas las secciones clasificadas en estado malo, se manifiestan las fallas: agrietamiento lineal, parcheo largo y despedazamiento; concluyendo que estos 3 tipos de fallas son los que más afectan al estado funcional de la carretera y éstos cubren grandes áreas produciendo importantes depresiones en la superficie.

Las lecturas del IRI determinaron que la rugosidad de la vía varía desde los 4.8 m/km, clasificándolo como pavimento viejo y deteriorado. El modelo obtenido entre PCI y eIRI alcanzó una correlación de -0.79, indicando una relación lineal inversa alta entre éstos, lo que significa que el PCI se encuentra relacionado con la textura del pavimento rígido.

Palabras clave: PCI. IRI. Deterioros. Rugosidad. Textura. Roadroid. Pavimento.



ABSTRACT

The present research covers the determination of the Pavement Condition Index (PCI) and the International Roughness Index (IRI) of the Loja Avenue located at Cuenca city. The studied sector was divided into 86 smaller sections of 50 meters each. This study was done to find a correlation between these two indexes. The PCI qualifies the surface condition of the pavement, following the ASTM D6433 standard. The IRI measures the pavement roughness, which was obtained using the Roadroid application. Roadroid delivers two indexes, one focused on surface texture and the other on roughness, called eIRI and cIRI, respectively.

According to the results obtained from the PCI, the 45 to 35 % of the sections present an excellent to fairly good condition, respectively, whereas a remaining 11 to 9 % have an acceptable and poor condition. In all the sections classified as poor, there exist the following distresses: lineal cracking, large patching and punchout. Concluding that these 3 types of distresses are the ones that cause a greater damage on the road functional state and cover great areas producing very important depressions on the road's surface.

The IRI readings determined that road roughness varies from 4.8 m/km, classifying it as old and deteriorated pavement. The model obtained between PCI and cIRI reached a correlation of -0.79, indicating relatively high inverse lineal relation; meaning that the PCI is closely related with the texture of the rigid pavement.

Keywords: PCI. IRI. Distresses. Roughness. Texture. Roadroid. Pavement.



CONTENIDO

Resumen	I
Abstract	II
Contenido	III
Índice de figuras	V
Índice de gráficos	VII
Índice de tablas	VII
Cláusulas de propiedad intelectual	VIII
Cláusulas de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional	X
Dedicatoria	XII
Agradecimiento	XIII
1. Generalidades	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Definición del problema.....	2
1.3 Justificación.....	2
1.4 Alcance.....	3
1.5 Objetivos.....	3
1.5.1 General.....	3
1.5.2 Específicos.....	3
1.6 Descripción del área de estudio.....	3
2. Marco teórico	5
2.1 Generalidades sobre los pavimentos.....	5
2.1.1 Clasificación de los pavimentos.....	6
2.1.2 Evaluación de pavimentos en servicio.....	6
2.2 Índice de la condición del pavimento (PCI).....	7
2.2.1 Norma ASTM D6433-11.....	7
2.2.2 Clasificación de los deterioros del pavimento rígido.....	8
2.3 Rugosidad y Textura.....	24
2.4 Índice de rugosidad internacional (IRI).....	26
2.4.1 Antecedentes.....	27
2.4.2 Norma ecuatoriana.....	28
2.4.3 Métodos de medición de rugosidad.....	30
2.5 Roadroid.....	32
2.5.1 Inicios de Roadroid.....	33
2.5.2 IRI estimado y calculado.....	34
2.6 Nivelación.....	35
2.7 Calibración de medidores de rugosidad de tipo respuesta (RTRRMS).....	36
2.8 Regresión lineal simple.....	37
2.8.1 Coeficiente de correlación de Pearson.....	40
3. Materiales y métodos	41
3.1 Materiales y equipos.....	41
3.1.1 PCI.....	41
3.1.2 IRI con Roadroid.....	42
3.1.3 IRI con nivelación.....	43



3.2 Metodología de cálculo de PCI, IRI y correlación 45

 3.2.1 Calculo del PCI 47

 3.2.2 IRI con Roadroid 52

 3.2.3 IRI con nivelación 57

 3.2.4 Calibración 64

 3.2.5 Correlación PCI – IRI 66

4. Resultados 67

 4.1 Análisis del PCI 67

 4.2 IRI con Roadroid 71

 4.3 Calibración del IRI 74

 4.4 Correlación PCI e IRI con valores promedio 77

 4.5 Correlación PCI y eIRI con valores máximos 79

5. Conclusiones y recomendaciones 82

 5.1 Conclusiones 82

 5.2 Recomendaciones 83

Referencias 84

Anexos 87



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Ubicación de la zona de estudio.	4
Fig. 2. a) Baja b) Media c) Alta Niveles de severidad para Pandeo. ASTM, 2011.....	9
Fig. 3. a) Baja b) Media c) Alta Niveles de severidad para agrietamiento de esquina. ASTM, 2011.	10
Fig. 4. a) Baja b) Media c) Alta Niveles de severidad de División de Losa. ASTM, 2011.....	11
Fig. 5. Agrietamiento tipo "D". ASTM, 2011.	12
Fig. 6. a) Baja b) Media c) Alta Niveles de severidad de desnivel entre losas. ASTM, 2011.....	13
Fig. 7. a) Baja b) Media c) Alta Niveles de severidad de Daño en el Sellante de Junta. ASTM, 2011.....	13
Fig. 8. Desprendimiento de hombreras. Nivel de severidad baja. ASTM, 2011.	14
Fig. 9. a) Baja b) Media c) Alta Niveles de severidad del agrietamiento lineal. ASTM, 2011.	15
Fig. 10. a) Baja b) Media c) Alta Niveles de severidad del parcheo largo. ASTM, 2011.	16
Fig. 11. Parcheo pequeño de severidad baja. ASTM, 2011.....	17
Fig. 12. Agregado Pulido. ASTM, 2011.	17
Fig. 13. Huecos en losa. ASTM, 2011.	18
Fig. 14. Bombeo de losa. ASTM, 2011.	18
Fig. 15. Deterioro de cruce de ferrocarril de severidad alta. ASTM, 2011.	19
Fig. 16. a) Baja b) Media c) Alta Niveles de severidad del despedazamiento. ASTM, 2011.....	20
Fig. 17. a) Baja b) Media c) Alta Niveles de severidad de Mapa de Grietas. ASTM, 2011.	21
Fig. 18. Grietas de Contracción en losa. ASTM, 2011.	22
Fig. 19. a) Baja b) Media c) Alta Niveles de severidad del desprendimiento de esquina. ASTM, 2011.....	22
Fig. 20. a) Baja b) Media c) Alta Niveles de severidad del desprendimiento de junta. ASTM, 2011.	24
Fig. 21. Amplitud y longitud de onda. NEVI, 2012.	25
Fig. 22. Tipos de textura de un pavimento. PIARC, 1995.	26
Fig. 23. Escala IRI. Sayers et al., 1986b.....	28
Fig. 24. Esquema de RTRRM. NEVI, 2012.	31
Fig. 25. Logo de la aplicación Roadroid. Roadroid, 2017.	32
Fig. 26. Casos posibles de rugosidad – textura. Forslof, 2014.	34
Fig. 27. Ejemplo de mira y nivel. Google imágenes	35
Fig. 28. Relación lineal; β_0 : intersección; β_1 : pendiente. Walpole et al., 2012.	37
Fig. 29. Datos (x,y) dispersos alrededor de la verdadera recta de regresión. Walpole et al., 2012.....	38
Fig. 30. Valores de r y sus implicaciones. Canavos, 1988.	40
Fig. 31. a) Cinta de 50m b) Metro de 5m c) Escuadras Instrumentos de medición.....	41
Fig. 32. Ábaco de DV de Losa Dividida. Apéndice X4 de la ASTM D 6433-11.	42
Fig. 33. Teléfono Sony Xperia X.	42
Fig. 34. Sujetador Remax RM-0.6.	43
Fig. 35. Vehículo de prueba.	43
Fig. 36. Nivel Topográfico procedente de la facultad.	44
Fig. 37. Medición y señalización de la sección 34.	45
Fig. 38. Ubicación de la primera intersección (Av. Primero de Mayo). Google Earth.....	45
Fig. 39. Ubicación de la segunda intersección (Av. Isabel la Católica). Google Earth.	46
Fig. 40. Ubicación de la tercera intersección (Av. Don Bosco). Google Earth.	46
Fig. 41. Deterioro: agrietamiento lineal; sev.: Media. Losa 1 de la sección 17 del carril #1 en la Av. Loja....	47
Fig. 42. Deterioro: Parcheo largo; sev.: Alta. Losa 3 de la sección 17 del carril #1 en la Av. Loja.....	47
Fig. 43. Deterioro: agrietamiento lineal; sev.: Media. Losa 8 de la sección 17 del carril #1 en la Av. Loja...	48
Fig. 44. Clasificación de deterioros y severidades.	48
Fig. 45. DV del deterioro 8M. ASTM, 2011.	49



Fig. 46. DV del deterioro 9H. ASTM, 2011.	50
Fig. 47. Abaco de CDV para Pavimento Rígido. ASTM, 2011.	51
Fig. 48. Colocación del teléfono inteligente.	53
Fig. 49. Ajuste de la posición del teléfono.	53
Fig. 50. Inicio de toma de datos.	54
Fig. 51. Subida de datos a la página principal. Aplicación Roadroid.	54
Fig. 52. Transferencia de datos a la página principal. Aplicación Roadroid.	55
Fig. 53. Visualización de los valores eIRI (puntos). Roadroid, 2017.	55
Fig. 54. Descarga de archivos procesados. Roadroid, 2017.	56
Fig. 55. Tablas y gráficas de los recorridos realizados. Roadroid, 2017.	56
Fig. 56. Ubicación de las secciones de la vía (sentido Norte-Sur). Google Earth.	57
Fig. 57. Abscisado de ruta a perfilar.	58
Fig. 58. Medición de los puntos con el nivel topográfico.	59
Fig. 59. Persona con la mira ubicada sobre un punto del recorrido.	60
Fig. 60. Ejemplo de perfil medido con mira y nivel.	61
Fig. 61. Visualización de un perfil "filtrado".	62
Fig. 62. Algoritmo utilizando para obtener el IRI a través de MATLAB.	64
Fig. 63. Obtención de la ecuación de calibración entre IRI y ARS ₈₀ . Sayers et al., 1986b.	65
Fig. 64. Agrietamiento lineal, severidad alta. Ubicada en la losa 3 de la sección 5 (carril #1).	68
Fig. 65. Despedazamiento, severidad alta. Ubicada en la losa 6 de la sección 5 (carril #1).	68



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. PCI de las secciones del carril # 1.....	67
Gráfico 2. PCI de las secciones del carril #2.....	69
Gráfico 3. Clasificación del estado funcional de la Avenida Loja.....	69
Gráfico 4. eIRI y cIRI obtenidos en el carril #1.....	72
Gráfico 5. Correlación entre eIRI y cIRI, para carril #1.....	72
Gráfico 6. eIRI y cIRI obtenidos en el carril #2.....	73
Gráfico 7. Correlación entre eIRI y cIRI, para carril #2.....	73
Gráfico 8. Perfil medido y filtrado del recorrido de la rueda derecha de la sección #33 (carril #2).....	74
Gráfico 9. Calibración de los valores eIRI.....	75
Gráfico 10. Calibración de los valores cIRI.....	76
Gráfico 11. eIRI y cIRI calibrados del carril #1.....	76
Gráfico 12. eIRI y cIRI calibrados del carril #2.....	77
Gráfico 13. Correlación de Pearson entre PCI vs eIRI.....	78
Gráfico 14. Correlación de Pearson entre PCI vs cIRI.....	79
Gráfico 15. Ubicación y valores de IRI máximos.....	80
Gráfico 16. Correlación entre eIRI y PCI, usando valores picos.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escala de Valoración del PCI. Elhadidy, 2015.....	7
Tabla 2. Tipos de deterioro en los Pavimentos Rígidos.....	8
Tabla 3. Niveles de severidad.....	8
Tabla 4. Niveles de severidad para el Desnivel entre Losas. ASTM, 2011.....	12
Tabla 5. Niveles de severidad del Despedazamiento. ASTM, 2011.....	20
Tabla 6. Niveles de severidad para Desprendimiento de Esquina. ASTM, 2011.....	23
Tabla 7. Niveles de severidad para el desprendimiento de juntas. ASTM, 2011.....	23
Tabla 8. Clasificación de las irregularidades superficiales de un pavimento. NEVI, 2012.....	25
Tabla 9. Límites de IRI aplicados en Uruguay.....	29
Tabla 10. Requisitos de precisión para mediciones profilométricas del IRI Clase 1 y 2. Sayers et al., 1986b..	36
Tabla 11. Transformaciones. Walpole et al., 2012.....	39
Tabla 12. Cálculo de las densidades de cada combinación única.....	49
Tabla 13. DVs de cada combinación y selección del HDV.....	50
Tabla 14. Matriz de cálculo del Total DV, q y CDV.....	51
Tabla 15. Determinación del PCI de la sección N° 17.....	52
Tabla 16. Resumen de los requisitos para la calibración de RTRRMS. Sayers et al., 1986b.....	58
Tabla 17. Comparación del PCI entre dos tesis.....	70
Tabla 18. Secciones en condición malo	70
Tabla 19. Deterioros presentes en las secciones malas.....	70
Tabla 20. Fallas de las 8 secciones en estado Malo.....	71
Tabla 21. Secciones seleccionadas para la calibración con mira y nivel.....	74
Tabla 22. Valores IRI para la calibración.....	75
Tabla 23. Fuerza de relación lineal en función del valor del coeficiente de correlación. Chan, 2003.....	78
Tabla 24. PCI y eIRI de los valores picos.....	80



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Andrés Eduardo Chávez Mendieta, autor del trabajo de titulación "Desarrollo de la correlación entre dos indicadores de la condición de la superficie del pavimento", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 11 de abril del 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "A. Chávez", written over a horizontal line.

Andrés Eduardo Chávez Mendieta

C.I: 0104457759



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Leida Yolanda Peñarreta Tello, autora del trabajo de titulación "Desarrollo de la correlación entre dos indicadores de la condición de la superficie del pavimento", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 11 de abril del 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Leida Peñarreta Tello".

Leida Yolanda Peñarreta Tello

C.I: 1900478593



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Andrés Eduardo Chávez Mendieta en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Desarrollo de la correlación entre dos indicadores de la condición de la superficie del pavimento", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 11 de abril del 2019.

Andrés Eduardo Chávez Mendieta

C.I: 0104457759



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Leida Yolanda Peñarreta Tello en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Desarrollo de la correlación entre dos indicadores de la condición de la superficie del pavimento", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 11 de abril del 2019.

Leida Yolanda Peñarreta Tello

C.I: 1900478593



DEDICATORIA

Este logro se lo dedico a la gran familia que pertenezco orgullosamente, sobre todo a mis padres, quienes fueron pilar fundamental en mi formación como profesional, por brindarme la confianza, oportunidad y recursos para lograrlo. A mi hermano pequeño que ha estado brindando amor y alegría cada día. Y finalmente a una amiga muy especial que desde mi niñez ha sido como parte de la familia, que siempre ha estado ahí presente en los buenos momentos, así como en los más difíciles, y aunque ahora ya no estés presente, siempre te tengo en mi mente.

Andrés

Se lo dedico a ella, que es mi luz, mi vida y mi todo, la que siempre estuvo a mi lado apoyándome y dándome ánimos para conseguir mis metas, la que siempre confió en mí, y la que tenía la seguridad de que podía lograr cualquier cosa que me proponga. Se la dedico a ella, mi madre y persona favorita.

Leida



AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que han estado durante el proceso y contribuido a la realización de este trabajo. En primer lugar, quiero agradecer a Jaime Bojorque, director de nuestra tesis y maestro durante los últimos años, quien nos apoyó desde el inicio en esta investigación. También dar las gracias a mis padres, quienes fueron mis mayores promotores en este proceso, por creer en mí y en mis expectativas. También quiero dar gracias a mi compañera de trabajo que estuvo presente durante toda la realización de esta tesis, por su esfuerzo y entrega. Y finalmente agradezco a mis amigos que han formado parte de este largo viaje.

Andrés

Agradezco a nuestro tutor de tesis, Ing. Jaime Bojorque, por brindarnos sus conocimientos en todo el desarrollo de este trabajo de titulación. Y como no agradecer a mi madre, Elsa, y hermanas, Nathaly y Paulina, por estar siempre presentes, dándome su amor y apoyo incondicional. A mis amigos que de una u otra forma me ayudaron a culminar esta investigación, y de manera especial a Patricio.

Leida



“Vive como si fueras a morir mañana, aprende como si fueras a vivir siempre”.

Mahatma Gandhi



CAPÍTULO I

GENERALIDADES

En este capítulo se presentan conceptos introductorios sobre la problemática existente en la actualidad del pavimento rígido y las acciones que se han tomado al respecto a lo largo de la historia. También se plantean los objetivos: general y específicos, detallando cada actividad que se realizará. Finalmente, se describe la vía que se utilizó para desarrollar el trabajo de titulación. Este capítulo se encuentra dividido en 6 subcapítulos:

- Introducción
- Definición del problema
- Justificación
- Alcance
- Objetivos
- Descripción del área de estudio

1.1 Introducción

En la actualidad, existen diferentes factores que producen fallas en el pavimento antes de cumplir su tiempo de vida útil (Nunez y Shahin, 1986). Por lo que es necesario realizar un monitoreo constante y continuo de las condiciones reales de las carreteras para obtener una base de datos confiable de la condición actual de la red vial. De esta forma realizar un análisis y establecer operaciones adecuadas de mantenimiento y gestión de la infraestructura, junto con una asignación uniforme de recursos (Vittorio et al., 2014). Los Departamentos de Transporte (DOT) de los Estados Unidos realizan evaluaciones de la condición del pavimento cada año para determinar el estado de la red vial y las mejoras del programa, como mantenimiento, repavimentación, rehabilitación y reconstrucción (Arhin et al., 2015).

La evaluación del rendimiento del pavimento se realiza mediante la obtención de diversos indicadores estandarizados empleados a nivel internacional, siendo componentes básicos de cualquier sistema de gestión del pavimento. A lo largo de la historia se han desarrollado diversos estudios relacionados con la evaluación del rendimiento del pavimento utilizando indicadores de condición, a continuación, se describen los más conocidos y empleados internacionalmente. La Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras del Estado (AASHO por sus siglas en inglés), realizó un estudio de rendimiento del pavimento para 123 secciones de prueba para desarrollar el modelo de Índice de Serviciabilidad Presente (PSI) basado en la clasificación subjetiva de la Evaluación de Serviciabilidad Presente (PSR) y las mediciones objetivas del terreno. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. desarrolló el Índice de Condición del Pavimento (PCI), este valor se deduce en función del tipo, cantidad y nivel de severidad de los deterioros que presenta el pavimento (U.S, Army, 1982). Juang & Amirkhanian (1992) documentaron el desarrollo del Índice de Deterioro de Pavimento Unificado (UPDI) utilizando la teoría de conjuntos difusos. Zhang et al., (1993) desarrolló un índice de clasificación global para pavimentos flexibles llamado Índice de Aceptabilidad General (OAI por sus



siglas en inglés) basado en cuatro parámetros: la rugosidad, el deterioro de la superficie, la capacidad estructural y la resistencia al deslizamiento. La Administración Federal de Carreteras (FHWA), reconoció al Índice de Rugosidad Internacional (IRI) como el índice de rugosidad estándar después de varios estudios realizados con diferentes metodologías y estadísticas de perfiles de carreteras.

1.2 Definición del problema

Es muy común que las vías presenten pésimos estados funcionales antes del término de la vida útil, debido a numerosos factores, tales como: defectos constructivos, cambios en las condiciones de diseño y malos o nulos mantenimientos. Una forma de neutralizar los daños generados en la superficie del pavimento e incluso mejorar su condición es mediante estrategias de mantenimientos, las mismas que se asignan en función de indicadores de la condición del pavimento. Indicadores como el PCI e IRI son utilizados frecuentemente para asignar una estrategia de mantenimiento para los pavimentos existentes (Shah, 2013). El PCI permite calificar al pavimento mediante una inspección visual del tipo de daños superficiales, identificándolos, cuantificándolos y evaluando su nivel de incidencia sobre el pavimento y se calcula en base al método estandarizado de la norma ASTM D6433-11 (ASTM, 2011). El IRI cuantifica las variaciones a lo largo del perfil longitudinal de la vía, obteniendo un valor numérico que va aumentando según las anomalías en el perfil (FHWA, 2005). El problema radica en la obtención del IRI, ya que los métodos tradicionales y convencionales para su cálculo son altamente costosos y requieren de una gran cantidad de tiempo para su análisis.

1.3 Justificación

Para reducir el costo y mejorar la eficiencia de la medición del IRI o de la rugosidad del pavimento, Harris et al., (2010) propone una alternativa económica que reemplaza la tecnología láser por sensores inerciales, denominados acelerómetros, los mismos que se hallan incluidos dentro del sistema de los teléfonos inteligentes.

En los últimos años, el uso de dispositivos móviles inteligentes se ha difundido ampliamente. En el 2016 las ventas de teléfonos inteligentes totalizaron casi 1500 millones de unidades, aumentando el 5% con respecto a las ventas del 2015 (Gartner, 2017). La mayoría de los teléfonos inteligentes modernos tienen una gran cantidad de sensores incorporados, permitiendo utilizar a los teléfonos como herramientas para medir y recopilar una gran cantidad de datos en tiempo real. En consecuencia, se produce un desarrollo constante de diferentes aplicaciones para medir la rugosidad en la superficie del pavimento, como es el caso de la aplicación Roadroid, desarrollada por Lars Forslof Arbetet. Pruebas realizadas con la aplicación Roadroid, utilizando el mismo automóvil y recorriendo a la misma velocidad, dieron hasta 81% de correlación con un dispositivo de mayor precisión (Johnston & Islam, 2013). Putra & Suprpto (2018) analizaron 5 segmentos de carretera para calcular la correlación entre PCI e IRI medido con Roadroid. El estudio indica que existe una correlación negativa entre los dos índices, y está valorada en -0.23, lo cual indica que el IRI y PCI tienen una relación lineal inversa baja.



1.4 Alcance

El presente trabajo propone la evaluación del estado superficial de un tramo de 2.3 km de la Avenida Loja, ubicada en la ciudad de Cuenca. Para ello se empleará dos de los indicadores más utilizados a nivel nacional que son PCI e IRI, realizando una inspección visual establecida en la norma ASTM D6433 y mediante el uso de la aplicación Roadroid, respectivamente, analizando 86 secciones de manera similar que en el estudio de Putra & Suprpto (2018). Las 86 secciones analizadas se dividen en 43 por cada sentido de circulación, donde cada sección tiene una longitud de 50 metros.

La importancia de este estudio reside en encontrar la mejor correlación existente entre PCI e IRI y de esta forma determinar la ecuación para obtener el PCI en función del IRI, lo que permitirá acelerar los trabajos de evaluación de los pavimentos rígidos, caracterizando el estado actual de una carretera de manera rápida, eficiente y sobre todo económica.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

- ❖ Investigar la correlación entre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el Índice de la Condición del Pavimento (PCI) en el pavimento rígido de un tramo de la Avenida Loja (desde la Avenida 10 de Agosto hasta la calle Alfonso Pinzón).

1.5.2 Objetivos Específicos

- ❖ Identificar los diferentes tipos de deterioro para determinar el PCI de la vía de estudio mediante el método ASTM D6433-11.
- ❖ Determinar el IRI mediante la aplicación para Smartphone denominada Roadroid.
- ❖ Clasificar el estado superficial de la vía de estudio en base al PCI e IRI, tomando como referencia la norma ASTM y el documento del Banco Mundial, respectivamente.
- ❖ Analizar la posible correlación entre el IRI y el PCI de la vía de estudio.

1.6 Descripción del área de estudio

Desde la fundación española de la ciudad de Cuenca se generaron contactos culturales, de comercio y negocio con las poblaciones del norte y del sur de la ciudad. Para llegar al sur, desde ciudades como Loja, Zamora y Machala y poblaciones como Girón, Yunguilla, Pasaje y Santa Rosa, se utilizaba un sendero que conectaba a los cuencanos con las sociedades meridionales del Ecuador. Hoy en día, ese sendero inicial y transformado a lo largo de los siglos por el desarrollo urbano de la ciudad, se denomina Avenida Loja.

Esta importante arteria vial, durante los últimos meses, fue intervenida en toda su extensión, con indispensables trabajos de mantenimiento como la recuperación de las tuberías de alcantarillado, el readoquinamiento y ampliación de la calzada a siete metros de ancho, la construcción de veredas, el

tendido de redes eléctricas subterráneas y la recuperación del sistema de iluminación pública. La Avenida Loja en este contexto, es un elemento más de la constante y permanente acción de conservación y mejoramiento de los espacios arquitectónicos y socio-culturales de esta urbe (Morales, 2011).

Actualmente, la Avenida Loja se ha visto afectada por varios factores que han generado el deterioro de su superficie, debido a los trabajos del tranvía que se han venido realizando desde hace más de cuatro años, el tráfico que llega o parte hacia fuera a las ciudades mencionadas anteriormente han tenido que usar esta avenida como alternativa o desvío para lograr entrar o salir de la ciudad. Esto ha generado que la cantidad de vehículos que pasan por esta vía sobrepasen el número esperado, quedando como evidencia el gran número de agrietamientos y deterioros sobre la calzada.

Se escogió La Avenida Loja como vía de estudio debido a que está constituida de pavimento rígido en la mayor parte de su extensión y sobre todo al gran número de fallas que presenta hoy en día, misma que se encuentra ubicada en la parte Oeste de la ciudad. El tramo de estudio empieza en el semáforo de la Avenida Loja y 10 de Agosto, atravesando transversalmente importantes avenidas tales como: Primero de Mayo, Isabel la Católica, Don Bosco, Los Conquistadores y finalmente termina su recorrido en la calle Alfonso Pinzón, equivalente a una distancia aproximada de 2.30 kilómetros. El punto inicial del tramo de estudio de la Avenida Loja se encuentra ubicado adyacente al semáforo en la avenida 10 de Agosto que permite el acceso a esta vía, su Latitud: $2^{\circ}54'17.06''S$ y Longitud: $79^{\circ}1'30.72''O$; para el punto final se tiene Latitud: $2^{\circ}55'15.56''S$ y Longitud: $79^{\circ}2'14.28''O$. Ver la Fig. 1.

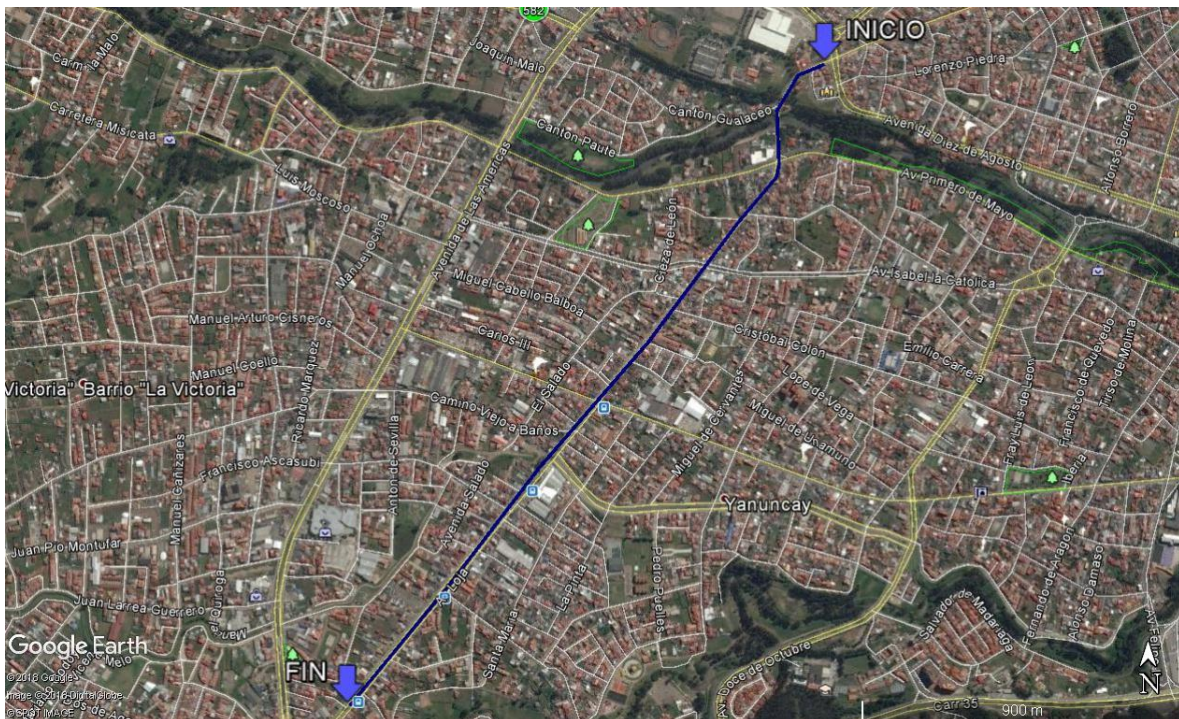


Fig. 1. Ubicación de la zona de estudio.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el segundo capítulo se revisa la información teórica necesaria para comprender el desarrollo de este proyecto de titulación, el mismo que contiene nueve subcapítulos que son:

- Pavimentos
- Índice de la Condición del Pavimento (PCI)
- Rugosidad y textura
- Índice de Rugosidad Internacional (IRI)
- Roadroid
- Nivelación
- Calibración de medidores de rugosidad de tipo respuesta (RTRRMS)
- Regresión lineal simple

El subcapítulo de Pavimentos presenta definiciones básicas de los pavimentos y su evaluación. En el PCI se expone la norma ASTM D6433-11, la misma que detalla la manera de clasificar y medir los diferentes tipos de deterioros y severidades que se presentan en los pavimentos rígidos. Dentro de rugosidad y textura se da una descripción de cada una, semejanzas e incidencias en el pavimento. En el subcapítulo del IRI se da a conocer la fórmula utilizada para su cálculo, los distintos tipos de medición que se pueden utilizar y la precisión de cada uno. En el subcapítulo de Roadroid se muestran características importantes de este software, como su enfoque, utilización e importancia que tiene esta aplicación a nivel internacional para el cálculo del IRI. Dentro de nivelación, se describe la norma ASTM E1364-95, la misma que detalla la manera que se debe medir el perfil de la vía usando un equipo estático, para la determinación del IRI. En la calibración se describe la manera que se deben correlacionar los IRI obtenidos mediante los métodos Roadroid y nivelación, para obtener índices de rugosidad calibrados. En el último subcapítulo, se expone la teoría investigada necesaria para definir las ecuaciones que se utilizarán para determinar la correlación entre los dos índices de estudio y la ecuación que representen de mejor manera esta relación.

2.1 Generalidades sobre los Pavimentos

Un pavimento es un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales adecuadamente compactados. Estas capas estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía, las mismas que han de resistir apropiadamente los esfuerzos repetitivos del tránsito que le transmite durante el período para el cual fue diseñada el pavimento. Los requisitos que debe reunir un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones según (Montejo, 2002) son:

- ❖ Resistir a la acción de las cargas atribuidas por el tránsito.
- ❖ Resistir a los agentes del intemperismo.



- ❖ Presentar una adecuada textura superficial que se adapte a las velocidades de circulación predichas y también ser resistente al desgaste producido por la abrasión entre la llanta del vehículo y el pavimento.
- ❖ Presentar una rugosidad superficial longitudinal y transversal que permita un confort adecuado a los usuarios.
- ❖ Debe ser durable y económico.
- ❖ Presentar un adecuado diseño de drenaje.
- ❖ Deben ser capaces de absorber el ruido de rodadura.
- ❖ El color debe ser adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos a los conductores garantizando su seguridad.

2.1.1 Clasificación de los Pavimentos

Los pavimentos se clasifican de manera general en dos tipos: flexible y rígido (Montejo, 2002):

Pavimento flexible

Este tipo se denomina así debido a que su estructura completa se deforma en función de las cargas que se transfieren sobre el pavimento. La capa superficial se denomina concreto asfáltico ya que está compuesta por material asfáltico, granular y finos completamente homogenizados. La superficie de rodadura se encuentra asentada en varias capas, que van en orden descendente: base, subbase y finalmente por la subrasante que puede ser natural o mejorada. Los pavimentos flexibles tienen un menor tiempo de vida útil pero un costo inicial mucho menor (Osuna, 2008).

Pavimentos rígidos

Son pavimentos constituidos por una losa de hormigón hidráulico, misma que se apoya sobre la base o subbase de material seleccionado y esta capa se apoya en la subrasante. Su capacidad estructural depende directamente de la resistencia de las losas, y por lo tanto el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento. Pueden ser de concreto simple, concreto simple con varillas de transferencia de carga, de concreto reforzado y de concreto con refuerzo continuo (Montejo, 2002).

2.1.2 Evaluación de pavimentos en servicio

Factores de diverso origen intervienen en la formación de alteraciones en la superficie de rodamiento de los pavimentos afectando la seguridad, comodidad y velocidad con que se debe circular el tránsito vehicular presente y futuro. Los factores antes mencionados son de distinto origen; entre los más importantes se enumeran a continuación (Montejo, 2002):

- ❖ Elevado incremento de las cargas y frecuencia con respecto a las consideradas en el diseño original.
- ❖ Deficiencias durante el proceso de construcción, por ejemplo: mala calidad de los materiales, aplicar diferentes espesores de las capas o mala densificación de las mismas.
- ❖ Deficiencias en el diseño y mantenimiento
- ❖ Factores climáticos regionales desfavorables.

Las alteraciones en la superficie de rodadura son evaluadas mediante un examen superficial del pavimento, el cual consiste en la definición del estado superficial de la carretera y su entorno. Como



resultado del examen superficial se puede obtener algunas conclusiones para desarrollar trabajos futuros de conservación, siendo las siguientes:

- ❖ Detectar los inicios de posibles fallas y determinar sus causas.
- ❖ Determinar la necesidad de una evaluación estructural.
- ❖ Presentar elementos concluyentes para confirmar o modificar los criterios de diseño vigentes.

La finalidad fundamental de todo proceso de evaluación es permitir al ingeniero deducir, con un criterio totalmente racional, las obras de conservación rutinaria y de mejoramiento para disminuir o eliminar los defectos mencionados para así alcanzar un grado de transitabilidad adecuado durante un período de tiempo suficientemente prolongado que justifique la inversión necesaria (Montejo, 2002).

2.2 Índice de la condición del pavimento (PCI)

El Índice de la Condición de Pavimento (PCI por sus siglas en inglés) para carreteras y estacionamientos fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos y proporciona una calificación numérica para la condición superficial de varios tramos de carretera dentro de una red de carreteras, donde 0 es la peor condición posible y 100 es la más óptima. Elhadidy et al., (2015) presenta cinco niveles para la clasificación del estado funcional de la vía permitiendo categorizarla de una manera más sencilla (ver tabla 1). El PCI no puede medir la capacidad estructural del pavimento, pero proporciona una base objetiva para determinar las necesidades y prioridades de reparación y mantenimientos de los pavimentos (ASTM, 2011).

Tabla 1. Escala de Valoración del PCI. Elhadidy, 2015.

Clasificación	
100-70	Excelente
70-55	Bueno
55-40	Aceptable
40-10	Malo
10-0	Dañado

2.2.1 Norma ASTM D6433-11

El PCI se calcula en base al método estandarizado de la norma ASTM D6433-11, "Standart Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys". Esta metodología permite calificar al pavimento mediante una inspección visual del tipo de daños superficiales, identificándolos, cuantificándolos y evaluando su nivel de incidencia sobre el pavimento. La norma presenta dos metodologías diferentes, una para el cálculo del PCI del pavimento flexible y otra para el pavimento rígido.



2.2.2 Clasificación de los deterioros en los pavimentos rígidos

El apéndice X2 de la normativa ASTM D6433-11 enumera alfabéticamente los 19 tipos de deterioros que se pueden producir en los Pavimentos de Concreto de Cemento Portland, de la misma manera que se indica en la Tabla 2:

Tabla 2. Tipos de deterioro en los Pavimentos Rígidos.

N°	Tipo de Deterioro
1	Explosión / pandeo
2	Agrietamiento de esquina
3	División de losa
4	Agrietamiento “D”
5	Diferencia de elevación
6	Daño en el sellante de la junta
7	Desprendimiento de hombreras
8	Agrietamiento lineal
9	Parqueo largo
10	Parqueo pequeño
11	Agregado pulido
12	Huecos
13	Bombeo
14	Despedazamiento
15	Cruce de ferrocarril
16	Mapa de grietas
17	Grietas de contracción
18	Desprendimiento de esquina
19	Desprendimiento de junta

El registro de cada tipo de deterioro debe seguir las siguientes indicaciones para poder clasificar correctamente el tipo de deterioro con su respectiva severidad, ya que cada deterioro tiene una forma específica de clasificación de los niveles de la severidad. 15 deterioros se pueden dividir en 3 niveles de severidad los mismos que se muestran en la Tabla 3, y los 4 deterioros restantes no tienen niveles de severidad.

Tabla 3. Niveles de severidad.

Nivel de severidad	Símbolo
Baja (Low)	L
Media (Medium)	M
Alta (High)	H

- **Explosión o pandeo**

Generalmente las explosiones ocurren en grietas transversales o juntas que no han sido bien diseñadas o construidas, impidiendo la expansión de la losa. Al no poder aliviar la presión se producirá la rotura de las proximidades de la junta o puede generarse un movimiento localizado ascendente de los bordes de la losa, llamado pandeo.

Niveles de severidad:

- ❖ **L:** causa una calidad de conducción de baja severidad (Fig. 2 literal a).
- ❖ **M:** causa calidad de viaje de mediana gravedad (Fig. 2 literal b).
- ❖ **H:** causan una alta calidad de conducción (Fig. 2 literal c).



a)



b)



c)

Fig. 2. a) Baja b) Media c) Alta
Niveles de severidad para Pandeo. ASTM, 2011.

Cómo contar:

Una explosión cuenta como una losa, pero si la explosión afecta a dos losas adyacentes debe registrarse como dos losas.

- **Agrietamiento de esquina**

Es una grieta que corta las juntas a una distancia menor o igual a la mitad de la longitud de la losa de ambos lados medida desde la esquina de la losa. Se genera debido a la repetición de carga combinada con la pérdida de soporte y las tensiones.

Niveles de severidad:

- ❖ **L:** grieta de menos de 13 mm o grietas de cualquier ancho con relleno satisfactorio (Ver Fig. 3 literal a).
- ❖ **M:** grieta sin relleno entre 13 y 50 mm de ancho, o grieta rellena que un tiene desnivel menor a 10 mm (Ver Fig. 3 literal b).
- ❖ **H:** grieta sin relleno de más de 50 mm de ancho, o grieta rellena o no, con desnivel de más de 10 mm (Ver Fig. 3 literal c).

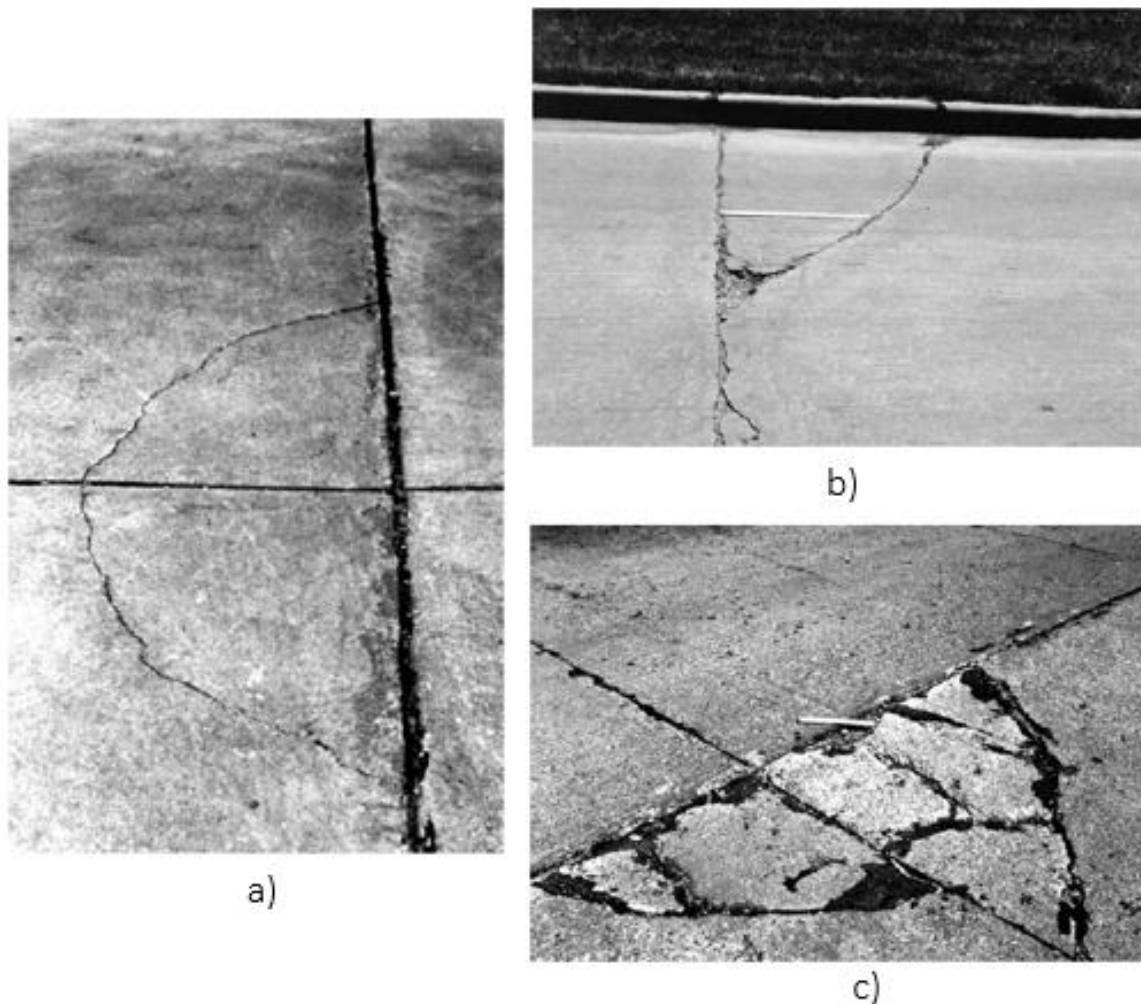


Fig. 3. a) Baja b) Media c) Alta
Niveles de severidad para agrietamiento de esquina. ASTM, 2011.

Cómo contar:

- ❖ Se registra como una losa si tiene un único corte de esquina.
- ❖ Para dos o más severidades, se debe registrar solamente el nivel más alto de gravedad.

- **División de losa**

Las losas divididas en cuatro o más piezas se cuentan como división de losa. Se genera por una sobrecarga o un soporte inadecuado o la combinación de ambos.

Niveles de severidad:

- ❖ **L:** si en cualquiera de las divisiones existe una diferencia de elevación que varía entre 3 y 10 mm (Ver Fig. 4 literal a).
- ❖ **M:** si en cualquiera de las divisiones existe una diferencia de elevación que varía entre 10 y 20 mm (Ver Fig. 4 literal b).
- ❖ **H:** si en cualquiera de las divisiones existe una diferencia de elevación de más de 20 mm (Ver Fig. 4 literal c).

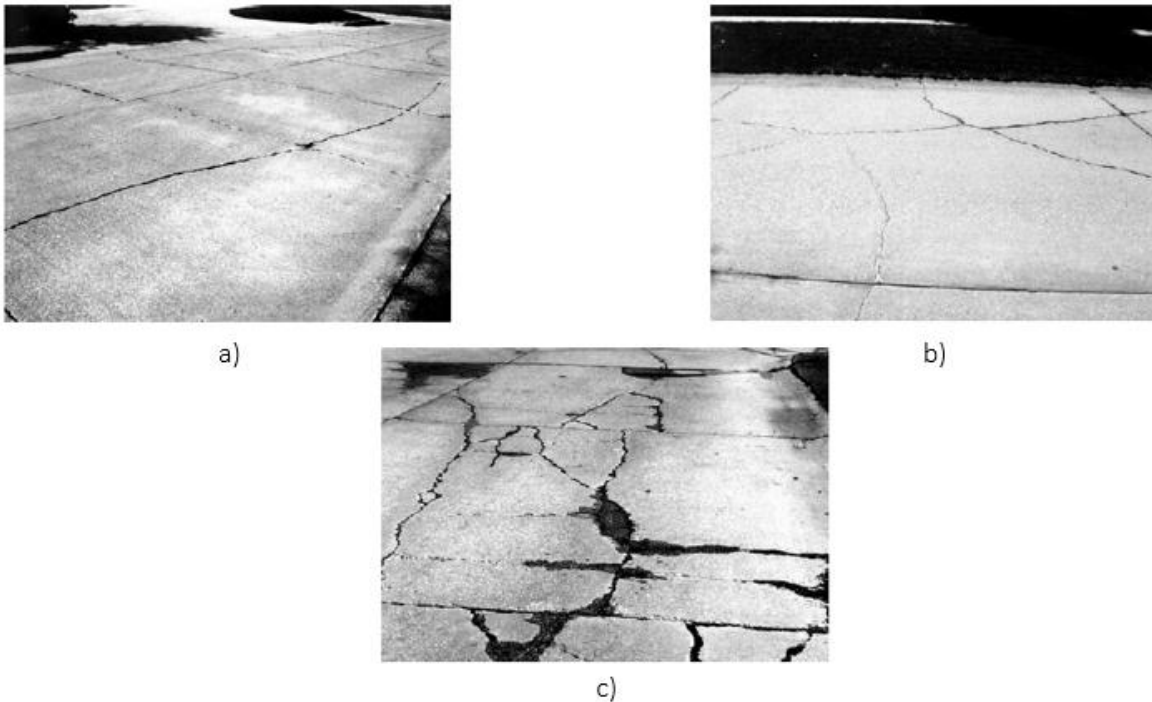


Fig. 4. a) Baja b) Media c) Alta
Niveles de severidad de División de Losa. ASTM, 2011.

Cómo contar:

Si la losa dividida es de gravedad media o alta, se considera que la losa tiene este deterioro con su respectivo nivel de severidad y no se contará ningún otro deterioro para esa losa.

- **Agrietamiento de durabilidad “D”**

Se presenta con un patrón de grietas paralelas y cercanas a una grieta conjunta o lineal (Fig. 5) y puede eventualmente generar la desintegración de toda la losa. Es causado por la expansión producida por la congelación y descongelación.

Niveles de severidad:

- ❖ **L:** las grietas cubren menos del 15% del área de la losa. La mayoría de las grietas son apretadas, pero algunas piezas pueden estar sueltas y faltantes.
- ❖ **M:** las grietas cubren menos del 15% del área y la mayoría de las piezas están sueltas y faltantes, o si cubren más del 15% del área. La mayoría de las grietas son apretadas, pero algunas piezas pueden estar sueltas y faltantes.
- ❖ **H:** Las grietas cubren más del 15% del área y la mayoría de las piezas se han desprendido o podrían retirarse fácilmente.



Fig. 5. Agrietamiento tipo "D". ASTM, 2011.

Cómo contar:

Se cuenta como una losa cuando el deterioro se localiza con una severidad. Si existe más de un nivel de gravedad, se contará que la losa tiene la mayor dificultad de severidad.

- **Desnivel entre losas**

Es la diferencia en la elevación de una articulación y se produce generalmente debido a los cambios de temperatura y humedad o por asentamientos debido a una base blanda.

Niveles de severidad:

Se clasifican en base a los rangos que se indican en la Tabla 4. Además, se puede apreciar en la fig. 6 el literal a), b) y c) que son los niveles de severidad baja, media y alta, respectivamente.

Tabla 4. Niveles de severidad para el Desnivel entre Losas. ASTM, 2011.

Nivel de severidad	Diferencia de Elevación (mm)
L	>3 y <10
M	>10 y <20
H	>20

Cómo contar:

Los desniveles a través de una unión se cuentan como una losa.

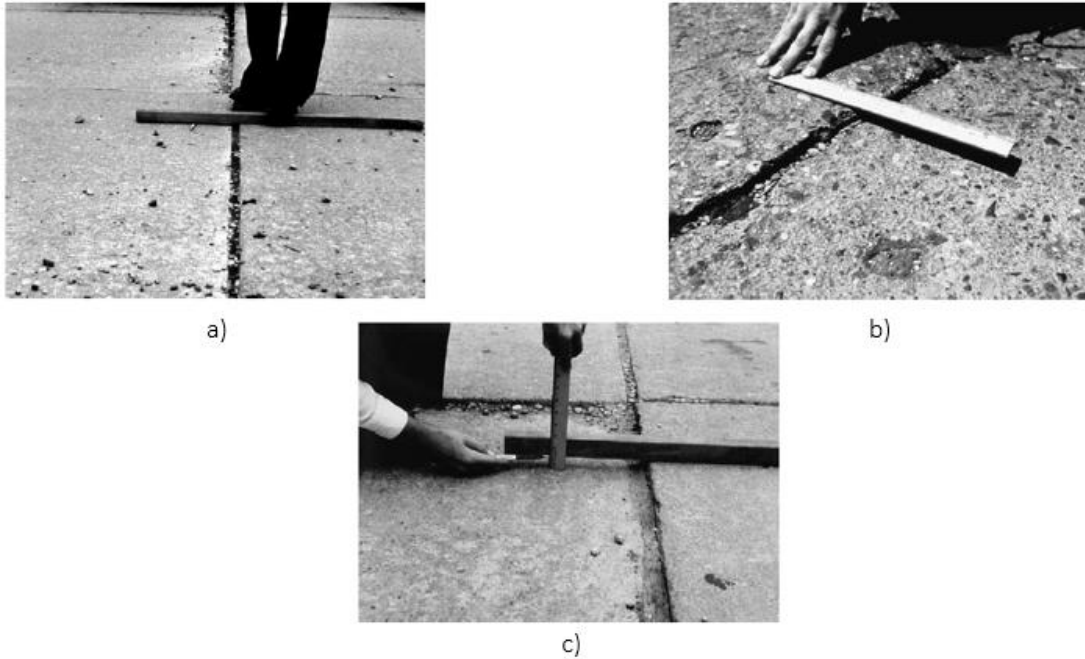


Fig. 6. a) Baja b) Media c) Alta
Niveles de severidad de desnivel entre losas. ASTM, 2011.

- **Daño en el sellante de juntas**

Es cualquier condición que permite que el suelo o rocas se acumulen en las juntas o permita la infiltración de agua significativa.

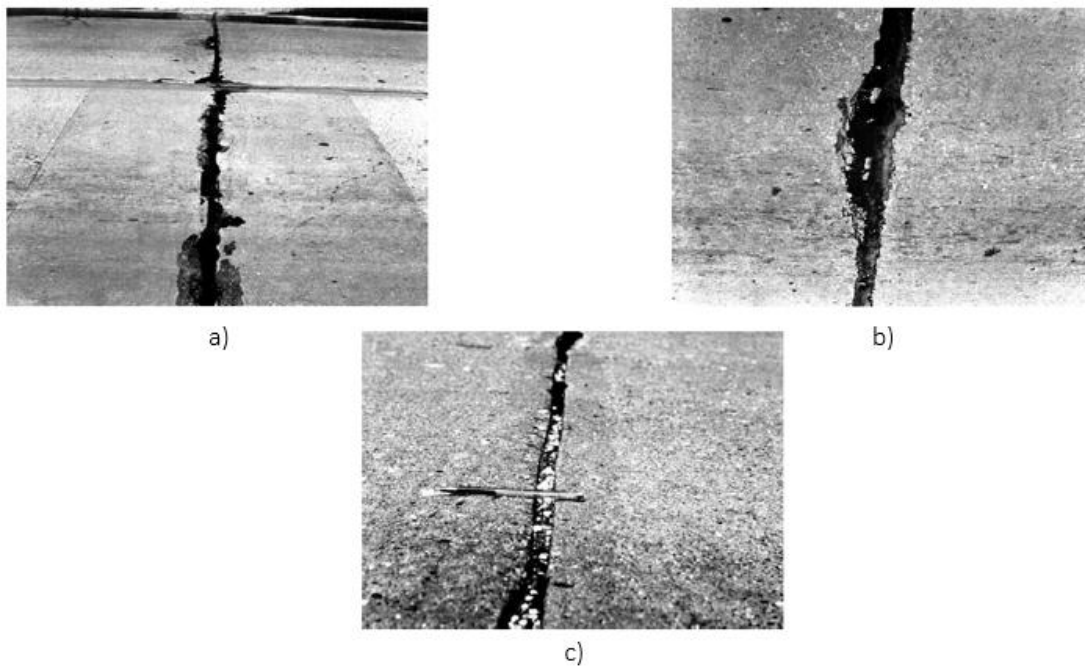


Fig. 7. a) Baja b) Media c) Alta
Niveles de severidad de Daño en el Sellante de Junta. ASTM, 2011.

Niveles de severidad:

- ❖ **L:** Cuando el sellador funciona bien, con un daño menor (ver Fig. 7 literal a) o si algunas de las juntas tienen sellador, que se han desprendido, pero todavía está en contacto con el borde de la junta.
- ❖ **M:** El sellador de juntas generalmente se encuentra en buenas condiciones en toda la sección. Si el sellador de juntas está en su lugar, pero el acceso al agua es posible a través de aberturas visibles de no más de 3 mm de ancho (ver Fig. 7 literal b).
- ❖ **H:** El sellador de juntas se encuentra en general en malas condiciones en toda la sección. Si el 10% o más del sellador de juntas excede los criterios de limitación enumerados anteriormente o si falta el 10% o más del sellador (ver Fig. 7 literal c).

Cómo contar:

El daño del sello de la junta no se cuenta en una base de losa por losa, sino que se evalúa en función de la condición general del sellador en toda el área.

- **Desprendimiento de hombreras**

Es la diferencia entre el asentamiento de la hombrera y el borde del carril de pavimento como se muestra en la Fig. 8. Se considera un deterioro debido a que puede ser peligroso para los usuarios y además puede causar una mayor infiltración de agua.



Fig. 8. Desprendimiento de hombreras. Nivel de severidad baja. ASTM, 2011.

Niveles de severidad:

- ❖ **L:** La diferencia de elevación se encuentra entre 25 y 50 mm (Ver fig. 8).
- ❖ **M:** La diferencia de elevación esta entre 50 y 100 mm.
- ❖ **H:** La diferencia de elevación es mayor a 100 mm.

Cómo contar:

El descenso promedio de carril/espaldón se calcula promediando la caída máxima y mínima a lo largo de la losa. Cada losa que muestra deterioro se mide por separado y se cuenta como una losa con el nivel de gravedad apropiado.

- **Agrietamiento lineal**

Este tipo de grietas dividen longitudinal, transversal y diagonalmente la losa en dos o tres piezas máximo. Son causadas por la combinación de carga de tráfico repetida, curvatura de gradiente térmico y humedad. Para evitar confusiones es necesario indicar que las grietas que dividen en 4 partes la losa se considera división de losa y las grietas que miden menos de 3 mm de ancho y menos de 2 m de largo se cuentan como grietas de contracción.

Niveles de severidad:

- ❖ **L:** Grietas sin relleno de menos de 13 mm o grietas rellenas de cualquier ancho con el relleno en condiciones satisfactorias, sin desnivel (Fig. 9 literal a).
- ❖ **M:** grietas sin relleno con un ancho entre 13 y 50 mm y sin desnivel; grietas sin relleno de ancho de ≤ 50 mm con desnivel de menos de 10 mm o grietas rellenas de cualquier ancho con desnivel de menos de 10 mm (Fig. 9 literal b).
- ❖ **H:** grietas sin relleno con un ancho mayor a 50 mm. O grietas rellenas o sin relleno de cualquier ancho con un desnivel mayor a 10 mm (Fig. 9 literal c).

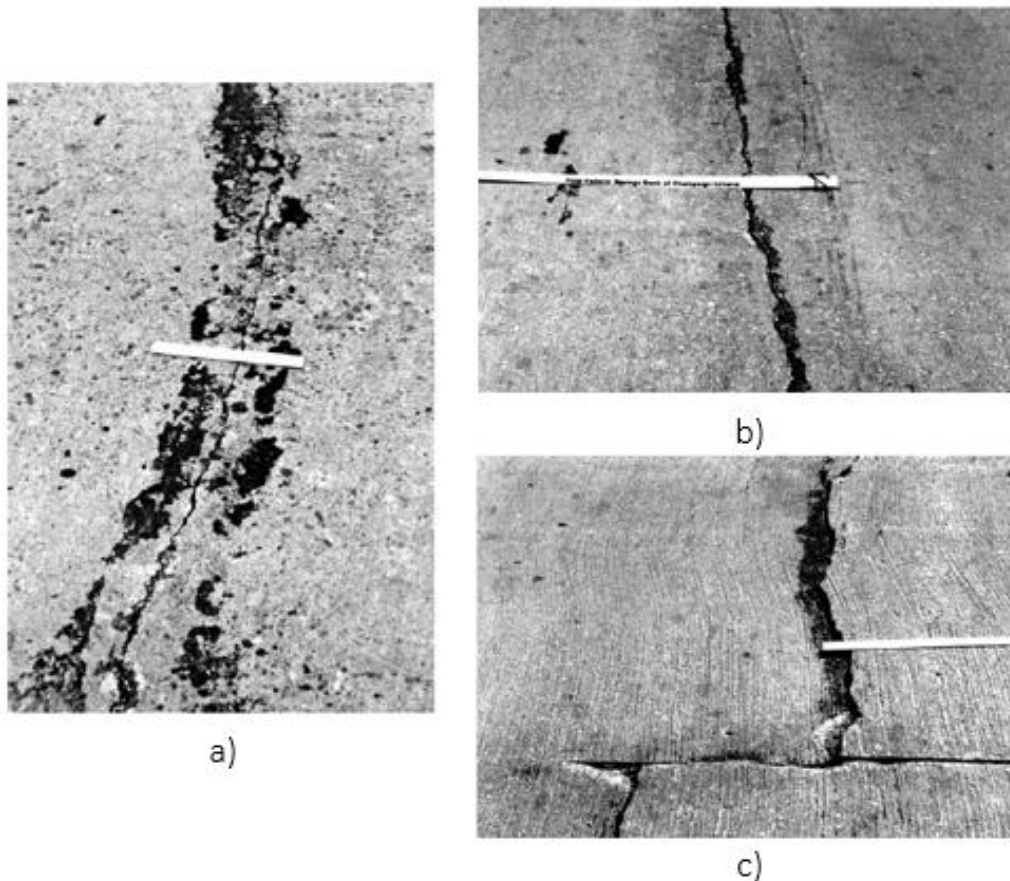


Fig. 9. a) Baja b) Media c) Alta
Niveles de severidad del agrietamiento lineal. ASTM, 2011.

Cómo contar:

Si hay dos grietas de gravedad media dentro de una losa, se contará que la losa tiene una grieta de gravedad alta.

- **Parqueo grande**

Un parche es un área donde el pavimento original se ha eliminado y reemplazado por material de relleno. Esto se puede producir cuando es necesario instalar o dar mantenimiento a algún servicio subterráneo. Se clasifica como parches largos si su área es de más de 0.5 m².

Niveles de severidad:

- ❖ **L:** cuando el parche está funcionando bien, con poco o ningún deterioro (Fig. 10 literal a).
- ❖ **M:** Cuando el parche está moderadamente deteriorado, o se puede ver un descascaramiento moderado alrededor de los bordes, o ambos (Fig. 10 literal b).
- ❖ **H:** si el parche está muy deteriorado (Fig. 10 literal c).

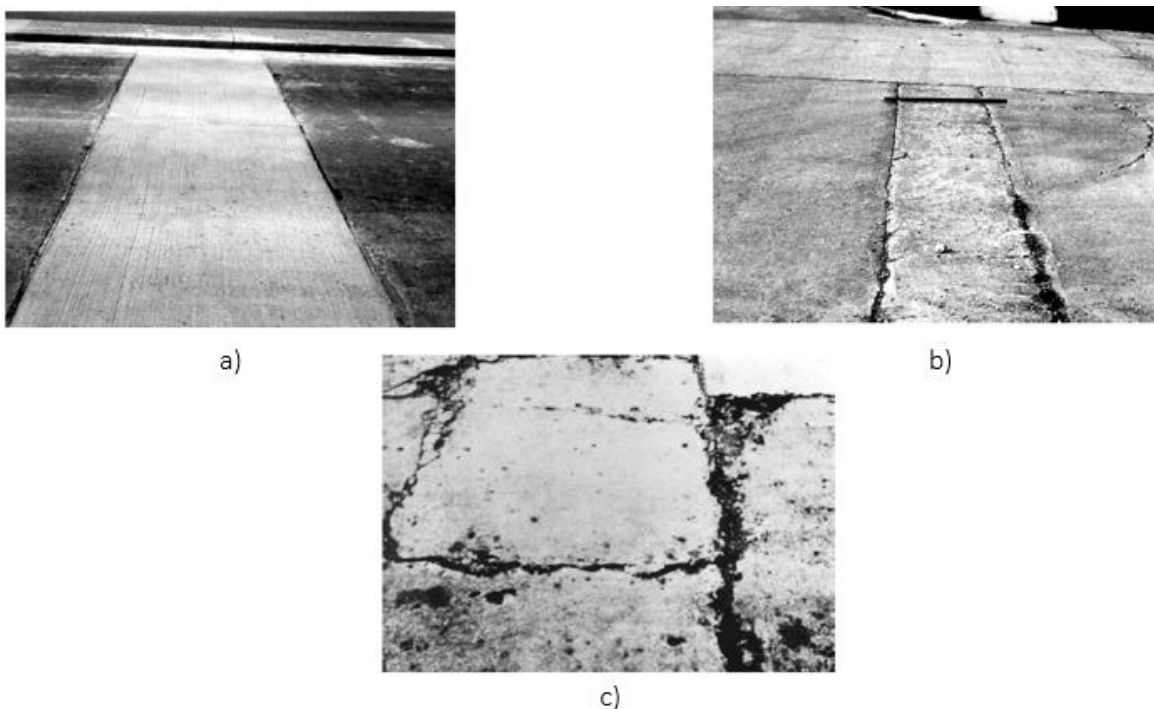


Fig. 10. a) Baja b) Media c) Alta
Niveles de severidad del parche largo. ASTM, 2011.

Cómo contar:

Si una losa individual tiene uno o más parches con el mismo nivel de gravedad, se cuenta como una losa que contiene ese deterioro. Si una sola losa tiene más de un nivel de gravedad, se cuenta como una losa con el nivel de gravedad más alto.

- **Parqueo pequeño**

Se trata de parches de menos de 0.5 m².

Niveles de severidad:

- ❖ **L:** cuando el parche está funcionando bien, con poco o ningún deterioro, ver la Fig. 11.
- ❖ **M:** Cuando el parche está moderadamente deteriorado.
- ❖ **H:** si el parche está muy deteriorado.



Fig. 11. Parcheo pequeño de severidad baja. ASTM, 2011.

Cómo contar:

Si una losa individual tiene uno o más parches con el mismo nivel de gravedad, se cuenta como una losa que contiene ese deterioro. Si una sola losa tiene más de un nivel de gravedad, se cuenta como una losa con el nivel de gravedad más alto.

- **Agregado Pulido**

Se produce cuando las superficies se vuelven suaves al tacto y se reduce considerablemente la adherencia con las llantas. Es causado por aplicaciones de tráfico repetidas.

Niveles de gravedad:

No se definen grados de severidad; sin embargo, el grado de pulido debe ser significativo antes de que se incluya en la encuesta de condición y se califique como un defecto (Fig. 12).

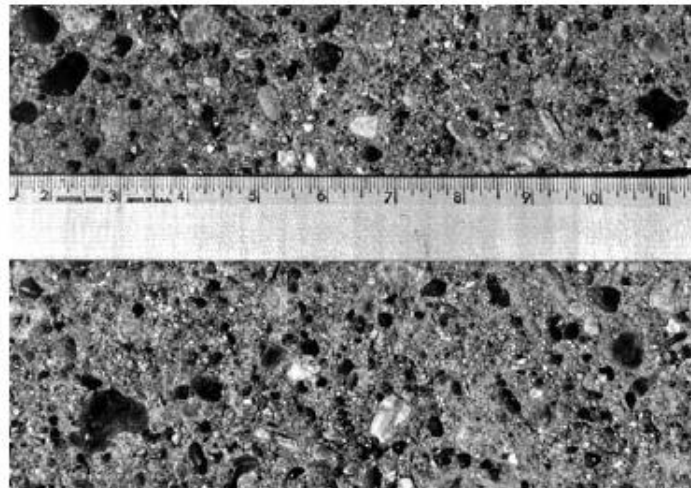


Fig. 12. Agregado Pulido. ASTM, 2011.

Cómo contar:

Una losa con agregado pulido se cuenta como una losa.

- **Huecos**

Es un pequeño trozo de pavimento que se desprende de la superficie debido a la acción de congelación y descongelación, combinado con agregados expansivos. Los huecos suelen tener un diámetro aproximadamente 25 a 100 mm y una profundidad de 13 a 50 mm.

Niveles de gravedad:

No se definen grados de severidad para los huecos; sin embargo, deben ser extensivos antes de que se los considere un deterioro como en la Fig. 13.



Fig. 13. Huecos en losa. ASTM, 2011.

Cómo contar:

Si existe al menos tres huecos en 1 m². Cuando el promedio es mayor que esta densidad, se debe contar la losa.

- **Bombeo**

Es la expulsión o bombeo de material de la base de la losa a través de juntas o grietas (ver Fig.14).



Fig. 14. Bombeo de losa. ASTM, 2011.

Niveles de gravedad:

No se definen los grados de gravedad.

Cómo contar:

Una junta de bombeo entre dos losas se cuenta como dos losas; sin embargo, si las juntas restantes alrededor de la losa también están bombeando, se agrega una losa por cada junta de bombeo adicional.

- **Cruce de Ferrocarril**

Este tipo de falla se caracteriza por depresiones o golpes alrededor de las vías de ferrocarril como se indica en la Fig. 15.



Fig. 15. Deterioro de cruce de ferrocarril de severidad alta. ASTM, 2011.

Niveles de severidad:

- ❖ **L:** ocasiona una calidad de conducción de baja severidad.
- ❖ **M:** provoca una calidad de conducción de gravedad media.
- ❖ **H:** provoca una calidad de conducción de alta severidad, ver Fig. 15.

Cómo contar:

Se cuenta el número de losas cruzadas por las vías del ferrocarril. Cualquier gran bache creado por las pistas se debe contar como parte del cruce.

- **Despedazamiento**

Es cuando un área localizada de la losa se rompe en pedazos tomando muchas formas diferentes, pero generalmente se definen por una grieta y una articulación. Este tipo de deterioro se genera comúnmente debido a un grosor inadecuado de la losa o pérdida de soporte de la cimentación.

Niveles de severidad:

La Tabla 5 detalla la clasificación de los niveles de severidad para el despedazamiento. Y para determinar su severidad primero se debe determinar la severidad de las grietas que poseen el mayor porcentaje y luego contabilizar el número de piezas en las que se encuentra dividida la porción de losa.

Tabla 5. Niveles de severidad del Despedazamiento. ASTM, 2011.

Severidad de la mayoría de grietas	Número de piezas		
	2 a 3	4 a 5	>5
L	L	L	M
M	L	M	H
H	M	H	H

En la Fig. 16 se puede comprender de mejor manera los diferentes tipos de severidad.

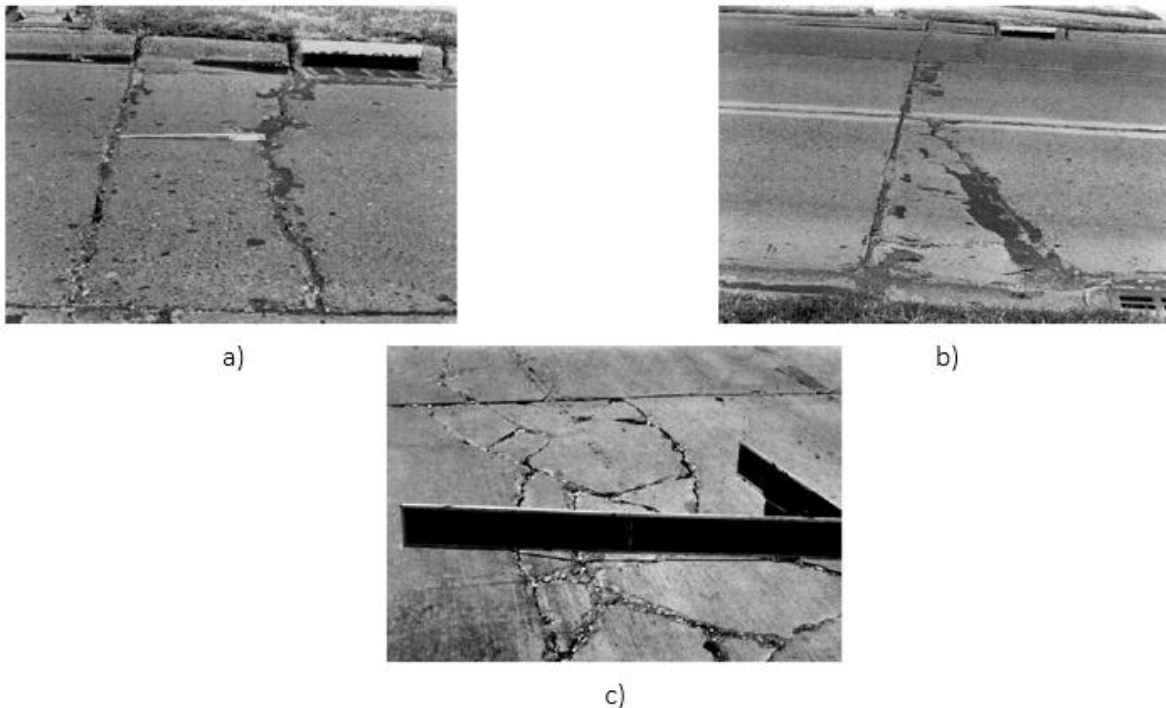


Fig. 16. a) Baja b) Media c) Alta
Niveles de severidad del despedazamiento. ASTM, 2011.

Cómo contar:

Si una losa contiene más de un despedazamiento o un despedazamiento y una grieta, se cuenta como destrozado.

- **Mapa de grietas**

Se refiere a una red de grietas finas que se extienden solo a través de la superficie superior del concreto, mismas que tienden a cruzarse en ángulos de 120° . Este tipo de daño puede ser causado por el exceso de acabado del concreto provocando una incrustación en la superficie a una profundidad aproximada de 6 a 13 mm. O en algunas ocasiones es generado por fases de deshielo, construcción inadecuada, ciclos de congelación-descongelación y agregado pobre.

Niveles de severidad:

- ❖ **L:** cuando las grietas de mapa existen en la mayor parte del área de la losa; la superficie está en buenas condiciones, con escamas menores presentes (Fig. 17 literal a).
- ❖ **M:** la losa se escama, pero menos del 15% de la losa se ve afectada (Fig. 17 literal b).
- ❖ **H:** la losa se escama en más del 15% de su área (Fig. 17 literal c).

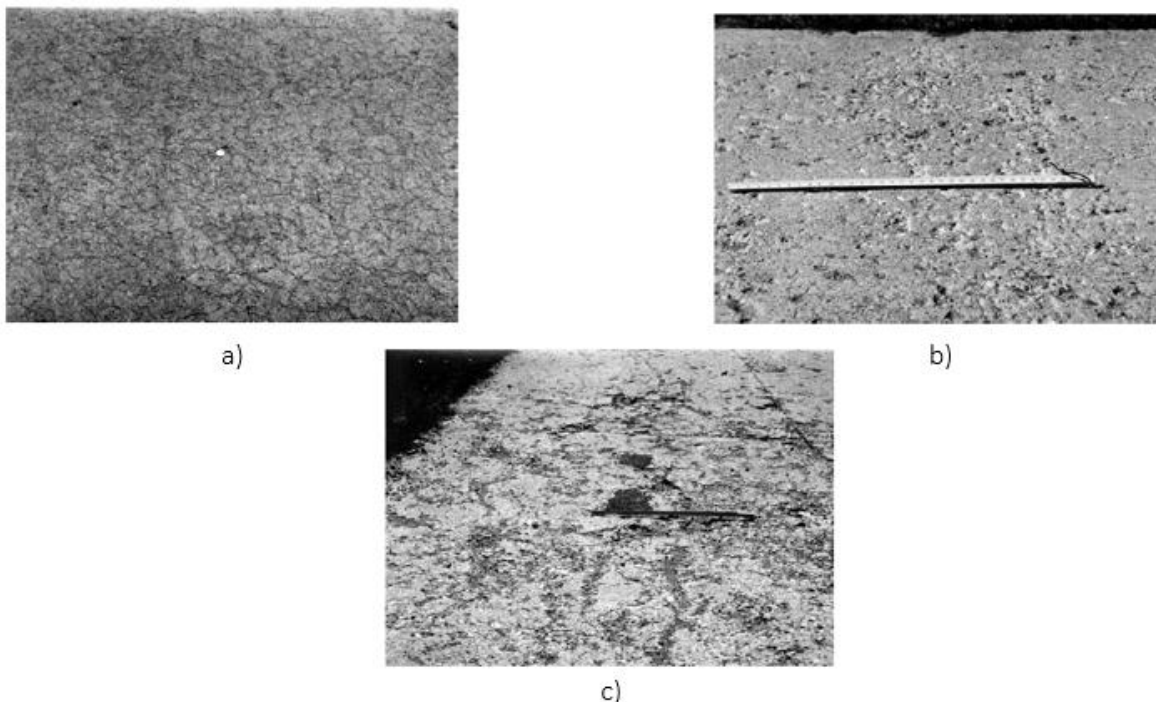


Fig. 17. a) Baja b) Media c) Alta
Niveles de severidad de Mapa de Grietas. ASTM, 2011.

Cómo contar:

Una losa escamada se cuenta como una losa. El agrietamiento de gravedad baja se debe considerar solo si el potencial de escalamiento parece ser inminente o si salen algunas piezas pequeñas.

- **Grietas de Contracción**

Son las grietas de menos de 3 mm de ancho y con una longitud menor a 2 metros, además, no se extienden a través de toda la losa. Se forman durante el fraguado y curado del hormigón de la losa.

Niveles de severidad:

No se definen los grados de gravedad y se presentan como en la Fig. 18.

Cómo contar:

Si hay grietas de contracción en una losa en particular, la losa se cuenta como una losa con grietas de contracción.



Fig. 18. Grietas de Contracción en losa. ASTM, 2011.

- **Desprendimiento de esquina**

Es la rotura de las esquinas de la losa a una distancia máxima de 50 cm de la esquina, pero si se desprende a menos de 13 cm de la esquina en ambos lados no debe contarse con este deterioro. Los ejemplos de este tipo de deterioro se pueden apreciar en la Fig. 19.

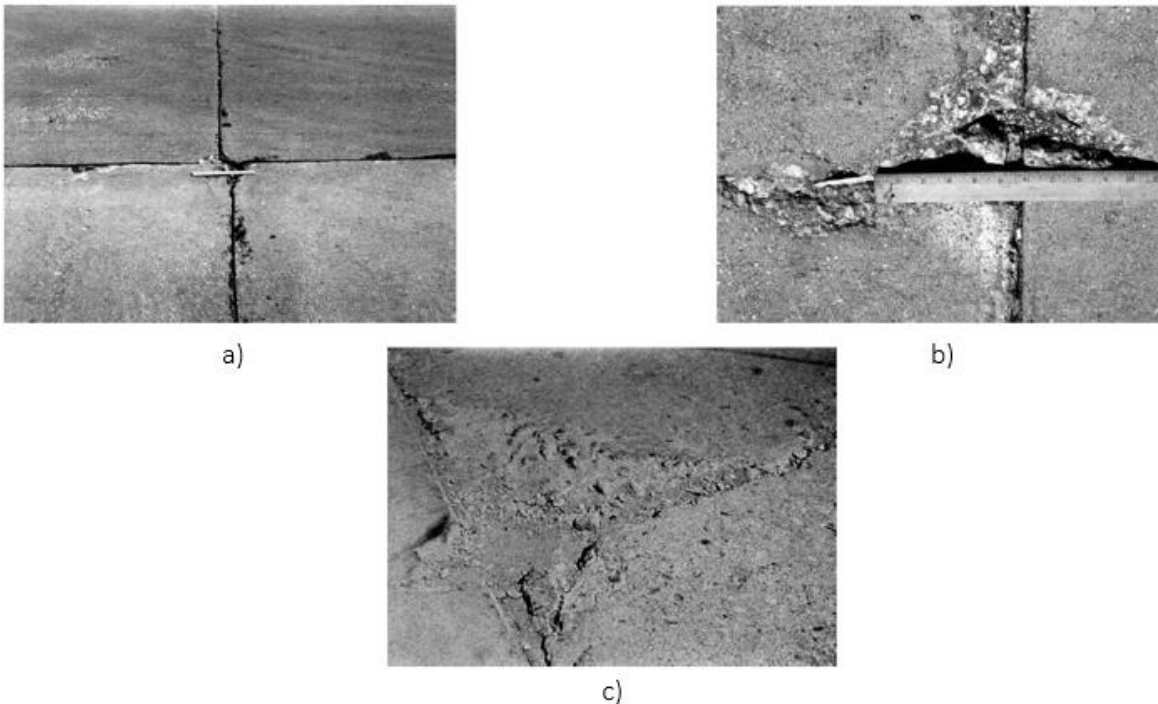


Fig. 19. a) Baja b) Media c) Alta
Niveles de severidad del desprendimiento de esquina. ASTM, 2011.

Niveles de severidad:

La Tabla 6 enumera los niveles de severidad para el desprendimiento de esquina, mismo que está en función de la profundidad y el área de desprendimiento.

Tabla 6. Niveles de severidad para Desprendimiento de Esquina. ASTM, 2011.

Profundidad del desprendimiento (mm)	Dimensiones de los lados (mm)	
	> 130 x 130 y < 300 x 300	> 300*300
< 25	L	L
>25 y < 50	L	M
>50	M	H

Cómo contar:

Si una o más casillas de esquina con el mismo nivel de gravedad se encuentran en una losa, la losa se cuenta como una losa con espaciado de esquina. Si se produce más de un nivel de gravedad, se cuenta como una losa con mayor nivel de severidad.

- **Desprendimiento de junta**

Es la rotura de los bordes de la losa dentro de los 50 cm de la junta. Es causado por esfuerzos excesivos en la junta, concreto débil en la junta y por acumulación de agua en la unión.

Niveles de severidad:

La Tabla 7 muestra la clasificación de los niveles de severidad, dependiendo del ancho y longitud del desprendimiento.

Tabla 7. Niveles de severidad para el desprendimiento de juntas. ASTM, 2011.

Piezas	Ancho (mm)	Longitud (m)	
		< 0.5	> 0.5
Pueden faltar algunas piezas	< 100	L	L
	>100	L	L
Faltan algunas piezas; y si falta la mayoría, el desprendimiento es de menos de 25 mm	< 100	L	M
	>100	L	M
Falta la mayoría o todas las piezas	< 100	L	M
	>100	M	H

Cómo contar:

Si el espaldón está a lo largo del borde de una losa, se cuenta como una losa con desprendimiento de junta. Si se produce en más de un borde de la misma losa, se registra como una losa con la mayor severidad.

Los ejemplos de los 3 niveles de severidad del desprendimiento de juntas se ilustran en la Fig. 20:

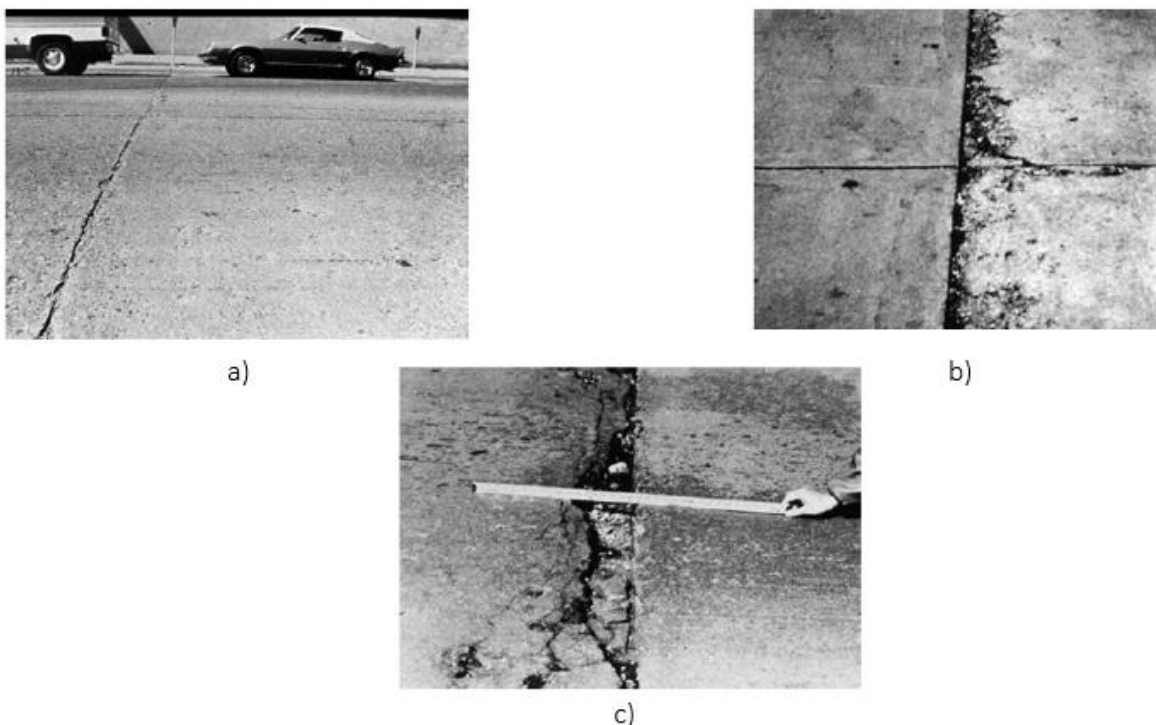


Fig. 20. a) Baja b) Media c) Alta
Niveles de severidad del desprendimiento de junta. ASTM, 2011.

2.3 Rugosidad y textura

La rugosidad de una carretera se define como "la variación en la elevación de la superficie que induce vibraciones en los vehículos que atraviesan", e históricamente ha sido reconocida durante mucho tiempo como una medida importante del rendimiento de la carretera. Las irregularidades de la superficie del pavimento propician aceleraciones verticales a los vehículos en movimiento y hacen que la circulación se vuelva incómoda, insegura y antieconómica, y a su vez, las cargas dinámicas de las ruedas están implicadas como factores causantes del deterioro de la carretera. (Sayers et al., 1986a). El perfil de la carretera contiene infinidad de irregularidades, conformadas por un conjunto de ondas aleatorias de frecuencia múltiple que se producen con diferentes amplitudes y longitudes de onda, tanto en sentido longitudinal como transversal, siendo las que ocurren en sentido longitudinal las que tienen un mayor efecto sobre las fuerzas indeseables que se presentan en los vehículos (NEVI, 2012).

El perfil del pavimento está dado por el desplazamiento a lo largo de su superficie y por el desplazamiento en dirección normal a ella. Al primero se le llama distancia y al segundo amplitud, como se ilustra en la Fig. 21. La distancia puede ser medida en sentido longitudinal o transversal a la dirección de marcha. Se denomina longitud de onda a la distancia mínima existente entre partes de la curva que se repiten periódicamente en dirección longitudinal al plano del pavimento, y amplitud a la mitad de la distancia entre la cresta y la base de la irregularidad (NEVI, 2012).

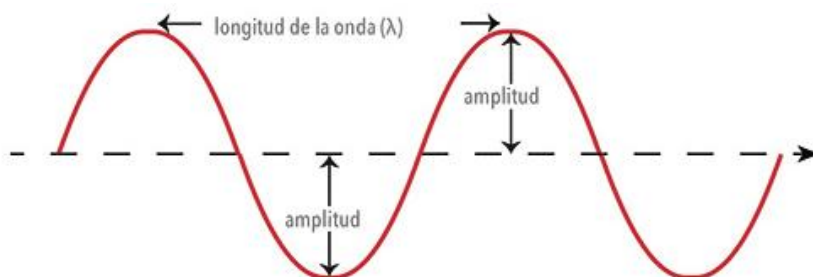


Fig. 21. Amplitud y longitud de onda. NEVI, 2012.

La textura es de manera similar una propiedad física superficial del pavimento, se define como la geometría más fina del perfil longitudinal de una carretera. En el informe del Comité Técnico de Características Superficiales de la Asociación Mundial de Carreteras PIARC, presentado en el Congreso Mundial de Carreteras del año 1987, se propuso una clasificación de las características geométricas superficiales, con base en las longitudes de onda y las amplitudes de las irregularidades, como se expone en la tabla 8:

Tabla 8. Clasificación de las irregularidades superficiales de un pavimento. NEVI, 2012.

CARACTERÍSTICA		LONGITUD DE ONDA (mm)	AMPLITUD (mm)
Microtextura		0 - 0.5	0.001 - 0.5
Macrotextura		0.5 - 50	0.01 - 20
Megatextura		50 - 500	0.1 - 50
Regularidad superficial	Ondas cortas	500 - 5000	1 - 20
	Ondas medias	5000 - 15000	5 - 50
	Ondas largas	15000 - 50000	10 - 200
Trazado		> 50000	10 - 5000

Los conceptos de la Tabla 8 se definen a continuación:

- ❖ **Microtextura:** es la desviación que presenta su superficie en relación con una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal, inferiores a 0.5 mm, correspondiente a la textura superficial propia de los agregados pétreos. Se distinguen dos niveles de microtextura: áspera y pulida. La microtextura es importante para la adherencia entre el neumático y el pavimento, y, por lo tanto, para la resistencia al deslizamiento. Infiere adversamente en el desgaste de los neumáticos y en el ruido en las altas frecuencias del espectro acústico, de lo cual depende exclusivamente de las características del agregado y de su susceptibilidad al desgaste producido por el contacto con el neumático (NEVI, 2012).
- ❖ **Macrotextura:** es la desviación que presenta su superficie en relación con una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal comprendidas entre 0.5 y 50 mm, se refiere a la textura superficial del pavimento, proveniente del efecto conjunto de las partículas de los agregados pétreos debido a su distribución (separación entre partículas) y a la mayor o menor elevación de las partículas por sobre el plano base de la superficie del pavimento. Se pueden definir tres niveles de macrotextura: profunda, media y lisa. Tiene gran importancia, debido a que proporciona los intersticios necesarios para el escurrimiento del agua por el pavimento, de modo tal que la película de agua que sirve de fase entre el

neumático y el pavimento, mantenga un cierto espesor que permita el contacto entre neumático y pavimento (Gaete et al., 1988).

- ❖ **Megatextura:** es la desviación que presenta su superficie con respecto a una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal entre 50 y 500 mm. Corresponde a irregularidades relacionadas con la construcción y también a diversos tipos de fallas y degradaciones. Esta gama de irregularidades aumenta la resistencia al rodamiento y el nivel de ruido con frecuencias bajas. Incomoda al desplazamiento, con vibraciones y dificultades para mantener la estabilidad de avance y contribuye con el desgaste de las llantas (NEVI, 2012).
- ❖ **La regularidad superficial:** llamada también rugosidad, es la desviación que presenta la superficie con respecto a una superficie plana con dimensiones características en sentido longitudinal correspondientes a una longitud de onda comprendida entre 0.5 y 50 metros. Los defectos de regularidad existentes influyen en la masa suspendida de los vehículos, afectando la comodidad de viaje de los pasajeros. Longitudes de onda mayores a las que identifica la regularidad superficial, corresponden a las características geométricas del perfil de la carretera (NEVI, 2012).

En la Fig. 22, se muestran las características geométricas de la textura, las longitudes de onda asociadas a cada tipo y combinaciones de micro y macrotextura que pueden aplicarse al pavimento.

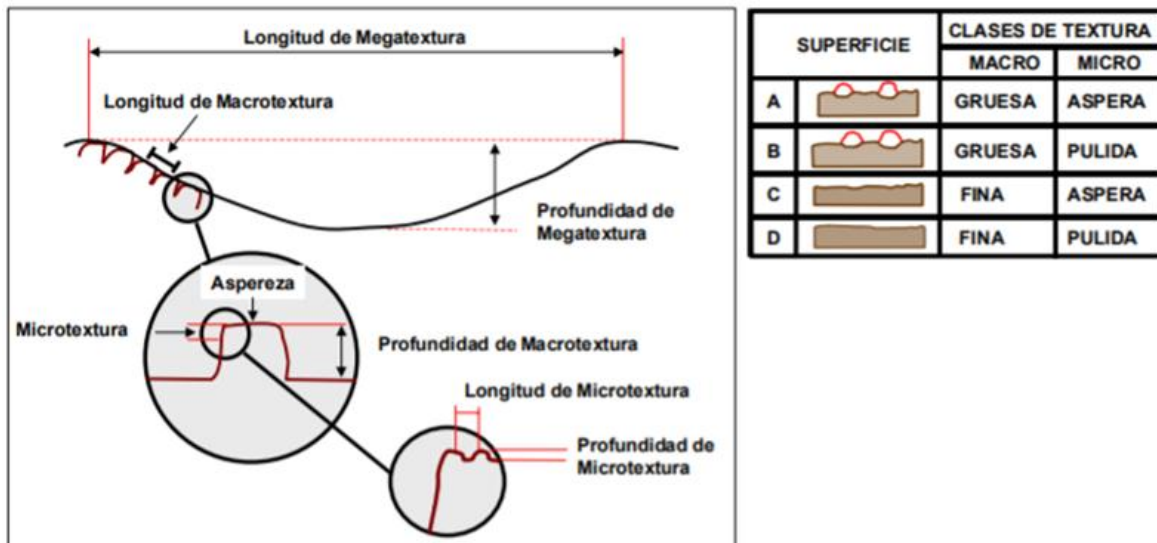


Fig. 22. Tipos de textura de un pavimento. PIARC, 1995.

2.4 Índice de rugosidad internacional (IRI)

El IRI se define como la relación entre el movimiento acumulado entre las masas amortiguada y no amortiguada de un modelo matemático denominado "cuarto de carro" (cuya respuesta es semejante a la de un automóvil) que circula a una velocidad de 80 kilómetros por hora, y la distancia recorrida. El IRI es una medida de rugosidad estandarizada relacionada con medidores del tipo respuesta o



sistemas de medición de rugosidad por reacción (RTRRMS), con unidades recomendadas: metros por kilómetro (m/km), o su equivalente en milímetros por metro (mm/m) (NEVI, 2012).

2.4.1 Antecedentes

El Experimento Internacional de Rugosidad de Carreteras (IRRE) fue propuesto para encontrar las prácticas más apropiadas para los distintos tipos de equipos de medición de rugosidad que se usan actualmente. Al mismo tiempo, el IRRE fue planeado para proporcionar un medio para comparar los datos de rugosidad obtenidos por diferentes procedimientos e instrumentos. Esta investigación fue necesaria debido a que los diferentes métodos utilizados para caracterizar la rugosidad de la carretera generalmente no daban resultados equivalentes. En algunos casos, las medidas no son consistentes ni estables con el tiempo. Por lo tanto, la utilización de datos de rugosidad puede ser difícil, particularmente cuando se consideran los datos de rugosidad obtenidos por más de un método, por lo que un índice de rugosidad estándar podría usarse para eliminar la mayoría de estos problemas.

El equipo incluyó dos categorías. En la primera, los métodos profilométricos, que miden el perfil de elevación longitudinal de la carretera y luego se analizan para obtener uno o más índices de rugosidad. Se emplearon métodos manuales semi-estáticos y perfiles de alta velocidad en el IRRE. En la segunda categoría, Sistemas de medición de rugosidad de carretera de tipo respuesta (RTRRMS), en donde un vehículo está equipado con un dispositivo medidor de carretera. El medidor de carretera produce una lectura de rugosidad como resultado de los movimientos del vehículo que se producen al atravesar la carretera. Siete RTRRMS participaron en el experimento, incluidos cinco que consistieron en los medidores instalados en vehículos ordinarios y dos remolques equipados con el medidor. Cada RTRRMS tomó medidas repetidas en todos los sitios a varias velocidades.

Los análisis de los datos recopilados mostraron que todos los RTRRMS proporcionan medidas altamente correlacionadas cuando se operan a la misma velocidad de prueba, y que todos pueden calibrarse en una sola escala de rugosidad sin comprometer su precisión. Varios de los índices de rugosidad basados en perfiles mostraron una excelente correlación con las medidas de los RTRRMS. Por lo tanto, se propone un único índice, llamado Índice de Rugosidad Internacional (IRI). El IRI se puede medir con todos los equipos de medición de rugosidad incluidos en el IRRE, y también es compatible con casi todos los equipos utilizados en todo el mundo.

Este experimento fue realizado por un gran número de equipos de investigación incluyendo la Compañía Brasileña de Planificación de Transporte (GEIPOT), el Instituto Brasileño de Investigación de Carreteras (IPRIDNER), el Banco Mundial (IBRD), el Laboratorio Francés de Puente y Pavimento (LCPC) y el Laboratorio Británico de Investigación de Transporte y Carreteras (TRRL); con el objetivo de identificar dicho índice. El IRRE se realizó en Brasilia, Brasil en 1982 e implicó la medición controlada de la rugosidad de la carretera para una serie de caminos en una variedad de condiciones y por una variedad de instrumentos y métodos. La escala de rugosidad seleccionada como IRI fue la que mejor cumplió los criterios de ser estable en el tiempo, transportable y relevante, mientras que todos los practicantes la pueden medir fácilmente (Sayers et al., 1986a).

También lograron demostrar que el perfil particular característico que define el IRI es directamente mensurable por la mayoría de los métodos profilométricos. Al mismo tiempo, la característica del perfil IRI es tan altamente compatible con las medidas obtenidas por RTRRMS que estos instrumentos se pueden calibrar a la escala IRI para lograr la mejor (o casi la mejor) precisión posible

con este tipo de instrumento. El IRI también está fuertemente relacionado con las opiniones subjetivas sobre la rudeza del camino que se pueden obtener del público, debido a que el IRI: 1) puede ser medido por muchos métodos profilométricos, 2) es altamente correlacionado con las medidas de RTRRMS, y 3) es altamente correlacionado con la opinión subjetiva, es una escala altamente transportable (Sayers et al., 1986b). En la Fig. 23 se puede apreciar el rango aproximado de rugosidad de IRI en diferentes tipos de carreteras.

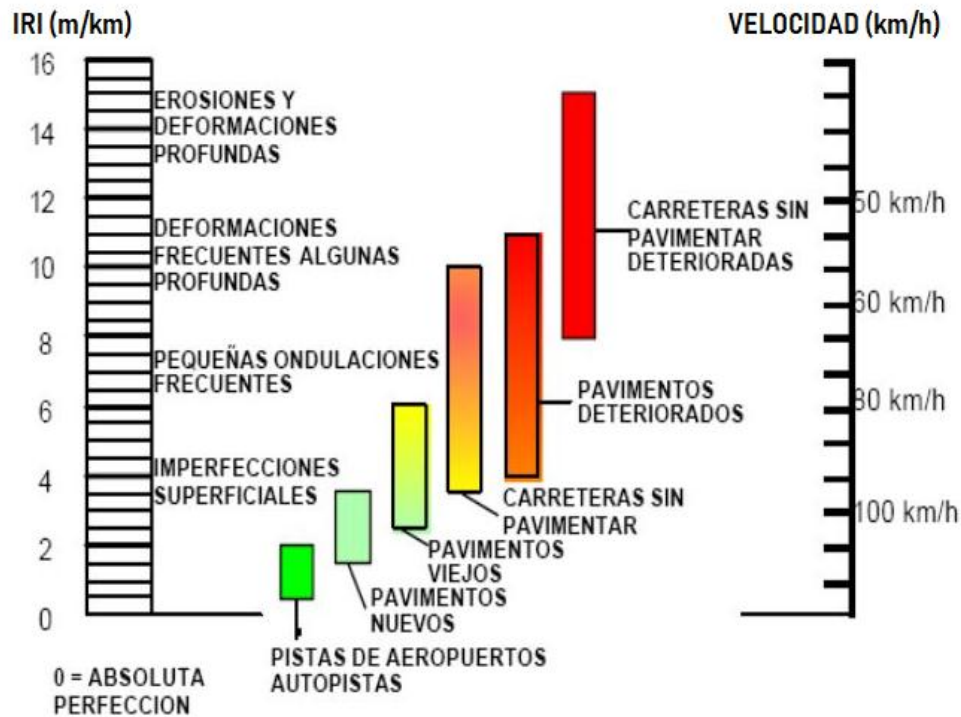


Fig. 23. Escala IRI. Sayers et al., 1986b.

Se establecen parámetros para la construcción y mantenimiento en el Ecuador, basados en experiencias y conocimientos, en forma de normas técnicas que hay que cumplir en determinados procesos o servicios. En el Ecuador, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) es la entidad encargada de imponer las normativas para la actividad ingenieril, a través de la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI).

2.4.2 Norma ecuatoriana

Esta Norma tiene por objetivo establecer los requisitos mínimos para el diseño, construcción, rehabilitación, mantenimiento y reposición de pavimentos, desde los puntos de vista de la mecánica de suelos y de la ingeniería de pavimentos a fin de asegurar la durabilidad, el uso racional de los recursos y el buen comportamiento de aceras, pistas y estacionamientos de pavimentos urbanos, a lo largo de su vida de servicio.

En el sexto volumen de la NEVI-12, correspondiente a "Conservación vial", en su capítulo 6.200 "Manual de estudios para programar obras de conservación de pavimentos de carreteras", en la subsección 6.203.3 "Medición del perfil y de la regularidad superficial del pavimento" existen controles, modelaciones y tolerancias del índice de regularidad (IRI) para el mantenimiento o



rehabilitación del pavimento. El enfoque del presente estudio se buscará cumplir con los parámetros estipulados en lo que concierne a regularidad superficial o rugosidad:

- ❖ Para la mejor interpretación y aplicación de las medidas en los estudios destinados al mantenimiento y a la rehabilitación de pavimentos, éstas se deben realizar en cada carril sobre las huellas de circulación de los vehículos.
- ❖ Los resultados de las mediciones deben ser convertidos a unidades de IRI, bien sea mediante alguna ecuación apropiada de correlación, bien mediante algún programa computacional apropiado.
- ❖ La medición de la rugosidad en pavimentos se realizará finalizada la obra como control final de calidad y aceptación de la misma.
- ❖ El límite establecido para pavimentos asfálticos con gran regularidad superficial es de 2 m/km para volumen de tránsito medio y alto.
- ❖ No hay un límite de regularidad superficial establecido para el caso de pavimentos rígidos. En otros países, por ejemplo, Uruguay, hacen una distinción entre los valores del IRI para cada tipo de pavimento (Arriaga et al., 1998), como se especifica en Tabla 9:

Tabla 9. Límites de IRI aplicados en Uruguay.

Condición del camino	Pavimento asfáltico	Pavimento hidráulico
	IRI (m/km)	IRI (m/km)
Muy bueno	< 3.2	< 2.8
Bueno	3.2 – 3.9	2.8 – 3.5
Regular	4.0 – 4.6	3.6 – 4.3
Malo	> 4.6	>4.3

Dentro de la subsección 6.220.3.5 “Aplicación de los resultados de las medidas de Regularidad Superficial” indican que los resultados de las evaluaciones del perfil superficial del pavimento tienen diversos usos, entre ellos están:

- ❖ Evaluación periódica de las condiciones de comodidad para la circulación vehicular y suministro de información para el cálculo de los costos de operación de los vehículos.
- ❖ Ayuda en la sectorización de las vías que van a ser sometidas a trabajos de rehabilitación y en la selección de estrategias factibles de actuación.
- ❖ Determinación de la calidad de los trabajos de construcción o de rehabilitación de pavimentos, tal como lo establecen las Especificaciones Generales de Construcción de MTOP.

Existen diversas técnicas para medir la rugosidad superficial de los pavimentos. La más conocida a nivel internacional es la propuesta por el Banco Mundial, donde se las divide en 4 clases:

- ❖ Perfiles de precisión.
- ❖ Otros recursos profilométricos.
- ❖ Medidores de rugosidad de tipo respuesta (RTRRMS).
- ❖ Clasificaciones subjetivas y mediciones no calibradas.

2.4.3 Métodos de medición de rugosidad

Los diversos enfoques realizados para medir la rugosidad del camino bajo las mismas unidades estandarizadas en todo el mundo, se pueden agrupar en cuatro clases genéricas propuestas por el Banco Mundial en función de la relación de sus medidas con el IRI, lo que a su vez afecta los requisitos de calibración y la precisión asociada a su uso.

- ❖ Clase 1: Perfiles de precisión. Esta clase representa los más altos estándares de precisión para la medición de IRI. Un método de Clase 1 requiere que se mida el perfil longitudinal a lo largo del recorrido de la llanta como base para calcular el valor de IRI. Para los métodos profilométricos estáticos, la distancia entre las muestras no debe ser superior a 250 mm (4 medidas/metro) y la precisión en las medidas de elevación debe ser de 0,5 mm para los pavimentos muy lisos. En muchos casos, un método que produzca este nivel de precisión tendrá la desventaja asociada de requerir un gran esfuerzo para realizar la medición de rugosidad, debido al costo generado y a la gran cantidad de tiempo que toma para realizar mediciones de tramos pequeños. Los profilómetros de alta velocidad ofrecen un medio potencial para medir IRI rápidamente; sin embargo, el perfilómetro debe validarse en algún momento en comparación con un procedimiento establecido de Clase 1, como varilla y nivel, para comprobar su precisión. La precisión obtenida utilizando un método de esta clase por definición coincide o excede los requisitos de una aplicación determinada, por lo que se considera que el método de Clase 1 es utilizado primordialmente para validar otros métodos o cuando se requieren datos especiales de alta precisión (Sayers et al., 1986b).
- ❖ Clase 2: Otros recursos profilométricos. Esta clase incluye todos los demás métodos en los que se mide el perfil como base para el cálculo directo del IRI, pero que no son capaces de la precisión requerida para una medición de Clase 1. Aunque el hardware y los métodos utilizados para la medición del perfil se verifican funcionalmente mediante un proceso de calibración independiente, están limitados a una precisión menor que la necesaria para calificar como un método de Clase 1. Entre los perfilómetros dinámicos los más conocidos son los de tipo APL francés (Analyseur de Profil en Long) y los de tipo SDP norteamericano (Surface Dynamics Profilometer), conocidos anteriormente como GMR. Proporcionan perfiles a gran velocidad, pero tienen la desventaja de ser los sistemas de instrumentación más costosos y complejos utilizados para medir la rugosidad de la carretera. Sin embargo, ofrecen una gran ventaja al poder obtener mediciones de alta calidad rápidamente, sin requerir un gran esfuerzo para mantener la calibración. Los sistemas más sofisticados usan sistemas de referencia inercial (IRPS) y se pueden medir y registrar el perfil longitudinal desplazándose a velocidades hasta de 100 kilómetros por hora. Estos equipos miden y computan el perfil longitudinal mediante la creación de una referencia inercial a través del uso de acelerómetros colocados en la carrocería del vehículo de medición, para medir el movimiento vertical de ésta. En consecuencia, el valor de IRI calculado a partir de una medición de perfil de Clase 2 puede no ser exacto al límite práctico debido a errores aleatorios o de sesgo en un rango de condiciones (Sayers et al., 1986b).
- ❖ Clase 3: Medidores de rugosidad de tipo respuesta (RTRRMS). Se definen como estimaciones de IRI a partir de ecuaciones de correlación, mediante el empleo de los medidores del tipo respuesta o sistemas de medición de rugosidad por reacción (RTRRMS). Estos equipos cuentan con un dispositivo que detecta los movimientos verticales del eje de un automóvil o del eje de un remolque, respecto de la carrocería del vehículo, a medida que éste se desplaza sobre la carretera, y los transmite a un microprocesador que registra la condición superficial del pavimento en milímetros o pulgadas acumuladas de movimiento

relativo sobre una determinada distancia recorrida (ver Fig. 24). Por el momento, la mayoría de los datos de rugosidad del camino que se recogen en todo el mundo se obtienen con RTRRMS, estos medidores han sido ampliamente utilizados por su bajo costo de adquisición y operación, por la facilidad de su manejo y por el alto rendimiento en las mediciones. La medida de RTRRMS depende de la dinámica de un vehículo para escalar las mediciones y producir propiedades de rugosidad comparables con el IRI (Sayers et al., 1986b). Las propiedades dinámicas son únicas para cada vehículo, sin embargo, cambian con el tiempo debido a que la dinámica de un vehículo cambia fácilmente, se deben emplear procedimientos de operación y mantenimiento muy rigurosos para los vehículos utilizados, y las pruebas de control deben convertirse en una parte rutinaria de las operaciones normales. Cuando ocurren cambios, no hay una corrección simple que pueda aplicarse; en su lugar, todo el sistema del vehículo de carretera debe ser recalibrado nuevamente.

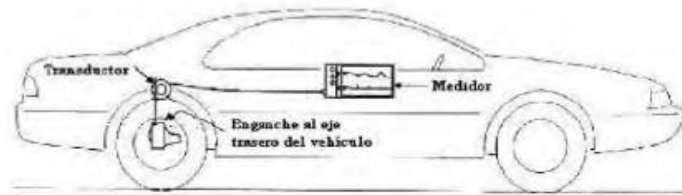


Fig. 24. Esquema de RTRRM. NEVI, 2012.

Por lo tanto, los RTRRMS no miden el perfil real de la carretera, sino un efecto dinámico de las irregularidades del mismo, el cual puede ser atenuado o amplificado, dependiendo del sistema mecánico del vehículo. Entre sus inconvenientes está el hecho de que la respuesta es sensible al tipo de vehículo donde está instalado el medidor, a las características de la suspensión del mismo, a la presión de inflado de las llantas y a la velocidad y a la distribución del peso del vehículo; por lo que requieren calibración frecuente para asegurar la precisión y la repetitividad de las medidas (NEVI, 2012).

Un método para medir la rugosidad califica como Clase 3 si utiliza el enfoque de "calibración por correlación", independientemente del tipo de instrumentación o vehículo que se utilice para obtener la medida de rugosidad no corregida. Si un RTRRMS no se calibra por correlación, no califica como un método de Clase 3. Sin la calibración, no existe un vínculo confiable de las medidas obtenidas con RTRRMS cualquiera, ni a la escala IRI (Sayers et al., 1986b).

- ❖ Clase 4: Clasificaciones subjetivas y mediciones no calibradas. Hay situaciones en las que se necesita una base de datos de rugosidad, pero una alta precisión no es esencial o no se puede obtener. Aun así, es deseable relacionar las medidas con la escala IRI. En esos casos, se puede usar una evaluación subjetiva que involucre una experiencia de viaje en la carretera o una inspección visual, otra posibilidad es usar las medidas de un instrumento no calibrado. Se debe tomar en cuenta que a menos que se use una calibración válida por correlación con un RTRRMS, no hay forma de vincular la medida a la escala estándar. Por lo tanto, un RTRRMS no calibrado se incluye dentro de la Clase 4 (Sayers et al., 1986b).

El IRI se obtiene comúnmente de los perfiles de carretera longitudinales medidos. Desde su introducción en 1986, la escala del IRI se ha utilizado comúnmente en todo el mundo para evaluar y gestionar sistemas viales. Sin embargo, desde finales de la década de 1960, la mayoría de los perfiles de carreteras se realizan con instrumentos de alta velocidad de perfilado de carreteras. Las técnicas

tradicionales modernas para medir la rugosidad pueden clasificarse como camiones especialmente contruidos, vagones con escáneres láser o vagones de choque. Los equipos de medición especialmente contruidos son costosos, debido al hardware pesado y complejo, el bajo volumen de producción, la necesidad de sistemas y accesorios sofisticados y la recopilación y el análisis de datos a menudo requieren mucho tiempo. La recopilación de datos de rugosidad basada en teléfonos inteligentes que esencialmente son un RTRRMS, como por ejemplo Roadroid, se puede realizar a un bajo costo y monitorear los cambios diariamente (Forslof y Jones, 2015).

2.5 Roadroid

La aplicación para teléfonos inteligentes Roadroid (ver Fig. 25) proviene de los términos: “road”, camino, y “droid” por Android, el sistema operativo en el cual esta aplicación está codificada. Roadroid es un sistema para monitorear la condición de las vías, por medio de un teléfono inteligente, consiste en: 1) una aplicación que recoge las vibraciones de la carretera con la función de un acelerómetro incorporado en el teléfono, y del GPS para posicionarlo. 2) un servicio de internet para monitoreo y transferencia de los datos de la condición de la vía, utilizado para el sistema de gestión del mantenimiento de las vías.



Fig. 25. Logo de la aplicación Roadroid. Roadroid, 2017.

La aplicación cuantifica la rugosidad superficial de la vía usando la información obtenida por las vibraciones medidas por los acelerómetros, instalados en los teléfonos inteligentes y convirtiéndolas en unidades IRI a través de ecuaciones de correlación lineal, para un estimado, o mediante una simulación de cuarto de carro para datos más precisos. Realiza dos ensayos simultáneamente para determinar la rugosidad de manera estimada y calculada. En general, los teléfonos inteligentes están equipados con un acelerómetro de 3 ejes que proporciona las medidas de aceleración en m/s^2 a lo largo de cada uno de los ejes x, y, z. Varios estudios han explorado el uso de acelerómetros que vienen con teléfonos inteligentes para detectar hundimientos en la carretera y anomalías (Gonzalez et al., 2008). Los datos se almacenan en el teléfono y luego son trasladados por WiFi o 3G a un servidor.

La recolección de datos se puede hacer con diferentes métodos, de acuerdo a los niveles de calidad descritos en la sección anterior. Roadroid recoge datos del IRI de utilizando métodos de segunda y tercera clase:

- ❖ En comparación con la clase 1 es muy fácil de usar y económico. También puede utilizarse donde es imposible utilizar equipo pesado, complejo y costoso.
- ❖ En comparación con clase 4 Roadroid es objetivo, altamente portátil y da una recopilación de datos potente y eficaz (Roadroid, 2017).



2.5.1 Inicios de Roadroid

El equipo de Roadroid, liderado por los ingenieros suecos Hans Jones y Lars Forslof, ha estado trabajando en un lenguaje de programación para dispositivos móviles, *mobile ITS*, a mediados de los años noventa, particularmente con la recopilación de datos móviles, información meteorológica de la vía y bases de datos de carreteras. Durante una visita al *Transportation Research Board* en Washington en 2001, se presentó un proyecto que monitoreaba la velocidad de los camiones de transporte, de manera que se podía estimar las condiciones del pavimento. Por lo que la idea principal era agregar medidas de vibración en el monitoreo.

El primer boceto fue hecho en el 2001 y junto con el *Royal Institute of Technology*, se construyó un primer piloto en 2002-2003. En ese momento, utilizaron un acelerómetro de alta resolución en el eje trasero de un vehículo, conectado por cable a una computadora portátil a través de un amplificador de señal. Los resultados iniciales fueron prometedores y la Administración Nacional de Carreteras de Suecia (SNRA) financió un proyecto para desarrollar y validar aún más el prototipo. El sistema fue desarrollado para una computadora PC con Windows incorporada con capacidades externas de GPS (sistema de posicionamiento global) y GSM (sistema global para comunicaciones móviles), con una placa especial analógica/digital conectada al acelerómetro.

Se realizó una validación entre las inspecciones visuales y las mediciones de los sistemas en el foro de transporte en Linköping en 2005. Esta investigación se basó en 35 segmentos de 100 metros que se evaluaron individualmente de acuerdo con cuatro clases de condiciones de la carretera. Se realizó un análisis del módulo MATLAB en muestras de referencia de secciones específicas de las cuatro clases de condiciones.

Luego se realizó un análisis de regresión con reglas basadas en:

- ❖ niveles de amplitud del acelerómetro;
- ❖ algoritmos de raíz cuadrada media (RMS);
- ❖ velocidad medida del vehículo;
- ❖ longitud de datos de muestra.

El análisis mostró que una sola prueba con el sistema podría clasificar correctamente hasta un 70% en comparación con un promedio de inspecciones visuales expertas subjetivas. En 2010, se dieron cuenta de que los teléfonos inteligentes modernos también incluyen un acelerómetro dentro de su sistema, por lo que una vez conocido sobre la incorporación de los acelerómetros en los teléfonos inteligentes, propusieron varias ideas para usarlos. Usaron las vibraciones producidas en el carro para determinar las respuestas del mismo cuando pasaban sobre los deterioros superficiales de las vías.

Durante el año 2012 solicitaron a varias ciudades que fueran los primeros en adoptar la aplicación, obteniendo excelentes resultados, convirtiéndose en la ganadora del *European Satellite Navigation Competition*. En el año 2013 consiguieron clientes con licencia en Suecia y ganó el Premio *UN World Summit*, como la mejor aplicación de administración electrónica móvil. Para vías de bajo volumen, Roadroid es accesible, fácil de usar, rentable, objetiva y portátil. En vías de alto estándar, para los registros automatizados Roadroid da una posibilidad para monitorear los cambios de rugosidad que aparecen en el transcurso del tiempo, abriendo nuevas perspectivas a la gestión de activos y desempeño basado en el mantenimiento (Forslof y Jones, 2015).

2.5.2 IRI estimado y calculado

Dentro de la aplicación Roadroid, destacan la diferencia entre la rugosidad y la textura. La rugosidad se conoce comúnmente como IRI y la textura se denomina como micro/macro texturas, la corrugación muy pequeña de un pavimento, en la Fig. 26 se observa posibles casos que se pueden presentar sobre la superficie del pavimento

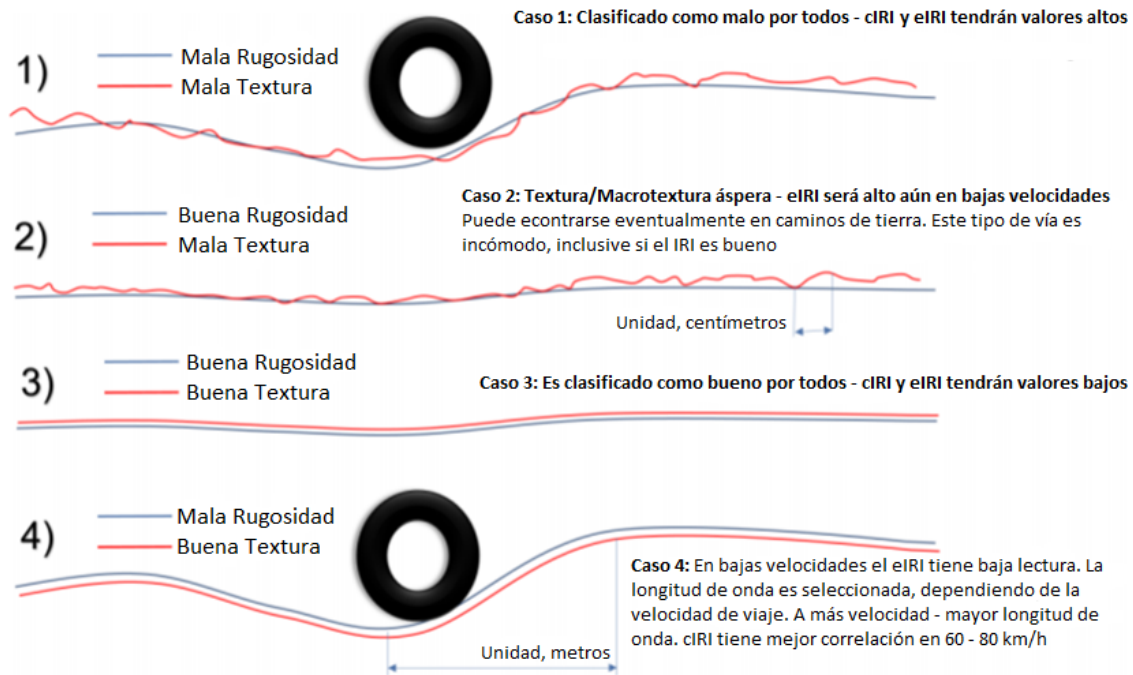


Fig. 26. Casos posibles de rugosidad – textura. Forslof, 2014.

Con frecuencia, la rugosidad y la textura se correlacionan con las carreteras pavimentadas, lo que significa que, si aumenta el IRI, la textura empeorará y viceversa, pero hay algunas excepciones, en donde las carreteras con un pavimento liso pueden tener valores altos de IRI, como en el caso 4, y las carreteras con pérdida de pavimento pueden tener una buena rugosidad, pero una textura pobre. Otro caso es que los caminos de grava tienen una textura extremadamente pobre pero una aspereza decente, como en el caso 2. La aplicación tiene dos opciones para el cálculo de rugosidad:

- ❖ eIRI (IRI estimado) - basado en un análisis de vibración pico y raíz cuadrada media. La configuración se encuentra establecida, pero está hecha para tres tipos de autos y fue diseñada para obtener datos dentro de una velocidad entre 20 hasta 100 km/h. Se considera de precisión Clase 3 o 4 según la clasificación del Banco Mundial dado que usa una ecuación lineal para la aproximación de resultados.

El eIRI es una buena referencia que indicará más acerca de la textura del camino antes que la rugosidad real. Es más sensible a la micro rugosidad y tiene un compensador de velocidad en carreteras pavimentadas con configuraciones limitadas (Forslof, 2014).

- ❖ cIRI (IRI calculado) - basado en la simulación de cuarto de carro, para muestrear a una velocidad constante dentro de un rango recomendado que va desde los 60 hasta los 80 km/h. Pertenece a un método más preciso de Clase 2.

Para el cIRI se debe ajustar la sensibilidad del vehículo y la longitud del segmento de cálculo, se puede establecer entre 10 m a 200 m. Esta es la longitud desde donde se calculan los pesos oscilantes simulados. Para lecturas de Roadroid precisas, se debe trabajar con el cIRI y tener en cuenta la sensibilidad, la longitud del segmento, la velocidad de levantamiento, el tipo de vehículo y el tipo de camino (Forslof, 2014). Por lo que se ajusta la configuración de un determinado automóvil y otras circunstancias. Dentro del manual se da una configuración recomendada de acuerdo al tipo de pavimento.

2.6 Nivelación

La manera más conocida de medir el perfil es con un equipo topográfico convencional. El equipo consiste en una varilla de precisión marcada en unidades convenientes de elevación principalmente en centímetros o pies, un nivel que se utiliza para establecer una línea de referencia horizontal y una cinta utilizada para marcar la distancia longitudinal a lo largo del recorrido de la rueda (ver Fig. 27). Este equipo está ampliamente disponible, y generalmente se puede alquilar o comprar a un costo favorable comparándolo con otros equipos de medición de la rugosidad. Debido a que el proceso de recolección de datos es relativamente lento, en comparación con otros equipos, es considerado de bajo rendimiento. Se usan para medir con precisión el perfil de un pavimento y permite obtener una medida exacta del perfil del pavimento, generalmente utilizado cuando se miden pocos perfiles (ASTM, 1995).



Fig. 27. Ejemplo de mira y nivel. Google imágenes

El método está descrito en la norma ASTM E1364-95 “Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method”, cubre la medición de un perfil longitudinal de una superficie recorrida utilizando un nivel estático con el fin de obtener un índice de rugosidad de la carretera. Este método de prueba es considerado de Clase 1 o 2 para la determinación del IRI, y puede aplicarse para todos los tipos de superficies que viajan en vehículos terrestres convencionales, incluidos los caminos pavimentados y no pavimentados.

Este método de prueba describe el cálculo requerido para un tipo particular de índice de rugosidad, la simulación del vehículo utilizada en el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). Al medir la

rugosidad del camino con un nivel estático para validar otros métodos de medición de perfil o calibrar sistemas de medición de rugosidad de respuesta, se debe evaluar el proceso de medición de nivel estático para asegurar que las mediciones estén dentro de la resolución requerida en la Tabla 10. Se recomienda que se marquen varias ubicaciones a varias distancias del nivel y estas ubicaciones se midan en secuencia varias veces para establecer si las lecturas se mantienen dentro de la resolución requerida. En el cálculo de los índices de rugosidad, solo se necesitan elevaciones relativas y elevaciones no absolutas. Para medir la elevación relativa con la precisión requerida, es necesario obtener instrumentación de alta precisión, en la cual la varilla y el nivel se calibran juntos, el nivel generalmente incluye un micrómetro incorporado para interpolar entre las marcas en la varilla (ASTM, 1995).

Tabla 10. Requisitos de precisión para mediciones profilométricas del IRI Clase 1 y 2. Sayers et al., 1986b.

RANGO DE RUGOSIDAD IRI (m/km)	Máximo espaciamiento entre puntos de la muestra (mm)		Precisión de elevación de las mediciones (mm)	
	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 1	CLASE 2
1.0 - 3.0	250	500	0.5	1.0
3.0 - 5.0	250	500	1.0	1.5
5.0 - 7.0	250	500	1.5	2.5
7.0 - 10	250	500	2.0	4.0
10 - 20	250	500	3.0	6.0

En Tabla 10 se muestra la precisión con respecto hacia la barra y el nivel: la precisión de elevación es generalmente equivalente a la resolución con la que se puede leer el nivel, mientras que el intervalo de muestra es la distancia (marcada en la cinta) entre medidas de elevación adyacentes. Si la cinta se encuentra grabada en metros, un intervalo de 0.25 m es ideal para medidas de Clase 1, mientras que un intervalo de 0.50 m es conveniente para medidas de Clase 2 (Sayers et al., 1986b).

2.7 Calibración de medidores de rugosidad de tipo respuesta (RTRRMS)

El comportamiento de respuesta que se obtiene de un RTRRMS es único, pero sufre variaciones con el tiempo. Por lo que el sistema debe ser calibrado cuando se pone en servicio inicialmente, y periódicamente durante su uso. La calibración se logra al obtener mediciones "en bruto" en sitios de calibración especiales, cuyos valores de rugosidad IRI son conocidos, mediante un método Clase 1 o 2. El RTRRMS se pasa periódicamente por los sitios de calibración de 3 a 5 veces a la velocidad estándar (80 km/h), o se puede realizar la calibración en sitios más largos para reducir la necesidad de mediciones repetidas.

Para que una calibración sea válida, los sitios de calibración deben ser representativos de las carreteras que se están estudiando en el proyecto. En lo posible, estos sitios deben ubicarse en caminos de baja o nula curvatura, y deben tener propiedades de rugosidad uniformes a lo largo del sitio. Los datos de los sitios de calibración se utilizan para realizar una regresión del IRI frente a las mediciones de RTRRMS "en bruto", minimizando el error al cuadrado entre los valores de IRI de referencia y los valores estimados a partir del RTRRMS, obteniendo así la ecuación de correlación para una determinada sección.

Existen circunstancias en un proyecto de estudio de rugosidad donde no es posible obtener las medidas de rugosidad a la velocidad estándar de 80 km/h. Por lo tanto, es necesario que se requiera

una velocidad más baja debido a la alta densidad del tráfico local, la geometría restrictiva o los altos niveles de rugosidad que están más allá del rango operativo de un RTRRMS en particular. En esos casos, se permite y recomienda una velocidad constante que va desde los 32 hasta los 50 km/h, pero se deben evitar velocidades más bajas porque la rugosidad medida se ve fuertemente afectada por las propiedades de los neumáticos utilizados en el RTRRMS.

Para este caso particular se aplica un método denominado: “calibración directa para velocidad no estándar”. En este método se realiza la calibración de la misma manera que se describió anteriormente, mediante la ecuación de calibración, con la única diferencia en el procedimiento que el RTRRMS se opera a la velocidad constante no estándar (superior a 32 km/h) en los sitios y se correlaciona directamente con IRI (Sayers et al., 1986b). Es necesario indicar que la ecuación de calibración se obtiene mediante el proceso de regresión lineal simple donde las dos variables son: IRI obtenidos con la aplicación Roadroid (RTRRMS) y el IRI real obtenido con nivelación.

2.8 Regresión lineal simple

Walpole et al., (2012) indica una manera exacta de relacionar la respuesta de Y con una sola variable independiente X, denominándose relación lineal simple. En la Ecuación 1 se expresa dicha relación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (1)$$

En la que β_0 es la intersección y β_1 es la pendiente. Esta relación se ilustra en la Fig. 28:

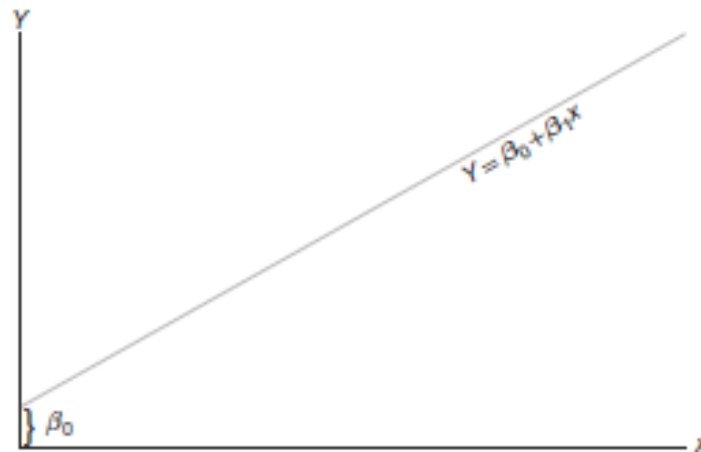


Fig. 28. Relación lineal; β_0 : intersección; β_1 : pendiente. Walpole et al., 2012.

Pero en la mayoría de los casos la Ecuación lineal 1 es una aproximación razonable donde se representa de la manera más simplificada algo más complicado en un rango limitado de x. Estas estructuras lineales sencillas y de naturaleza empírica se denominan modelos empíricos y se expresan a través de la Ecuación 2.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (2)$$

En la Ecuación 2, β_0 y β_1 son parámetros desconocidos de la intersección y pendiente, respectivamente, y ε es una variable aleatoria que se supone está distribuida con $E(\varepsilon) = 0$ y $\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$. En esta ecuación el valor de Y es una variable aleatoria, ya que ε es aleatoria. El valor ε se

denomina error aleatorio, y su presencia evita que el modelo se convierta en una ecuación determinista. Además, $E(\varepsilon) = 0$ implica que para un regresor específico x , los valores de y se distribuyen alrededor de la recta verdadera o recta de regresión, como la que se ilustra en la Fig. 29.

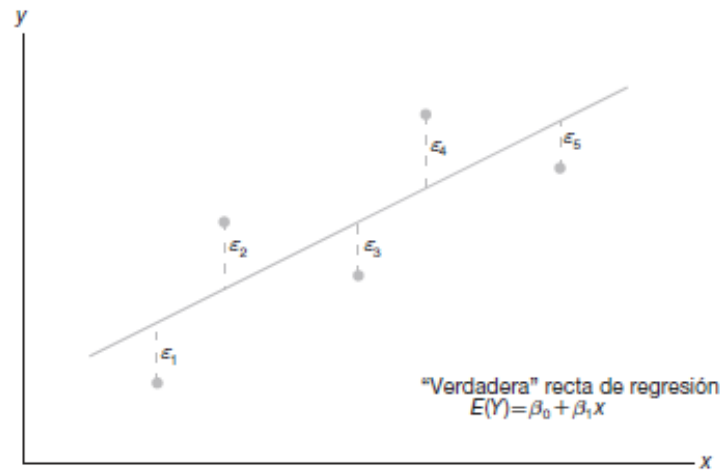


Fig. 29. Datos (x, y) hipotéticos dispersos alrededor de la verdadera recta de regresión para $n = 5$.
Walpole et al., 2012.

Los ingenieros y científicos no utilizan la recta verdadera ya que en la práctica nunca se conocen los valores de ε reales impidiendo trazar esta recta. Entonces, solo es posible generar una recta estimada mediante regresión ajustada.

Se estima b_0 para β_0 y b_1 para β_1 , resultando la Ecuación 3 como la recta de regresión ajustada, donde, \hat{y} es el valor ajustado de Y generando una estimación de la verdadera recta de regresión:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x \quad (3)$$

Para obtener los estimados b_0 y b_1 se utiliza **método de mínimos cuadrados** que consiste en que la suma de los cuadrados de los residuales sea mínima. Los residuales son los errores en el ajuste del modelo, es decir, dado un conjunto de datos de regresión $\{(x_i, y_i); i = 1, 2, \dots, n\}$ y un modelo ajustado $\hat{y} = b_0 + b_1 x$, el i -ésimo e_i está dado por la Ecuación 4:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i x, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Es evidente que si la suma de los residuales es grande el ajuste es malo y si la suma es pequeña el ajuste se considera adecuado. Entonces, al diferenciar la suma de los cuadrados de los residuos se minimiza el e_i , y posteriormente igualar a 0 las derivadas parciales y reacomodar los términos se obtienen las Ecuaciones 5 y 6 que sirven para calcular los valores estimados b_0 y b_1 de la ecuación de la recta de regresión ajustada:

$$b_1 = \frac{(n \sum_{i=1}^n x_i y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{(n \sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (5)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b_1 \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

Con frecuencia es aconsejable trabajar con modelos en el que las variables intervengan de manera no lineal, dicho esto, se recomienda una transformación de los datos reexpresando las variables en el



modelo. Las tendencias de los datos pueden ser: exponencial, potencial, recíproca o hiperbólica, y mediante la transformación se puede linealizar las tendencias cambiando las variables de la siguiente manera: $x = x^*$ y/o $y = y^*$, según el tipo de linealización. Donde x e y son variables lineales y x^* e y^* son variables linealizadas mediante las ecuaciones de transformación que se muestran en la segunda columna de la Tabla 11. Permitiendo así aplicar análisis lineales a estas tendencias no lineales.

Tabla 11. Transformaciones. Walpole et al., 2012.

Forma funcional que relaciona y con x	Transformación propia	Forma de la regresión lineal simple
Exponencial: $y = \beta_0 e^{\beta_1 x}$	$y^* = \ln y$	Hacer la regresión de y^* contra x
Potencial: $y = \beta_0 x^{\beta_1}$	$y^* = \log y; x^* = \log x$	Hacer la regresión de y^* contra x^*
Recíproca: $y = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{x}\right)$	$x^* = \frac{1}{x}$	Hacer la regresión de y contra x^*
Hiperbólica: $y = \frac{x}{\beta_0 + \beta_1 x}$	$y^* = \frac{1}{y}; x^* = \frac{1}{x}$	Hacer la regresión de y^* contra x^*

Los modelos de regresión ajustados $\hat{y}_{(x)} = b_0 + b_1 x + e_i$ son determinados teóricamente con el criterio de que modelo tenga el residual e_i más bajo, pero es necesario conocer el grado de ajuste de las variables con la recta de regresión. Dicho esto, el coeficiente de determinación (R^2) es la medida de la cantidad de variabilidad del modelo ajustado con las respectivas variables, y se calcula aplicando la Ecuación 7. Donde el numerador es el error que se comete en el ajuste y el denominador es la varianza de y .

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_x)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

Entonces, si el ajuste es perfecto, cada uno de los residuales es cero resultando un $R^2 = 1$.

Otra característica importante que se puede obtener del grupo de puntos $\{(x_i, y_i); i=1, 2, \dots, n\}$ es la asociación lineal que existe entre estas dos variables aleatorias. Entonces, para cuantificar la calidad de la dependencia entre las variables el indicador más acostumbrado es el coeficiente de correlación de Pearson. De hecho, este coeficiente es la raíz cuadrada del coeficiente de determinación.

2.8.1 Coeficiente de correlación de Pearson

Canavos (1988) lo denomina coeficiente de correlación (r), y menciona que el contexto del análisis de regresión el coeficiente r expresa una medida cuantitativa de la fortaleza de la relación lineal entre X y Y de la muestra. Además, r se encuentra en el intervalo $-1 \geq r \geq 1$, sean cuales sean las unidades de medida de las variables.

La interpretación del valor de r es la siguiente:

- ❖ Si r es cercano o igual a 0 implica poca o ninguna relación lineal entre x e y .
- ❖ Cuanto más se acerque a 1 ó -1, más fuerte será la relación lineal entre x e y .
- ❖ Si $r = \pm 1$, todos los puntos caerán exactamente en la recta de regresión.

La magnitud de la relación se encuentra especificada por el valor numérico del coeficiente y el signo refleja la dirección de tal valor. En este sentido, una relación de +1 es tan fuerte como de -1. En el primer caso la relación es perfecta positiva y en el segundo perfecta negativa.

De acuerdo a la Fig. 30 literal a) se observa un ejemplo de correlación nula debido a que los puntos no presentan ninguna forma ni tendencia. Por otro lado, se tiene el literal b) donde se aprecia una tendencia cuadrática por tal razón el r es 0, pero este análisis puede mejorar al linealizar los puntos con una función de transformación cuadrática y probablemente se obtenga un r mucho mayor. Una correlación perfecta negativa establece que exactamente en la medida que aumenta una de ellas la otra disminuye como en el literal c). Finalmente, en el literal d) se tiene una relación muy fuerte positiva porque mientras aumenta una variable también aumenta la otra.

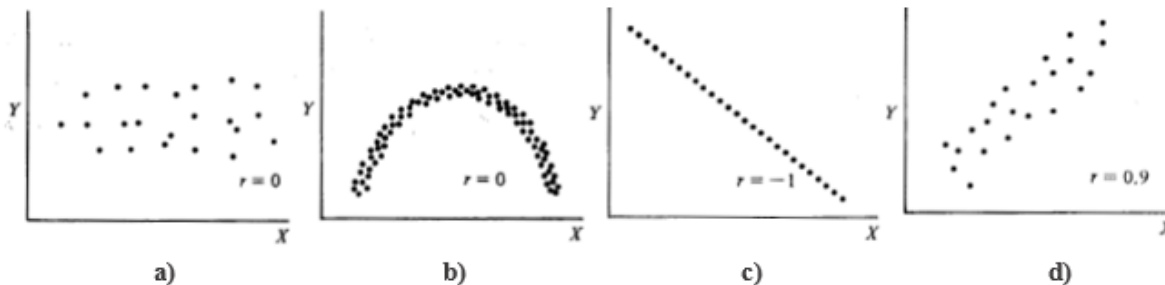


Fig. 30. Valores de r y sus implicaciones. Canavos, 1988.

A partir de una muestra de valores de dos variables $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, el coeficiente de correlación lineal muestral r se define en Canavos (1988) como:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2] * [\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (8)$$

La Ecuación 8 hace referencia a las varianzas SS_{xx} y SS_{yy} , que miden la dispersión dentro de un conjunto de datos y está en función de la diferencia para cada valor X o Y con su respectivo promedio \bar{x} y \bar{y} .

En general, no se deben eliminar datos (x_i, y_i) de una muestra, pero podría ocurrir que datos atípicos correspondan a errores en la toma de las muestras, en el registro de los datos o, incluso, que realmente no procedan de la misma población que el resto de los datos: en ese caso, eliminarlos podría estar justificado de cara a analizar de una forma más precisa la relación lineal entre los datos (Sáez, 2012).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente capítulo se divide en dos subcapítulos:

- Materiales y Equipos
- Metodología de cálculo del PCI, IRI y correlación

El primer subcapítulo denominado Materiales y Equipos, presenta las características de los materiales que se utilizaron para obtener el PCI, así como de los materiales y equipos que hacen posible el registro del IRI en la plataforma virtual de Roadroid. Adicionalmente, se detallan los materiales que se utilizaron para el cálculo del IRI con un método estático, datos necesarios para la calibración del IRI obtenido con la Aplicación Roadroid. En el segundo subcapítulo denominado Metodología se muestran los pasos realizados para cálculo el PCI en base a la norma ASTM D 6433-11. Seguido por la descripción del uso de la aplicación de Roadroid, descarga de los recorridos del IRI del sitio web y el procesamiento de los mismos. Finalmente, se detalla la metodología para realizar la correlación entre los dos índices descritos anteriormente.

3.1 Materiales y equipos

3.1.1 PCI

En la Fig. 31 se muestran los insumos varios que se utilizaron en campo para medir las distintas características de los deterioros presentes en las losas del tramo de estudio de la Avenida Loja. En el literal a) se muestra una cinta de 50 m, y en el literal b) y c) un flexómetro y regla de madera, respectivamente.

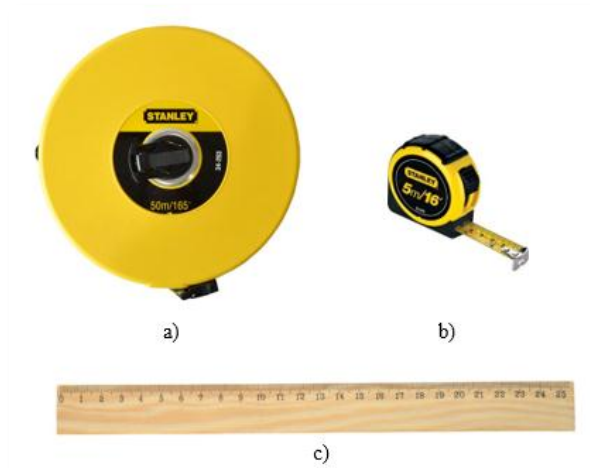


Fig. 31. a) Cinta de 50m b) Metro de 5m c) Escuadras
Instrumentos de medición.

La norma ASTM D6433-11, en el apéndice X4 expone 19 ábacos, uno para cada deterioro. Estos ábacos sirven para determinar los valores deducibles de cada deterioro según el nivel de severidad. Por ejemplo, en la Fig. 32, se muestra el ábaco que corresponde al deterioro de losa dividida, en donde se muestran también los 3 niveles de severidad para este deterioro (L, M y H).

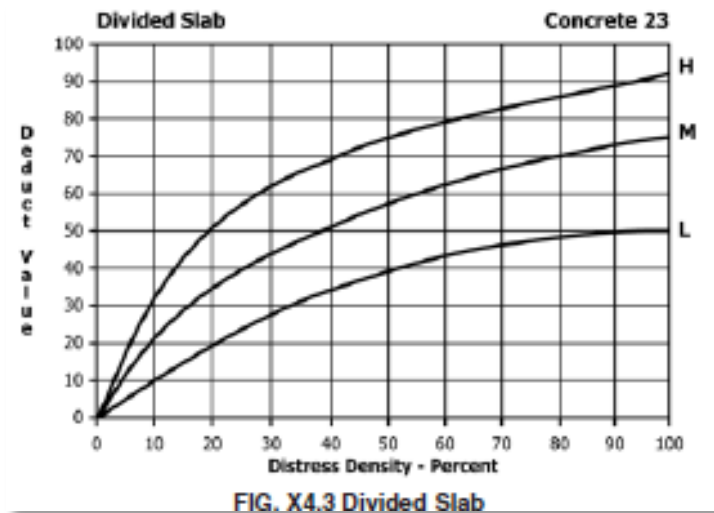


Fig. 32. Ábaco de DV de Losa Dividida. Apéndice X4 de la ASTM D 6433-11.

3.1.2 IRI con Roadroid

Roadroid fue proporcionada por Lars Forslof Arbetet, a petición de los estudiantes de esta tesis. Permite medir la rugosidad mediante las vibraciones medidas por los acelerómetros que se encuentran incorporados dentro de los teléfonos inteligentes y convirtiéndolas en unidades IRI a través de ecuaciones de correlación lineal. El celular empleado en este estudio fue un Sony Xperia XA (ver Fig. 33). Sistema operativo Google Android™ M. Procesador Media Tek helio™ P10. GPS, acelerómetro de tres ejes incorporado. Este dispositivo se coloca en posición horizontal dentro en el interior del vehículo de prueba, en medio del parabrisas. Se lo mantiene fijo con la ayuda del sujetador para la recolección de datos.



Fig. 33. Teléfono Sony Xperia X.

El sujetador es necesario para que el teléfono inteligente utilizado para la recolección de datos se mantenga fijo y se mueva conjuntamente con el vehículo. El sujetador utilizado es un modelo REMAX RM-06 (Fig. 34). Es un dispositivo desmontable, fabricado de ABS y PVC. Con una ventosa en la parte inferior que se sujeta firmemente al parabrisas.



Fig. 34. Sujetador Remax RM-0.6.

El vehículo utilizado para realizar los diferentes recorridos por la Avenida Loja, manteniendo una velocidad constante de 40 km/h, garantizando una recolección de datos continua, el modelo corresponde a un Corsa evolution 2005 (ver Fig. 35). Dentro del vehículo se coloca el conjunto (sujetador y teléfono inteligente) para registrar los valores de rugosidad proporcionados por la aplicación Roadroid.



Fig. 35. Vehículo de prueba.

3.1.3 IRI con nivelación

❖ Nivelación

Equipo topográfico diseñado para proporcionar lecturas de altura con la resolución requerida (ver Fig. 36). Los requisitos de resolución son más estrictos para carreteras sin deterioros, y se resumen en la Tabla 10 en función de los niveles de rugosidad IRI. El nivel topográfico incluye un micrómetro para interpolar entre las marcas en la mira. Se prefiere la precisión de Clase 1 al validar los sistemas de perfilado inercial. La precisión de clase 2 se considera adecuada para calibrar sistemas de tipo respuesta.



Fig. 36. Nivel Topográfico procedente de la facultad.

Para la nivelación se utilizan las miras topográficas, las cuales son similares a reglas graduadas en metros y decímetros que vienen con una precisión de 1 cm y apreciación de 1 mm, comúnmente se fabrican con una longitud de 4 m y divididas en 4 tramos para la facilidad de su almacenamiento. En la mira debe marcarse de manera que las diferencias en la elevación de los puntos adyacentes del perfil se puedan medir con la precisión requerida. La base de la barra debe diseñarse para permitir medidas fácilmente repetibles. El uso de un nivel de burbuja unido a la mira es recomendado para ayudar a mantener la barra vertical.

Todos los cálculos necesarios para calcular el IRI mediante nivelación se realizarán automáticamente por medio de un programa que se ejecuta en el software MATLAB, debido a la posibilidad de error humano con la gran cantidad de datos que se deben ingresar para obtener el perfil real de la vía y su respectivo IRI mediante el método de nivelación. MATLAB es un sistema interactivo cuyo elemento básico de datos es que no requiere de dimensionamiento previo, esto permite resolver muchos problemas computacionales, específicamente aquellos que involucren vectores y matrices.

3.2 Metodología de cálculo de PCI, IRI y correlación

Para evaluar del estado superficial de la Avenida Loja se escogió dos carriles, uno en cada sentido de circulación. Por lo que en el desarrollo de este trabajo se denominarán carril #1 y carril #2 a los carriles con sentido de circulación Noreste–Suroeste y Suroeste–Noreste, respectivamente. Posteriormente, se dividió la longitud de la vía en secciones de aproximadamente 50 metros y se georreferenció el inicio y fin para cada sección con la ayuda de un GPS, resultando 43 secciones en el carril #1 y #2, obteniendo un total de 86 secciones para el análisis. En la Fig. 37 literal a) y b) se muestra un ejemplo de la división y señalización de la sección N° 34 del carril #1.

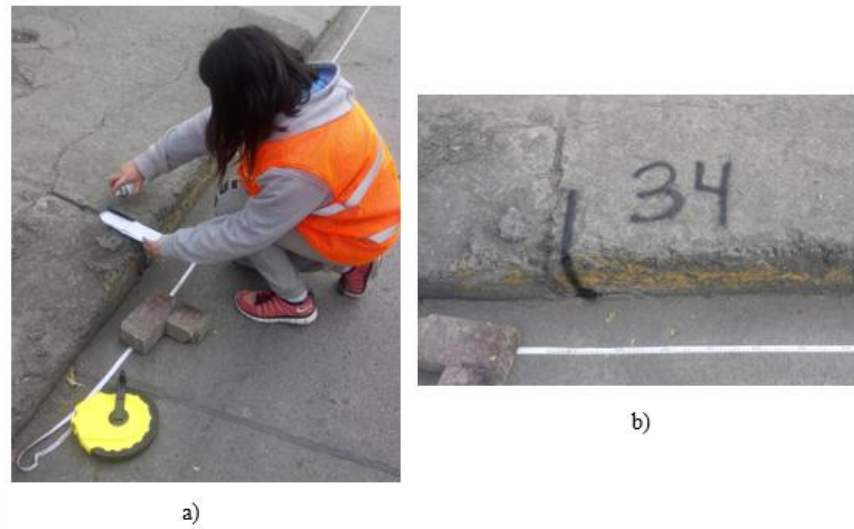


Fig. 37. Medición y señalización de la sección 34.

Al momento de realizar la división de los tramos, se omitió el camino que cubren las intersecciones principales que atraviesan la Avenida Loja, debido a que el tráfico es permanente en esas partes y resultó imposible realizar la inspección sobre estas zonas. Estas vías que cruzan transversalmente en la zona de estudio son:

- ❖ Avenida Primero de Mayo, después de la sección #7 (ver Fig. 38)
- ❖ Avenida Isabel la Católica, después de la sección #13 (ver Fig. 39)
- ❖ Avenida Don Bosco, después de la sección #22 (ver Fig. 40)



Fig. 38. Ubicación de la primera intersección (Av. Primero de Mayo). Google Earth.



Fig. 39. Ubicación de la segunda intersección (Av. Isabel la Católica). Google Earth.



Fig. 40. Ubicación de la tercera intersección (Av. Don Bosco). Google Earth.

3.2.1 Calculo del PCI

Para este estudio se realizó dos análisis: el primero consiste en la estimación del PCI de cada una de las 86 secciones; mientras que para la segunda se estimó el PCI de una losa específica para cada sección, cuya ubicación se determinó con la ayuda de la aplicación Roadroid que se describe posteriormente en la sección 3.2.2. Ambos análisis se realizaron en base a la norma empírica ASTM D6433-11, procedimiento que consta de dos pasos principales: recolección de datos crudos y procesamiento de los datos obtenidos. A continuación, se indican todos los pasos que se realizaron para el cálculo del PCI de un ejemplo de la sección N° 17 del carril #1, procedimiento que se repitió para todas las 85 secciones restantes.

- **Recolección de datos crudos del PCI**

Se realizó un análisis visual de las 9 losas que forman parte de la sección 17; donde se obtuvo 3 losas con diferentes tipos de deterioros y severidades, como se muestra y describe en las Fig. 41, 42 y 43.



Fig. 41. **Deterioro:** agrietamiento lineal (transversal); **severidad:** Medio.
Losa 1 de la sección 17 del carril #1 en la Avenida Loja.



Fig. 42. **Deterioro:** Parcheo largo; **severidad:** Alta.
Losa 3 de la sección 17 del carril #1 en la Avenida Loja.



Fig. 43. **Deterioro:** agrietamiento lineal (transversal); **severidad:** media.
Losa 8 de la sección 17 del carril #1 en la Avenida Loja.

Para el procesamiento de datos obtenidos en campo se realizó una serie de pasos que se explican a continuación. Todos los cálculos se encuentran en el ANEXO 1 y 2, los mismos que se realizaron en el programa Excel, aplicación que forma parte de la suite de oficina de Microsoft Office.

- a) Se sumó la cantidad total de losas de cada combinación única de tipo de deterioro y nivel de severidad. Se utilizó los números correspondientes de cada tipo de deterioro; siendo la falla transversal y parcheo largo, los números 8 y 9, respectivamente. Resultando 2 losas para la falla 8, severidad M y 1 losa para la falla 9 severidad H (ver Fig. 44).

A continuación, se dividió la cantidad total de losas que sufren un tipo de deterioro específico para el número total de las losas de la sección 17, en este caso **9**, determinando así, la densidad de cada combinación, como se muestra en la Tabla 12.

# Sección	# Losa	Tipo de Deterioro	Sev
17	1	8	M
	2		
	3	9	H
	4		
	5		
	6		
	7		
	8	8	M
	9		

→

# losas / combinación	Combinación única
2	8M
1	9H

Fig. 44. Clasificación de deterioros y severidades.

Tabla 12. Cálculo de las densidades de cada combinación única.

# losas / combinación	Combinación única	Densidad
2	8M	22.2
1	9H	11.1

b) Se usaron los ábacos del apéndice X4 de la norma, para así determinar el valor deducible (DV) en función de la densidad de las dos fallas (8M y 9H):

- Para la falla 8M se ubicó la densidad de 22.2 en la abscisa y se prolongó la línea hasta llegar a la curva de la severidad M, resultando un DV de 16 (ver Fig. 45).

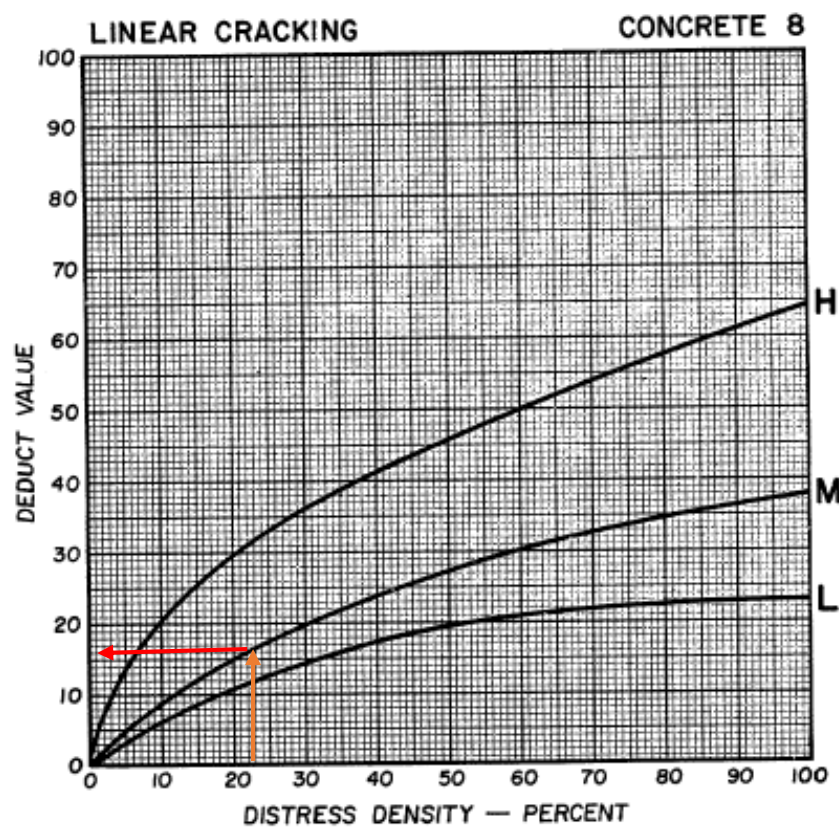


Fig. 45. DV del deterioro 8M. ASTM, 2011.

- Para la falla 9H se ubicó en la abscisa de densidad en 11.1 y se prolongó hasta llegar a la curva de severidad H, dando como resultado un DV de 19, como se muestra en la Fig. 46:

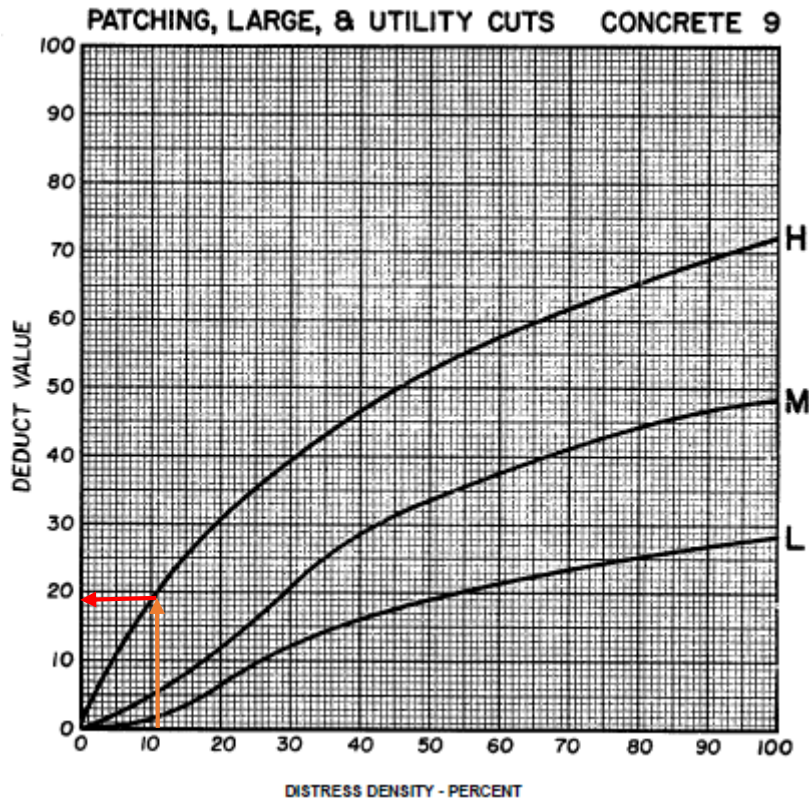


Fig. 46. DV del deterioro 9H. ASTM, 2011.

Entonces, se tiene los valores DV para cada combinación única de deterioro-severidad como se indica a en la Tabla 13:

Tabla 13. DVs de cada combinación y selección del HDV.

Combinación única	Densidad (%)	DV
8M	22.2	16
9H	11.1	19

HDV

- c) A continuación, se determinó el valor **m** definido como el número máximo permitido de DVs. En este paso se seleccionó el máximo valor deducible (HDV), que según la tabla 13 es el DV=19, y al aplicar la Ecuación 9 y reemplazando HDV con 19, se obtuvo un **m** de **8.44**, lo que indica que se puede utilizar solo 8.44 tipos de combinaciones únicas, permitiendo utilizar los dos DV que se obtuvieron en el paso anterior.

$$m = 1 + \left[\frac{9}{98} * (100 - HDV) \right] \leq 10 \quad (9)$$

- d) Luego se colocaron todos los DV en una fila de manera decreciente, generando una columna para cada DV; en la siguiente fila se reemplazó el menor DV por un 2, y así sucesivamente, quedando la matriz de la Tabla 14.

Se sumó todos los DVs de cada fila, dando una columna denominada **Total DV** (Tabla 14). El valor de la columna **q** es el número de DVs que tienen su valor mayor que 2.0.

Tabla 14. Matriz de cálculo del Total DV, q y CDV.

1	2	Total DV	q	CDV
19	16	35	2	27
19	2	21	1	21

La Fig. 47 es el ábaco que presenta la norma en el anexo X4, para determinar el valor deducido corregido (CDV); en este ábaco se utiliza el **Total DV** y **q** de cada fila de la Tabla 14. Cuando se tiene $q=1$ el CDV es el mismo valor de Total DV, ya que la curva de $q=1$ es lineal con un ángulo de inclinación de 45° . Pero para determinar el CDV para el $q=2$ se ubica en la abscisa con el valor de 35 que es el Total DV correspondiente, y se prolonga la línea hasta la curva de $q=2$, entonces se llega a la ordenada CDV de 27 (ver Fig. 47). Resultando los CDVs de la última columna de la Tabla 14 para cada combinación única.

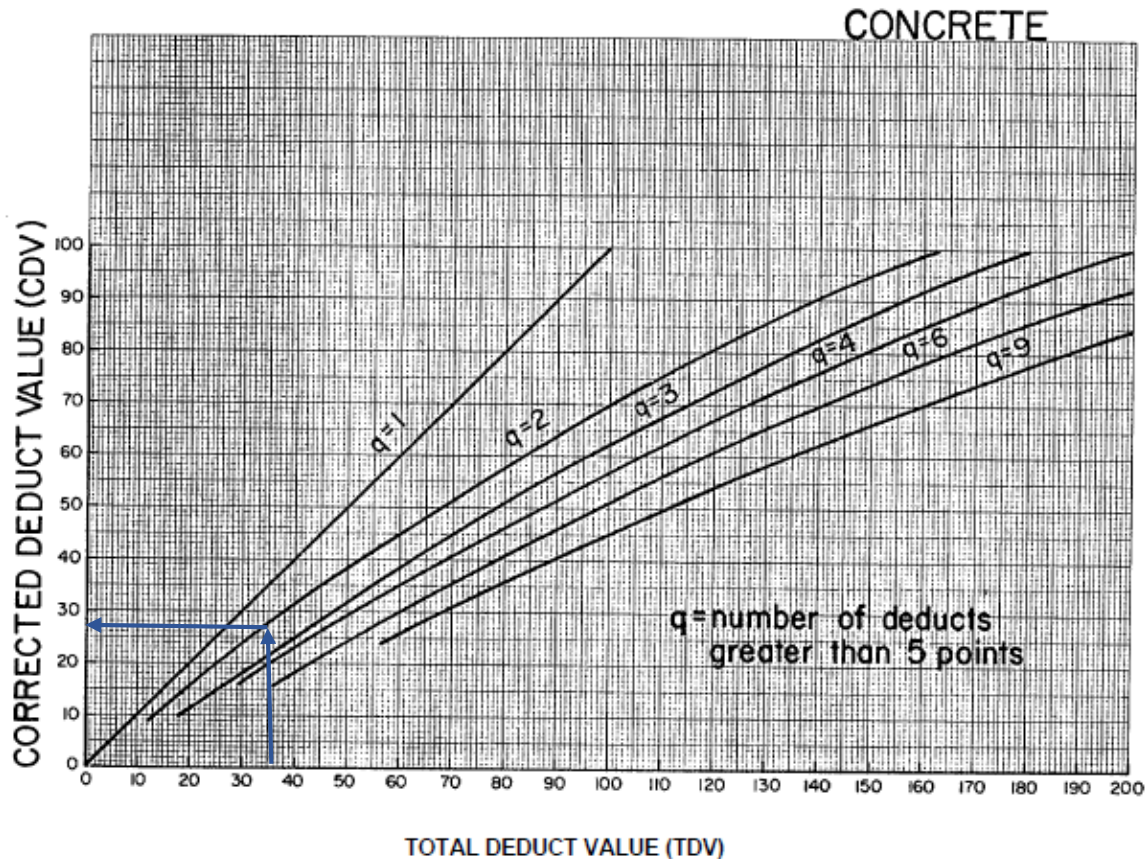


Fig. 47. Abaco de CDV para Pavimento Rígido. ASTM, 2011.

- e) El PCI de la sección resultó restando el CDV máximo de 100, como en la Ecuación 10:

$$PCI = 100 - CDV \max \quad (10)$$



Dando como resultado un PCI de 73 para la sección N° 17 del carril # 1 (ver Tabla 15):

Tabla 15. Determinación del PCI de la sección N° 17.

1	2	Total	q	CDV
19	16	35	2	27
19	2	21	1	21
			CDV máx	27
			PCI	73

Para el segundo análisis se realizó el mismo procedimiento, con la diferencia de que solo se aplicó para cada losa específica. Por lo que en este análisis se obtuvo la característica que cada falla que se encuentre dentro de la losa, tiene una densidad correspondiente a 100%.

3.2.2 IRI con Roadroid

Se obtuvo el IRI (eIRI y cIRI) en base al manual y con algunas recomendaciones en base a la experiencia luego de haber trabajado con el programa. Este capítulo hace referencia al manual publicado en la página propia de la compañía Roadroid.

El primer paso realizado fue definir un horario en la cual no exista tráfico para mayor facilidad de mantener una velocidad constante, de tal manera que la recolección de datos de rugosidad se efectuó a una velocidad de 40 km/h (debido a que el límite permitido para conducir en la vía es de 50 km/h). El horario escogido para la recolección fue en altas horas de la noche, comprendidas entre las 22h00 y 24h00.

También se observó que el PCI abarcaba todas las fallas existentes en cada losa, por lo que de la misma manera para el cálculo del IRI se buscó que el recorrido de las ruedas abarque la mayor área posible de cada losa. Para lograrlo, se realizaron varios recorridos pasando por la parte izquierda, central y derecha de la vía, tomando como IRI de la sección el que mayor valor tenía. Se repitió al menos 3 veces el recorrido del vehículo a cada lado para una mejor precisión y así disminuir los errores que pueden haber ocurrido en uno de los recorridos.

Para la toma de mediciones con el teléfono inteligente descrito en la sección anterior, se adquirió e instaló la aplicación en el celular. Una vez realizado, se registró el teléfono en el usuario Roadroid con el número IMEI.

Para la fijación del teléfono en el vehículo de manera correcta se siguió los siguientes pasos:

- ❖ El sujetador del teléfono se colocó en la parte del parabrisas del vehículo, ubicado de modo que sea fácil de alcanzar.
- ❖ Se aseguró de que la conexión teléfono – sujetador – parabrisas sea rígida y segura.
- ❖ Se colocó el teléfono lo más recto posible, en posición horizontal para el uso de la función foto-GPS

- ❖ Para confirmar si la instalación fue la correcta, se inició la cámara y verificó que ésta posea una buena posición (ver Fig. 48).



Fig. 48. Colocación del teléfono inteligente.

Una vez instalado el equipo, se inició la aplicación en el dispositivo y se lo ajustó de manera que las tolerancias para los ejes X, Y y Z se muestren en color verde (con valores más cercanos a cero) como se muestra a continuación, en la Fig. 49:

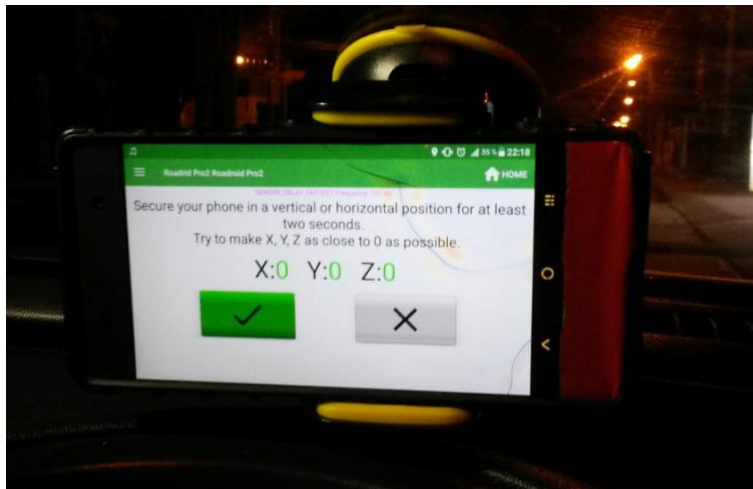


Fig. 49. Ajuste de la posición del teléfono.

Antes del inicio de la toma de datos, la señal GPS del celular se encontró disponible y con señal, así se tuvo acceso al botón “Start/stop”, inicialmente en color gris, que al presionarlo e insertando un nombre para identificar el recorrido (ver Fig. 50), cambió automática y de manera inmediata a color rojo, dando inicio a la toma de la muestra. Los datos se guardaron en el teléfono a cada segundo independientemente de velocidad. Para detener el muestreo se presionó el mismo comando nuevamente. Los cambios de velocidad generan un error no uniforme en las muestras tomadas, aumentando o disminuyendo los valores de rugosidad calculados respecto a los que son en realidad, por lo que se realizaron viajes manteniendo una velocidad constante.



Fig. 50. Inicio de toma de datos.

❖ Carga de datos

Para la carga de datos tomados en campo al usuario Roadroid al cual se afilió el dispositivo (muestras de rugosidad y/o fotografías), es necesario que el teléfono cuente con conexión de datos móviles o WIFI. Dentro de la aplicación está incluida la opción de “Manage uploads”, comando que da inicio a la carga de datos a la página web principal (ver Fig. 51).

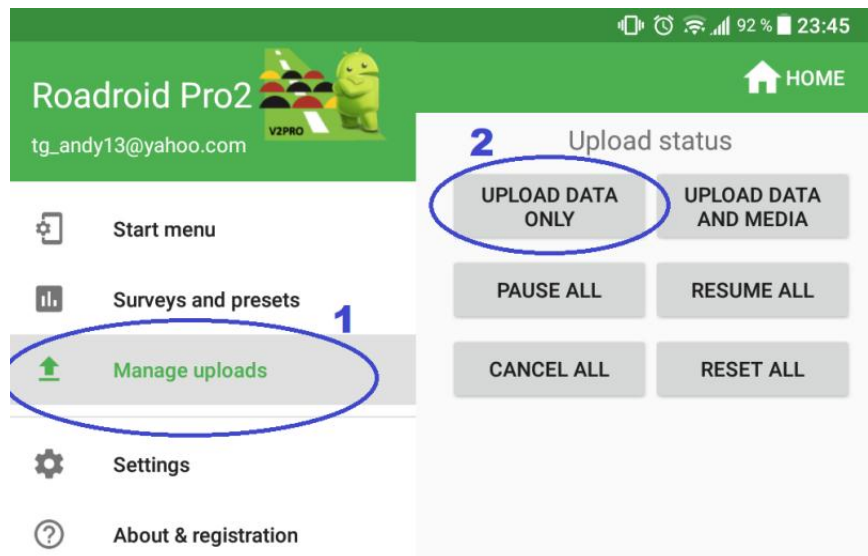


Fig. 51. Subida de datos a la página principal. Aplicación Roadroid.

Para dar inicio a la transferencia de datos, se seleccionó una de las siguientes opciones: la primera “Upload Data Only” para registros de datos solamente y la segunda “Upload Data and Media” en caso de que se haya tomado fotos o videos dentro de la aplicación. Una vez realizada la transferencia, se subió al usuario todas las muestras guardadas en el dispositivo que aún no hayan sido transferidas, para poder ser descargadas desde un ordenador, tal como se muestra en Fig. 52:

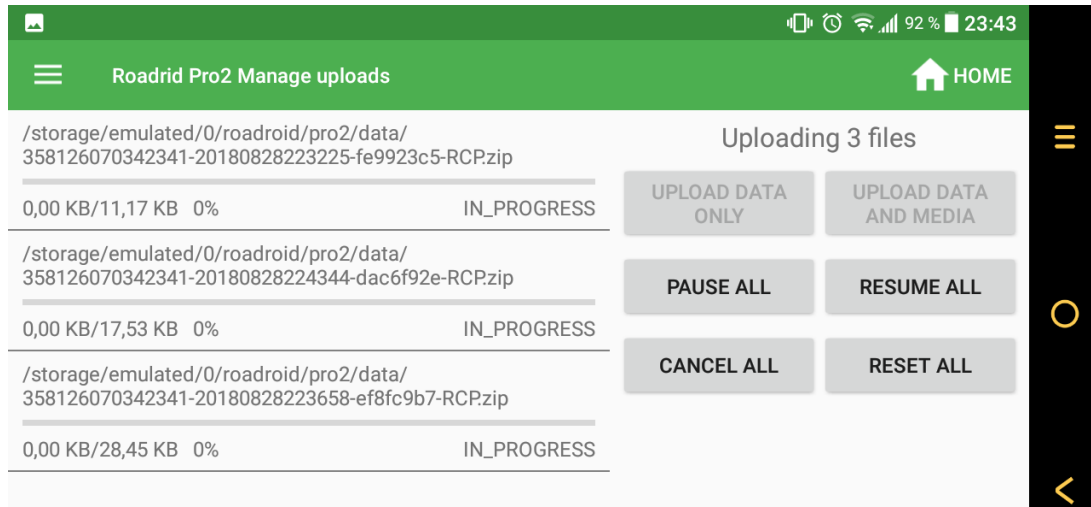


Fig. 52. Transferencia de datos a la página principal. Aplicación Roadroid.

❖ Revisión de información por el servicio web de Roadroid

Los datos fueron cargados al servicio web. Luego se navegó en www.roadroid.com desde un ordenador, buscando los datos de acuerdo al nombre (identificación) y por el área geográfica en estudio. Dentro del sitio web se pudo observar también un mapa con todos los valores de eIRI (ilustrados en forma de puntos) y su ubicación (ver Fig. 53).

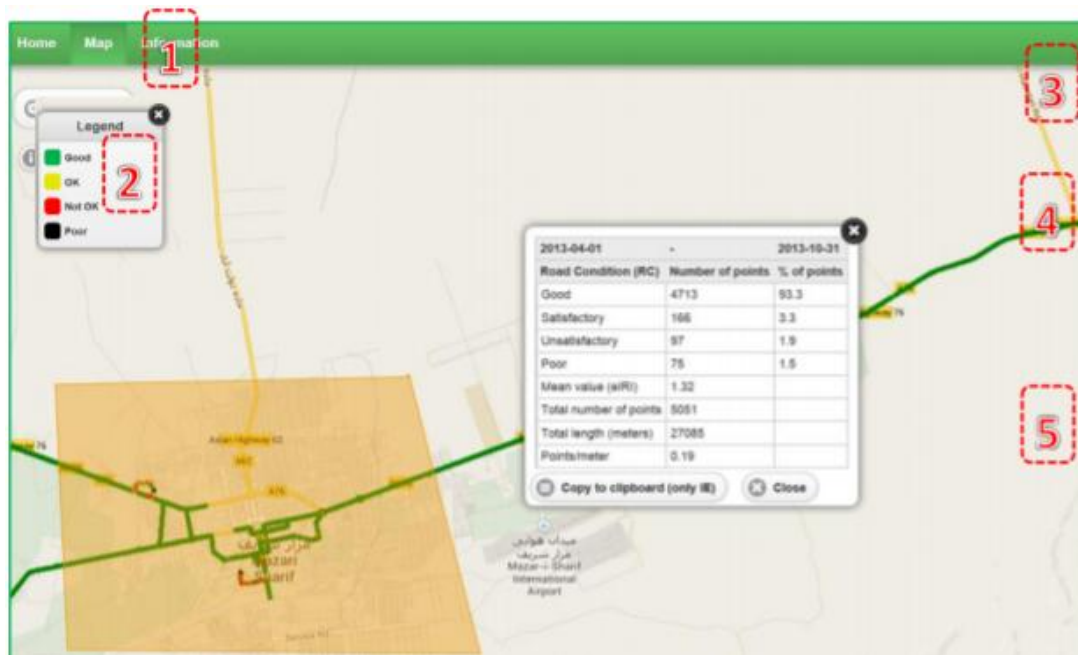


Fig. 53. Visualización de los valores eIRI (puntos). Roadroid, 2017.

❖ **Descargar archivos**

En el sitio web se descargó todos los archivos de los recorridos realizados sobre la vía de estudio (extensión .txt). En donde se puede observar de manera tabulada los recorridos realizados, clasificados por el nombre impuesto, longitud del recorrido, fecha y hora realizada (ver Fig. 54).

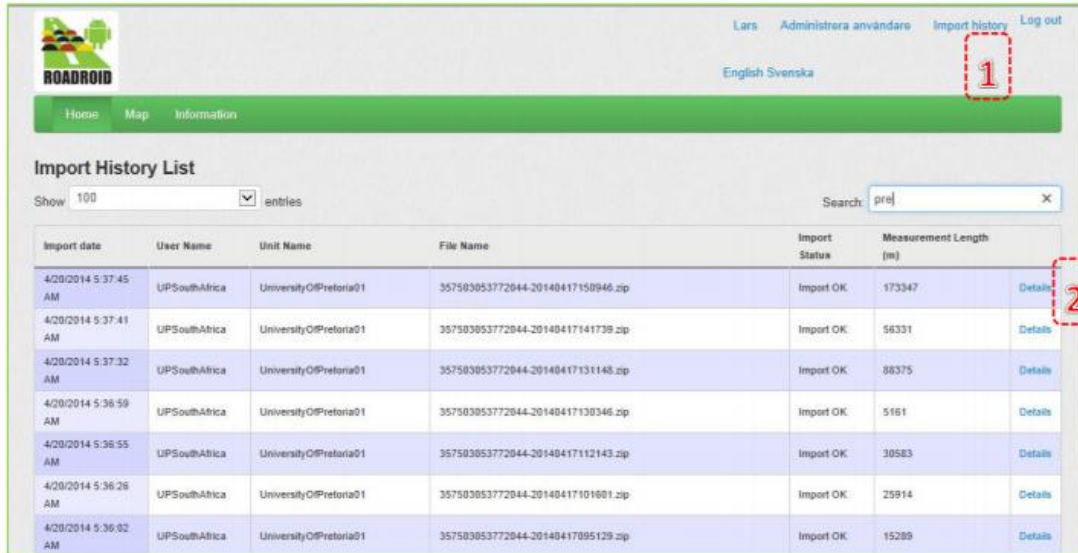


Fig. 54. Descarga de archivos procesados. Roadroid, 2017.

❖ **Gráficas y tabulaciones desde archivos descargados**

Se transfirieron las columnas del archivo .txt al programa Excel, de manera sencilla y rápida. Dentro de cada archivo agregado se observaron estas columnas: Fecha y Hora, Latitud, Longitud, Distancia (m), Pendiente (%), Altura (m), eIRI y cIRI. A partir de esta información importada, se procedió a realizar gráficas para visualizar los cambios de rugosidad en base a la longitud recorrida y perfil longitudinal (ver Fig. 55). El archivo importado nos da estas características mencionadas cada 5 metros de recorrido aproximadamente.

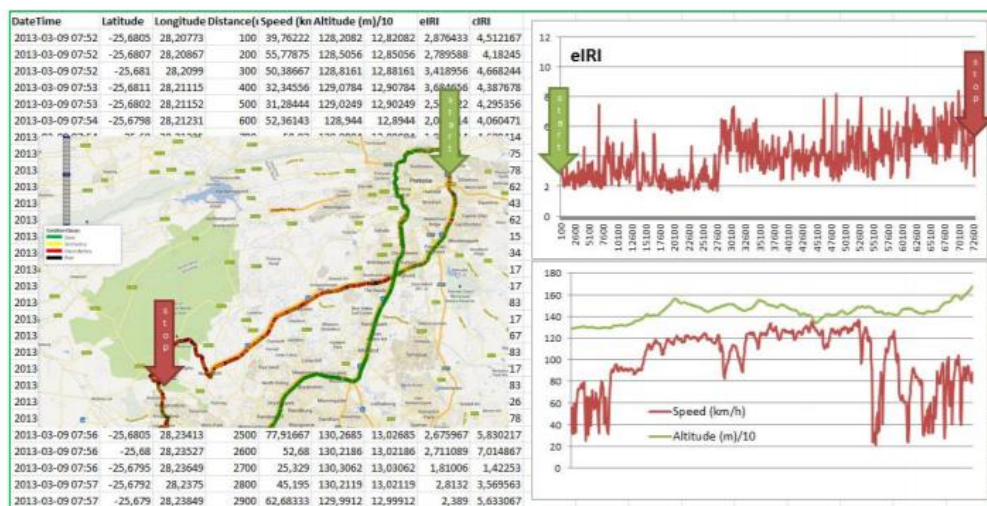


Fig. 55. Tablas y gráficas de los recorridos realizados. Roadroid, 2017.

❖ Localización de los puntos en sus respectivos tramos

Con los puntos ubicados de todos los tramos, referenciados con la ayuda del GPS (ver Fig. 56), se procedió a ubicar cada punto en su respectiva sección, mediante un algoritmo en Excel que se encargaba de ubicar a cada punto en base a su Latitud y Longitud de manera automática y así obtener el cIRI y eIRI de cada sección.



Fig. 56. Ubicación de las secciones de la vía (sentido Norte-Sur). Google Earth.

Una vez clasificados todos los puntos obtenidos, se procedió a realizar dos análisis: el primero consiste en un promedio de todos los valores IRI (eIRI y cIRI respectivamente) que cayeran dentro de una misma sección para determinar el eIRI y cIRI promedio de dicha sección. El segundo análisis se buscó solo el valor máximo de eIRI y cIRI de cada sección junto con su ubicación dentro de la sección, este paso fue necesario para determinar la ubicación de la losa específica que se requirió para su determinación del PCI. Estos dos pasos se realizaron para cada una de las secciones, obteniendo así el índice de rugosidad promedio y máximo para cada una, así como también se determinó la ubicación del valor máximo registrado. Todos los datos se adjuntan en el ANEXO 3 y 4.

3.2.3 IRI con Nivelación

En base a lo descrito en el documento del Banco Mundial N 46 (ver Tabla 16), se escogió el número mínimo de secciones, es decir 7, de la misma longitud que se utilizó para los recorridos con la aplicación (50 metros), para determinar el IRI real en base a la norma ASTM E1364-95.

Tabla 16. Resumen de los requisitos para la calibración de RTRRMS. Sayers et al., 1986b.

DESCRIPCIÓN	
Número mínimo de secciones	7
Longitud de la sección mínima*	200 m
* En la práctica, es difícil encontrar secciones de gran longitud que sean homogéneas con gran rugosidad. Por lo que es mejor incluir secciones más cortas para la calibración que omitir secciones de alto índice de rugosidad.	

Con los resultados obtenidos de la aplicación Roadroid se escogió cada sección a perfilar en función del nivel de rugosidad, por lo que se seleccionaron secciones de manera distributiva que tengan los valores más bajos de IRI registrados, así como también los IRI más altos y para mejorar la precisión de la calibración se seleccionó también secciones con valores medios de IRI. Este método es necesario para la calibración del IRI obtenido con la aplicación Roadroid.

Se seleccionó el camino o recorrido donde pasaron las ruedas del vehículo en sus recorridos, siendo por la parte izquierda, central o derecha de la vía, lo que indica que se perfiló dos veces en cada sección, una para cada neumático del vehículo. Una vez establecido el camino a perfilar, se marcó claramente la línea que define la trayectoria de la rueda con pintura para identificar el punto de inicio, el punto de parada y la posición transversal de la línea a intervalos regulares a lo largo de la misma. Una recomendación fue que estos intervalos no estén separados más allá de 15 m entre sí, como se observa en Fig. 57.

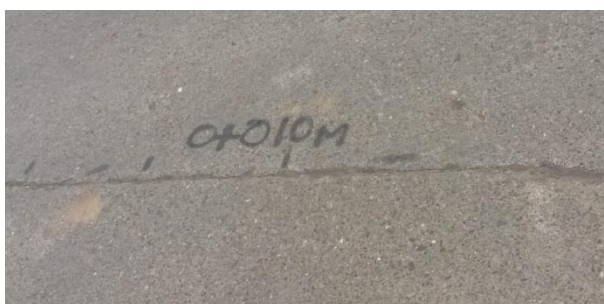


Fig. 57. Abciscado de ruta a perfilar.

Una vez establecido los intervalos para la medir el perfil, se procedió a colocar la cinta sobre una de ellas con la ayuda de pesas para evitar que la cinta se desplace. Y luego de haber tomado lecturas del primer intervalo, se movió la cinta al siguiente intervalo y se repite este proceso para el resto de intervalos a lo largo de la sección. La cinta se reubicó de manera que el nuevo punto cero coincida con el antiguo punto final.

Luego, se colocó el instrumento de nivelación en un lugar que permitió enfocar la mira al comienzo de la cinta y sobre la mayor cantidad de cinta posible. Para mayor comodidad y rapidez, se colocó el trípode de manera que el nivel esté ubicado en línea con la trayectoria de la rueda, por lo que las lecturas repetidas a lo largo de la cinta se pueden tomar con un mínimo ajuste de visualización, tal como se muestra en Fig. 58.



Fig. 58. Medición de los puntos con el nivel topográfico.

❖ Medición del perfil

La separación establecida entre mediciones es 25 cm para la resolución de Clase 1, y 50 cm para la resolución de Clase 2. El nivel de precisión utilizado para medir el perfil de la vía es de Clase 1, por lo que la separación entre cada punto es de 25 cm. Una vez establecida la separación entre cada punto, se procedió a colocar la mira sobre el punto inicial de la cinta. La persona con la mira coloca la mira en el marcador de cero de la cinta y alinea la varilla verticalmente, usando el nivel de burbuja como referencia. Cuando la varilla está colocada y alineada correctamente, se le dio una señal al operador del nivel.

El operador del instrumento leyó la altura de acuerdo con las instrucciones del fabricante del equipo, esta lectura es grabada en una libreta de campo y ya realizada la lectura, el tomador de notas llamó a la persona con la mira para indicar el cambio a la siguiente posición, tal como se ve en Fig. 59. Se repitió este procedimiento hasta que se llegue al final de la cinta.



Fig. 59. Persona con la mira ubicada sobre un punto del recorrido.

Cuando el nivel excedió su rango horizontal (es decir, la distancia entre el nivel y la mira es demasiado corta o demasiado larga para enfocar correctamente) o excedió el rango vertical (las marcas en la mira están "fuera de escala" debido a la pendiente de la carretera), se reubicó el nivel, independientemente de la posición de la mira. Sin embargo, es necesario tener en cuenta el cambio en la altura del instrumento. Antes de mover el nivel, se identificó la última medición en las notas de campo. Además, se marcó la ubicación de la mira en el pavimento, este punto en el pavimento fue el punto de pivote para el cambio en la altura del instrumento que ocurre con la nueva configuración. También se repitió la primera toma de medición con el nivel en su posición actual y se comparó con la primera lectura, estas mediciones deben ser muy semejantes de acuerdo a Tabla 10, caso contrario se repite la toma de todos los puntos desde la misma posición.

Si los requerimientos cumplieron, se reubicó el nivel y se usó el punto de pivote para determinar la nueva altura del nivel, Las notas de campo indicaron que esta es una medida repetida y que el instrumento se movió.

❖ Cálculo y gráfico del perfil

Debido a la posibilidad de error humano con la gran cantidad de datos obtenidos, todos los cálculos se realizaron automáticamente por computadora. Este procedimiento fue utilizado para ingresar las mediciones en una computadora para minimizar el potencial de error humano. Los números ingresados en la computadora fueron las mediciones de campo. Para el cálculo de la elevación de

perfil, las lecturas individuales del nivel son las distancias de los puntos de perfil correspondientes que se encontraban debajo de un datum horizontal arbitrario establecido por el instrumento de nivelación, llamado altura del instrumento (IH). La elevación de cada punto se calculó restando la lectura de IH. Es decir, como en la Ecuación 11:

$$P_i = IH - R_i \quad (11)$$

Donde:

- P_i = con la elevación del perfil ($i = 1, 2, \dots$),
- IH = altura del instrumento, y
- R_i = lectura de varilla en el i th punto.

En el trabajo de nivelación convencional, la altura absoluta del instrumento se determinó cuidadosamente. Sin embargo, para el trabajo de rugosidad, solo son interesantes los cambios en la elevación, y la altura absoluta del instrumento no fue relevante. La altura del instrumento se asignó arbitrariamente a un valor conveniente (por ejemplo, $IH = 10\text{m}$) para la primera configuración. Aunque la altura inicial es arbitraria, todas las medidas tomadas para un único perfil deben referenciarse correctamente a esa altura.

Cuando se movió el instrumento de nivelación, la nueva altura se calculó a partir de lecturas repetidas de un punto de pivote. La nueva altura se calcula mediante la Ecuación 12:

$$IH_{Nue} = IH_{Vie} + R_{Nue} - R_{Vie} \quad (12)$$

Donde:

- IH_{Nue} y IH_{Vie} = alturas de instrumento nuevas y antiguas, respectivamente, y
- R_{Nue} y R_{Vie} = lecturas de varillas nuevas y antiguas para el punto de pivote.

Se preparó una gráfica que muestra la elevación del perfil en función de la distancia longitudinal, como se presenta en la Fig. 60. Cuyo propósito fue de identificar cualquier punto que se haya medido o leído incorrectamente y que introdujera un bache u hoyo ficticio en el perfil.

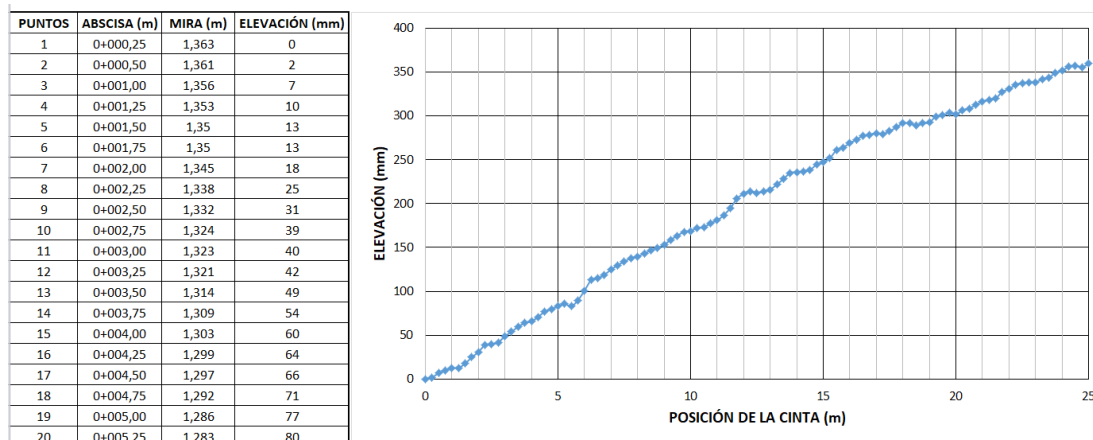


Fig. 60. Ejemplo de perfil medido con mira y nivel.

❖ Obtención de perfil “filtrado”

Un aspecto importante es que el perfil medido con una mira y dispositivo de nivel no se puede comparar con el perfil medido con un perfilador, o en este caso con un RTRMS de alta velocidad

de una manera simplificada (por ejemplo, usando gráficos de elevación simples). Esto se debe a que los sistemas inerciales filtran automáticamente las longitudes de onda de perfil más largas (la alineación vertical). Por lo tanto, los perfiles deben filtrarse de forma idéntica antes de que puedan compararse utilizando gráficos simples de elevación en función de la distancia (ASTM, 1995). Una explicación grafica se muestra en la Fig. 61 donde se muestra el perfil medido y después el perfil filtrado cuando las longitudes de onda y grados muy cortos han sido filtrados:

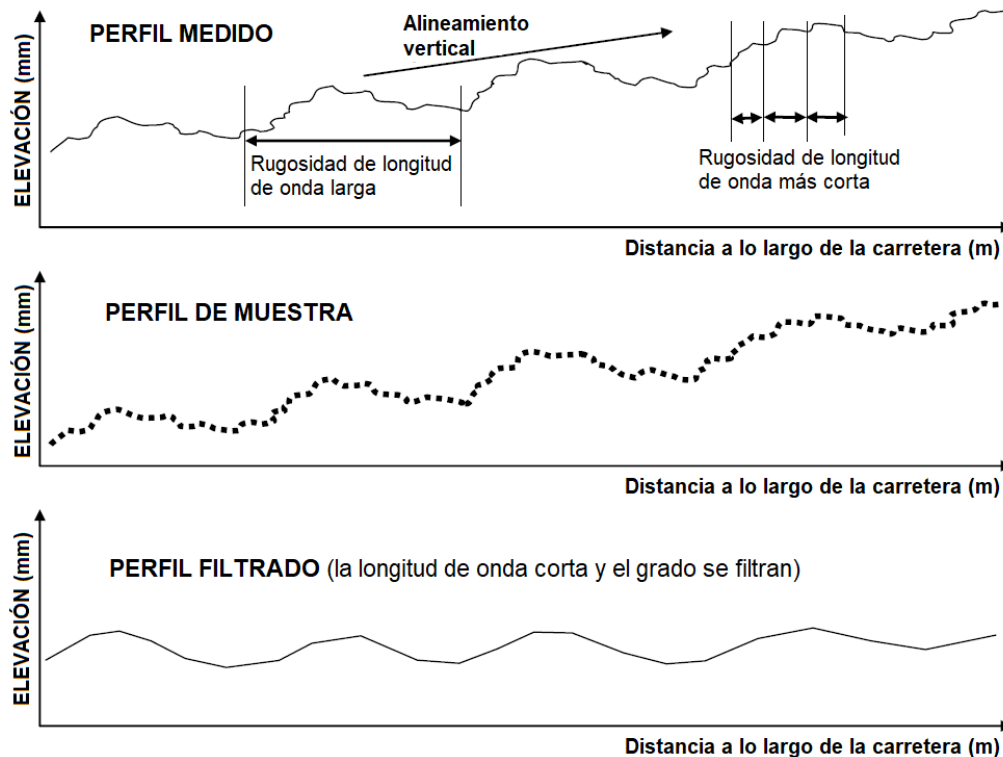


Fig. 61. Visualización de un perfil "filtrado".

Los sistemas de suspensión de vehículos están diseñados para eliminar o amortiguar el efecto de muchas de las longitudes de onda en un perfil. Ciertas longitudes de onda en un perfil de camino tendrán un mayor impacto en la rugosidad percibida que otros. Para cuantificar el grado de comodidad o incomodidad, primero se debe procesar o filtrar el perfil medido para aislar y "sumar" las amplitudes y variaciones de las longitudes de onda más importantes en el perfil. Por lo que para los perfiles obtenidos con nivelación se realizó un proceso de filtrado utilizando la pendiente media de su respectiva sección, en donde se sustrajo el efecto de esta pendiente.

❖ Computación del IRI

Dentro de la norma ASTM indica que si el índice de rugosidad obtenido por nivelación se va a utilizar como referencia de calibración para un sistema de tipo de respuesta (RTRRMS), se sugiere usar la escala del IRI. Sayers et al. (1986b) describe los detalles usados para calcular el IRI, mediante el uso de un programa de computadora. El IRI se obtiene simulando un modelo de vehículo de cuarto de carro que atraviesa el perfil, utilizando valores de parámetros de vehículo estandarizados y una velocidad de viaje simulada a 80 km/h.



El cálculo de IRI se logra al calcular cuatro variables como funciones del perfil medido (estas cuatro variables simulan la respuesta dinámica de un vehículo de referencia que se desplaza sobre el perfil filtrado). Las ecuaciones para las cuatro variables se resuelven para cada punto de elevación medido, excepto para el primer punto. La pendiente promedio durante los primeros 11 m (0.5 segundos a 80 km/h) se usa para inicializar las variables asignando los siguientes valores:

$$Z'_1 = Z'_3 = \frac{(Y_a - Y_1)}{11} \quad (13)$$

$$Z'_2 = Z'_4 = 0 \quad (14)$$

$$a = \frac{11}{dx + 1} \quad (15)$$

donde:

Y_a: El "a^{avo}" punto de elevación.

Y₁: El primer punto

dx: Intervalo o separación de muestra

Para un intervalo $dx = 0.25$ m, la Ecuación 13 será la diferencia entre el 45^{avo} punto y el primer punto de elevación para establecer la pendiente inicial en el cálculo del IRI. Las siguientes cuatro ecuaciones son resueltas para cada punto de elevación, desde 2 hasta n (n = número de mediciones de elevación).

$$Z_1 = s_{11} * Z'_1 + s_{12} * Z'_2 + s_{13} * Z'_3 + s_{14} Z'_4 + P_1 * Y' \quad (16)$$

$$Z_2 = s_{21} * Z'_1 + s_{22} * Z'_2 + s_{23} * Z'_3 + s_{24} Z'_4 + P_2 * Y' \quad (17)$$

$$Z_3 = s_{31} * Z'_1 + s_{32} * Z'_2 + s_{33} * Z'_3 + s_{34} Z'_4 + P_3 * Y' \quad (18)$$

$$Z_4 = s_{41} * Z'_1 + s_{42} * Z'_2 + s_{43} * Z'_3 + s_{44} Z'_4 + P_4 * Y' \quad (19)$$

Donde:

$$Y' = (Y_i - Y_{i-1}) / dx = \text{entrada de pendiente} \quad (20)$$

$$Z'_j = Z_j \text{ de la posición anterior, } j = 1, 4 \quad (21)$$

Y s_{ij} y p_j son coeficientes que se fijan para un intervalo de muestra dado, dx . Por lo tanto, las Ecuaciones 16-19 se resuelven para cada posición a lo largo de la trayectoria de la rueda. Después de que se resuelven para una posición, la Ecuación 21 se usa para restablecer los valores de Z'_1 , Z'_2 , Z'_3 y Z'_4 para la siguiente posición. También para cada posición, la pendiente rectificadora (RS por sus siglas en inglés) del perfil filtrado se calcula como la Ecuación 22:

$$RS_i = |Z_3 - Z_1| \quad (22)$$

El IRI estadístico es el promedio de la variable RS sobre la longitud del sitio. Por lo tanto, después de que las ecuaciones anteriores se hayan resuelto para todos los puntos de perfil, el IRI se calcula en base a la Ecuación 23:

$$IRI = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=2}^n RS_i \quad (23)$$

Este proceso es válido para cualquier separación dx que va desde los 0.25 m hasta 0.61 m. El IRI calculado tendrá unidades consistentes con las utilizadas para las medidas de elevación y para el



intervalo de muestra. Si la elevación se mide en mm, y dx tiene unidades de m, entonces IRI tendrá las unidades preferidas: $\text{mm/m} = \text{m/km} = \text{pendiente} \times 1000$.

El algoritmo descrito en el documento del Banco Mundial N 46 para calcular el IRI fue cambiado al lenguaje de Matlab como se muestra en la Fig. 62.

```
% Configuración de constantes
DX=0.25;
k=2;
BL=(k-1)*DX;
ST=[0.9966071,0.01091514,-0.002083274,0.0003190145;
    -0.5563044,0.9438768,-0.8324718,0.05064701;
    0.02153176,0.002126763,0.7508714,0.008221888;
    3.335013,0.3376467,-39.12762,0.4347564];
PR=[0.005476107;1.388776;0.2275968;35.79262];
% Lectura del perfil de elevacion
Y=xlsread('seccion_1_1_2.xlsx');
Z1=[(Y(45,1)-Y(1,1))/11;0;(Y(45,1)-Y(1,1))/11;0];
RS=0;
for contador=2:size(Y,1)
    YP=(Y(contador,1)-Y(contador-1,1))/BL;
% Respuesta del vehiculo
    for i=1:4
        Z(i)=PR(i,1)*YP;
        for j=1:4
            Z(i)=Z(i)+ST(i,j)*Z1(j);
        end
    end
    Z1=Z;
    RS=RS+abs(Z(1)-Z(3));
    disp=RS*DX;
    iri=RS/(contador-1);
end
IRI=iri
```

Fig. 62. Algoritmo utilizando para obtener el IRI a través de MATLAB.

Este algoritmo presenta en las primeras 8 líneas los parámetros del vehículo necesarios para la simulación del cuarto del carro y el DX, este último es la separación de 0.25 m de cada medición del perfil. También se modificó el algoritmo, de manera que recoja automáticamente todos los puntos del perfil en vez de ir ingresándolos uno por uno, estos puntos deben estar puestos en milímetros y guardados en un libro de Excel (por ejemplo, con el nombre de: “sección_1_1_2” como se observa en Fig. 64). El algoritmo se ejecuta, dando como resultado final el IRI real del perfil ingresado.

3.2.4 Calibración

Una vez obtenidos los IRI de las secciones específicas para la calibración mediante los dos métodos descritos anteriormente, se trazan los valores en bruto del RTRRMS (obtenidos mediante la aplicación Roadroid) contra los valores IRI (obtenidos mediante mira y nivel), con los valores RTRRMS en el eje X y los valores de IRI reales en el eje Y, tal como se muestra en Fig. 63.

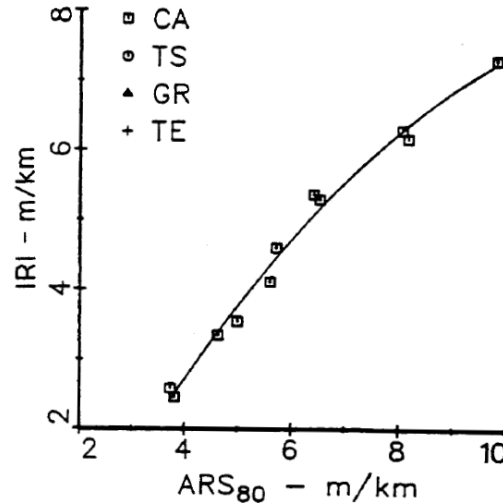


Fig. 63. Obtención de la ecuación de calibración entre IRI y ARS₈₀. Sayers et al., 1986b.

Entonces, se ajusta una línea a los puntos de datos graficados, que se utiliza para obtener la ecuación de calibración. Es necesario indicar que la tendencia de las variables puede ser no lineal, como en el ejemplo de la Fig. 65, por lo que se puede utilizar transformaciones para linealizar tendencias exponenciales y logarítmicas, lo cual se realiza con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Función exponencial: } ARS_{80}^* = ARS_{80}; IRI^* = \ln(IRI) \quad (24)$$

$$\text{Función logarítmica: } ARS_{80}^* = \ln(ARS_{80}); IRI^* = IRI \quad (25)$$

Al tener los valores de cada variable (ya sean para la tendencia lineal o las tendencias exponencial y logarítmica linealizadas) se obtiene la ecuación de calibración mediante el método de los mínimos cuadrados con la aplicación de las Ecuaciones 26 y 27, una para cada valor estimado b_0 y b_1 de la ecuación de la recta estimada $\hat{y} = b_0 + b_1x$:

$$b_1 = \frac{(n \sum_{i=1}^n ARS_{80_i} IRI_i) - (\sum_{i=1}^n ARS_{80_i})(\sum_{i=1}^n IRI_i)}{(n \sum_{i=1}^n ARS_{80_i}^2) - (\sum_{i=1}^n ARS_{80_i})^2} \quad (26)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n IRI_i - b_1 \sum_{i=1}^n ARS_{80_i}}{n} \quad (27)$$

Dando como resultado que las estimaciones de IRI hechas a partir del RTRRMS usando la ecuación de calibración son de hecho las medidas de rugosidad calibradas del RTRRMS. En el caso de las variables linealizadas se deben expresar en su tendencia original mediante la deslinealización, para así obtener sus respectivas ecuaciones: exponencial, logarítmica o potencial. La precisión de las medidas calibradas se estima aproximadamente como la dispersión de los puntos sobre la línea ajustada (coeficiente R^2), por lo que mientras menor es la dispersión, mejor es la precisión.



3.2.5 Correlación PCI-IRI

Una vez que se obtuvieron los datos de los dos análisis: siendo para el primer análisis, los índices PCI e IRI calibrados para cada sección; y los datos del segundo análisis, que son los valores IRI máximos junto con el PCI de la losa sobre la que se ubican, se procedió a calcular el coeficiente de correlación lineal mediante la Ecuación 28, a partir de la muestra obtenida de valores de las dos variables (PCI_1, IRI_1), ..., (PCI_n, IRI_n):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(PCI_i - PCI_{prom}) * (IRI_i - IRI_{prom})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (PCI_i - PCI_{prom})^2 * \sum_{i=1}^n (IRI_i - IRI_{prom})^2}} \quad (28)$$

Con las Ecuaciones 24 y 25 se obtienen los valores linealizados de las dos variables (PCI^*_1, IRI^*_1), ..., (PCI^*_n, IRI^*_n), con los cuales también se puede aplicar la Ecuación 28 para obtener el coeficiente de correlación de Pearson. Finalmente se escoge el r mayor entre los 3 tipos de tendencias: lineal, exponencial y logarítmica.

Para encontrar las ecuaciones de las rectas ajustadas de la correlación entre PCI e IRI se utilizan las Ecuaciones 26 y 27 pero cambiando las variables resultando las Ecuaciones 29 y 30:

$$b_1 = \frac{(n \sum_{i=1}^n PCI_i IRI_{real_i}) - (\sum_{i=1}^n PCI_i)(\sum_{i=1}^n IRI_{real_i})}{(n \sum_{i=1}^n PCI_i^2) - (\sum_{i=1}^n PCI_i)^2} \quad (29)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n IRI_{real_i} - b_1 \sum_{i=1}^n PCI_i}{n} \quad (30)$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se expone los resultados obtenidos de los análisis realizados. En el primer análisis se presentan los resultados del PCI de cada una de las secciones que conforman los dos carriles y su interpretación en el estado de la vía. También, se presentan los valores de eIRI y cIRI obtenidos mediante la aplicación Roadroid. Frente a la necesidad de mejorar la precisión de los datos obtenidos con la aplicación, se presenta el subcapítulo de la calibración, permitiendo obtener el eIRI y cIRI corregidos de los dos carriles mediante las ecuaciones de calibración calculadas. En el segundo análisis, se presentan los valores IRI más altos obtenidos junto con el PCI de la losa correspondiente a cada punto. Finalmente, se presenta el análisis de la correlación entre PCI y eIRI y el PCI y cIRI, para los dos análisis respectivamente. Este capítulo incluye 5 subcapítulos:

- Análisis del PCI
- IRI con la aplicación Roadroid
- Calibración del IRI
- Correlación entre PCI e IRI calibrado (primer análisis)
- Correlación entre PCI e IRI calibrado (segundo análisis)

4.1 Análisis PCI

Los valores del PCI de las 43 secciones del carril #1 que conforman el área de estudio de la Avenida Loja se muestra en el Gráfico 1. El cálculo del PCI de cada sección de este carril se adjunta en el ANEXO 1. En base a la clasificación adoptada del PCI y el Gráfico 1 se tiene que 44 y 37% de la vía se encuentra en un estado excelente y bueno, respectivamente, lo que indica que el 81% del carril analizado tiene daños superficiales que no generan molestias a los conductores. Mientras que las 4 secciones de los primeros 200 metros y la sección N° 40 representan el 12% y forman parte del estado aceptable.

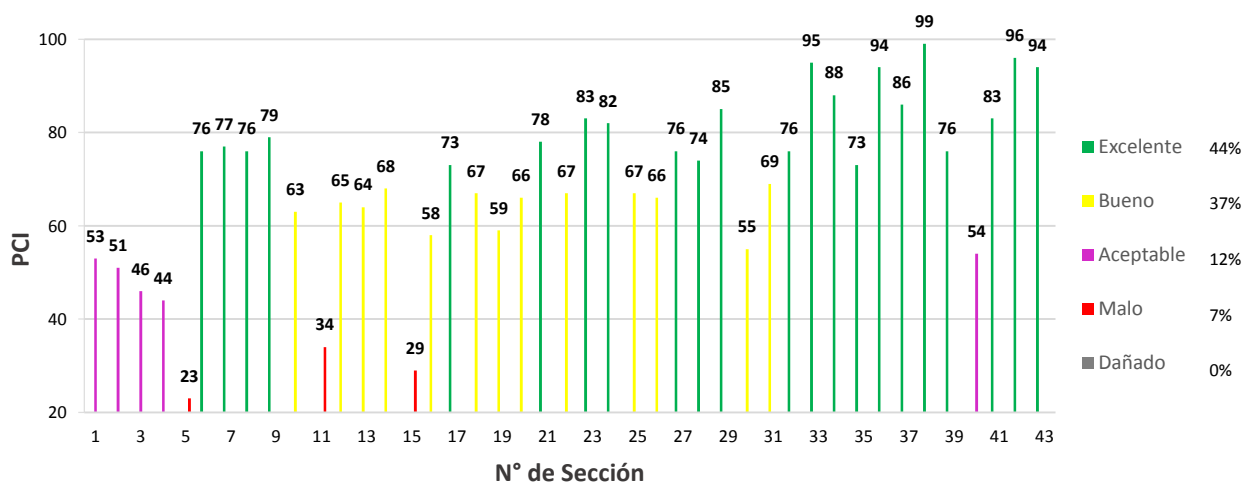


Gráfico 1. PCI de las secciones del carril # 1.

Solamente el 7% de la vía se encuentra en un estado malo, es decir, que tiene daños graves afectando considerablemente en la comodidad de los usuarios de la vía. Este 7% corresponde a las secciones 5, 11 y 15 con PCI de 23, 34 y 29, respectivamente. La sección N° 5 es la más deteriorada, con un PCI de 23, esta sección posee numerosos deterioros que afectan su funcionalidad, siendo el agrietamiento lineal y despedazamiento, los deterioros con los valores deducibles más altos. En las figuras 64 y 65 se muestran las fallas de agrietamiento lineal y despedazamiento de la sección 5, respectivamente.



Fig. 64. Agrietamiento lineal, severidad alta. Ubicada en la losa 3 de la sección 5 (carril #1).



Fig. 65. Despedazamiento, severidad alta. Ubicada en la losa 6 de la sección 5 (carril #1).

Las 43 secciones del carril #2 con sus respectivos valores del PCI se exponen en el Gráfico 2, y sus cálculos individuales se adjuntan en el ANEXO 2. Este gráfico indica que 79% del tramo de estudio tiene un estado funcional adecuado ya que el 46% de las secciones tiene un estado excelente, seguido del 33% con un estado bueno, con 22 y 13 secciones respectivamente. Existen 4 secciones en estado aceptable, equivalente al 9% y 5 secciones que se categorizan en un estado malo, siendo la N° 8 en peor estado, con PCI de 22. Cinco secciones corresponden al 12% y poseen una serie de deterioros que disminuyen la calidad de conducción, entre ellos se encuentran: despedazamiento, parches largos, desnivel de losas y grietas lineales.

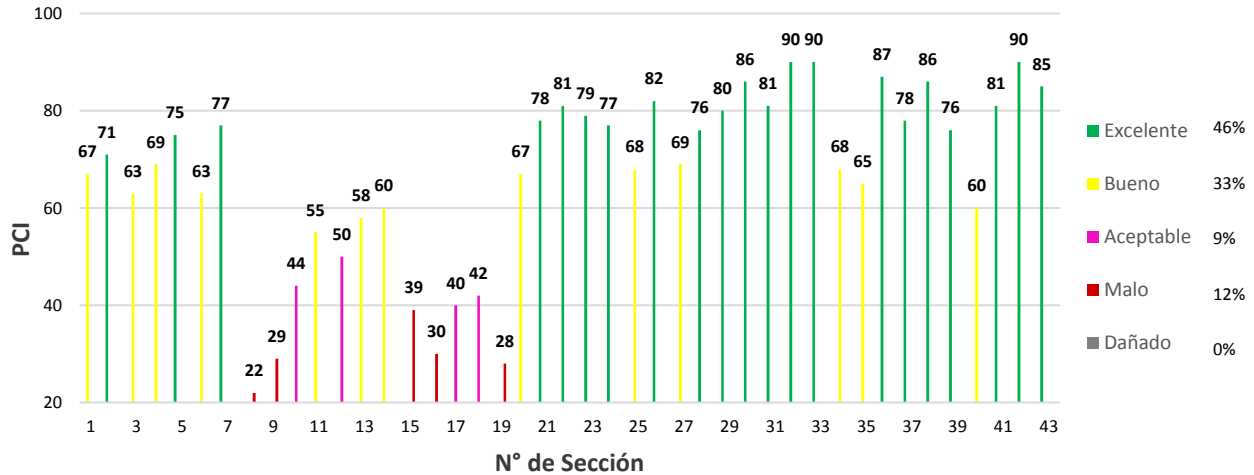


Gráfico 2. PCI de las secciones del carril #2.

El Gráfico 3 muestra que la condición del tramo de estudio de la Avenida se clasifica en cuatro categorías: excelente, bueno, aceptable y malo. Dicho esto, 39 secciones que corresponden el 45% tienen una condición de excelente; 30 secciones representan 35% y se clasifican como condición bueno; para la condición aceptable se tiene 9 secciones que representan 11%; finalmente, se tiene que 8 de las 86 secciones corresponden a la condición malo, siendo tan solo el 9%.

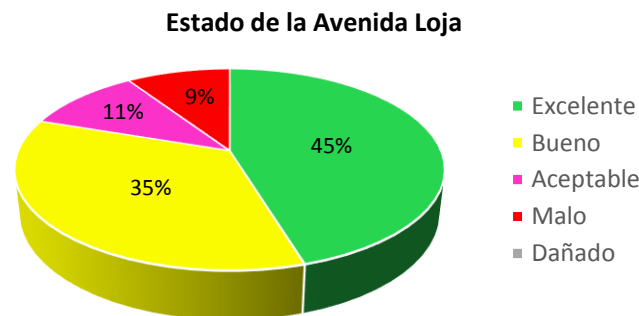


Gráfico 3. Clasificación del estado funcional de la Avenida Loja.

Otro estudio de la condición del pavimento de la Avenida Loja fue realizado por Puga (2018), donde se determinó el PCI mediante la utilización de dos programas denominados: PCI – PC17 y UnalPCIC. Por lo que se realizó una comparación de los resultados obtenidos, ya que dicho estudio se realizó sobre las mismas secciones que en la presente tesis, obteniéndose la Tabla 17:

Tabla 17. Comparación del PCI entre dos tesis.

Tramo	Estudio Actual		Estudio anterior (Puga, 2018)		
	Límites del tramo	PCI	Límites del tramo	PCI - PC17	UnalPCIC
1	Av. 10 de Agosto - Av. 1 ^{ero} de Mayo	61	Av. 10 de Agosto - Av. 1 ^{ero} de Mayo	62	61
2	Av. 1 ^{ero} de Mayo - Av. Don Bosco	55	Av. 1 ^{ero} de Mayo - Av. Don Bosco	46	46
3	Av. Don Bosco - Calle Alfonzo Pinzón	79	Av. Don Bosco - Av. De las Américas	86	84

En base a la Tabla 17 se puede observar que en el tramo 1, el PCI es idéntico al obtenido con los dos programas del estudio anterior, conservándose el mismo estado superficial. Dentro el tramo 2 existe una diferencia considerable, esto se debe a que algunas fallas fueron arregladas y parchadas con pavimento flexible antes del estudio actual, obteniendo mayor PCI para este estudio. Y en el tramo 3 existe una pequeña variación, esto se atribuye a que en el estudio anterior el tramo en mención tiene una longitud extra, entre la calle Alfonzo Pinzón y la Avenida de las Américas, el mismo que se encuentra en un buen estado, generando un PCI mayor que el estudio actual.

Además, se realizó un análisis de las fallas que se presentan en las 8 secciones clasificadas en la condición “malo”, estas secciones se encuentran en los dos carriles, 3 en el carril #1 y 5 en el carril #2 (ver Tabla 18). Las fallas presentes en las 8 secciones se enumeran en la Tabla 19, resultando 10 diferentes tipos de fallas; la numeración de las fallas utilizada es la misma que en la norma ASTM D6433-11 explicada en capítulo II.

Tabla 18. Secciones en condición malo.

N	# de Carril	N° de sección	PCI	Condición
1S	2	8	22	Malo
2S	1	5	23	Malo
3S	2	19	28	Malo
4S	1	15	29	Malo
5S	2	8	29	Malo
6S	2	16	30	Malo
7S	1	11	34	Malo
8S	2	15	39	Malo

Tabla 19. Deterioros presentes en las secciones malas.

N°	Tipo de Falla	N°	Tipo de Falla
2	Agrietamiento de esquina	10	Parcheo pequeño
3	División de losa	11	Agregado pulido
5	Diferencia de elevación	14	Despedazamiento
8	Agrietamiento lineal	16	Mapa de grietas
9	Parcheo largo	19	Desprendimiento de junta



Para este análisis se utilizó los valores deducibles (DV) ya que este valor se deduce del daño que produce cada tipo de falla y lo transforma a una misma unidad para todas, unidad que varía de 0 a 100.

La Tabla 20 contiene los valores DV de cada falla presente en las secciones de análisis, donde las 8 secciones están ordenadas en la primera fila y las 10 fallas en la primera columna.

Tabla 20. Fallas de las 8 secciones en estado Malo.

Tipo de falla	Secciones en estado malo								Suma	% de presencia
	1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8S		
2		6					42		48	25
3		16	22	22			22		82	50
5	2			10	18	9	2	17	58	75
8	20	51	47	21	24	29	14	21	227	100
9	35	18	54	42	40	47	23	35	294	100
10	4	1		5	2		6	2	20	75
11		7				2		7	16	38
14	95	46	40	51	86	57	32	56	463	100
16		5							5	13
19		4	4	4		12	2	4	30	75

En base a la Tabla 20 se puede indicar que las fallas #8, 9 y 14 se manifiestan en las 8 secciones y con la particularidad que las 3 fallas contienen los DV más altos. También, se puede observar que la suma de los DV de estas 3 fallas son las más altas, llegando a 227, 294 y 463, concluyendo que el agrietamiento lineal, parcheo largo y despedazamiento son los deterioros que más afecta al estado funcional de una vía, debido a que éstos cubren grandes áreas y su forma de desgaste produce depresiones considerables en la superficie de las vías generando mayores molestias a los conductores. Además, las fallas #5, 10 y 19 se manifiestan en 6 secciones de las 8, representando el 75%, y se trata de las fallas: diferencia de elevación, parcheo pequeño y desprendimiento de junta. Su alto porcentaje de ocurrencia se debe a que la Avenida Loja es una vía antigua y ha recibido una gran cantidad de mantenimientos para corregir baches y no una rehabilitación adecuada.

4.2 IRI con Roadroid

Luego de haber realizado los recorridos con el vehículo de prueba usando la aplicación Roadroid, se descargaron los datos de la plataforma www.roadroid.com, y se procesaron en la aplicación Excel. Se realizaron tabulaciones para cada recorrido y cada sección, para obtener los resultados representados en gráficos del IRI estimado (eIRI) e IRI calculado (cIRI).

El Gráfico 4 presenta los resultados tabulados obtenidos con la aplicación Roadroid, para el recorrido del carril #1 como se muestran en ANEXO 3, donde se observa que la gran mayoría de valores eIRI y cIRI son diferentes en una misma sección. Esta diferencia indica que este carril posee valores de macrotextura que no se asemejan con los valores de rugosidad. También se atribuye esta diferencia a que la velocidad establecida por los creadores de la aplicación debe de ser mayor a 60 km/h, para evitar errores. Se observa también en el Gráfico 4 que los picos más altos (más desfavorables) en la escala del eIRI ocurrieron dentro de las secciones 11 y 15, ubicados después de pasar por la Av. Primero de Mayo y la Av. Isabel la Católica, respectivamente. Mientras que en la escala cIRI los picos más representativos se dieron en las secciones 11, 19 y 41, situados pasando la Av. Primero de

Mayo, la Av. Isabel la Católica y la Av. Don Bosco, respectivamente. El cIRI presenta algunas secciones con valores picos más altos y más bajos que el eIRI, esto implica que en este carril existe mayor variabilidad en los resultados de rugosidad que los de macrotextura.

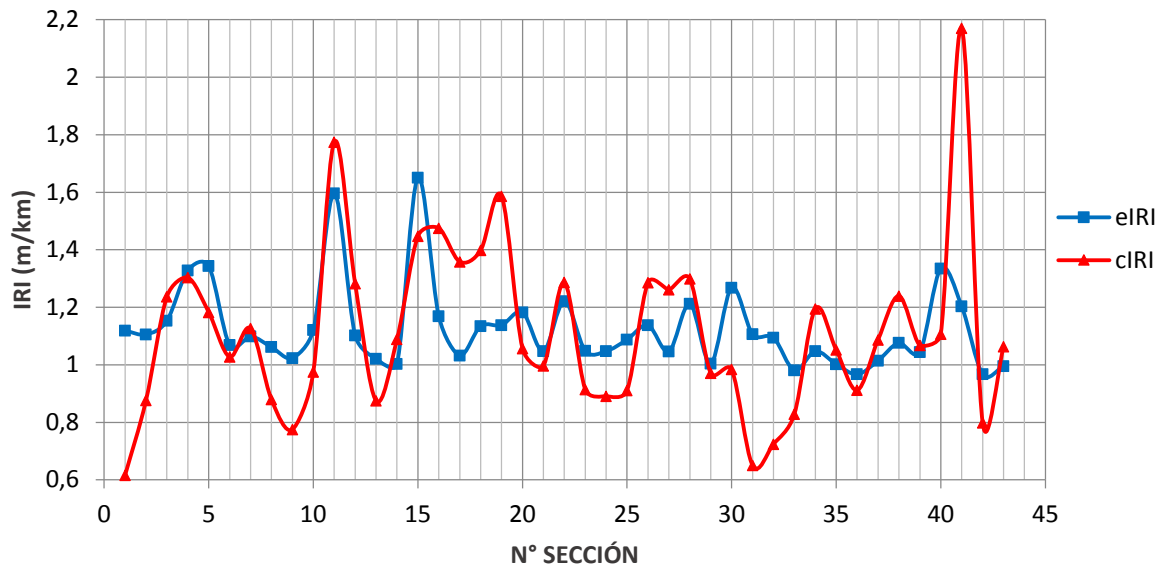


Gráfico 4. eIRI y cIRI obtenidos en el carril #1.

Dentro de Gráfico 5, se presentan los valores de eIRI contra los valores de cIRI de cada sección perteneciente al carril #1, proporcionados por la aplicación Roadroid, con la finalidad de conocer si estos dos índices, tienen algún tipo de correlación o tendencia similar. Se observa que estos datos dieron un valor de correlación R^2 igual a 0,2577, indicando que los datos obtenidos del programa no tienen relación entre sí. Por lo que en este caso no similitud entre los valores de textura y rugosidad.

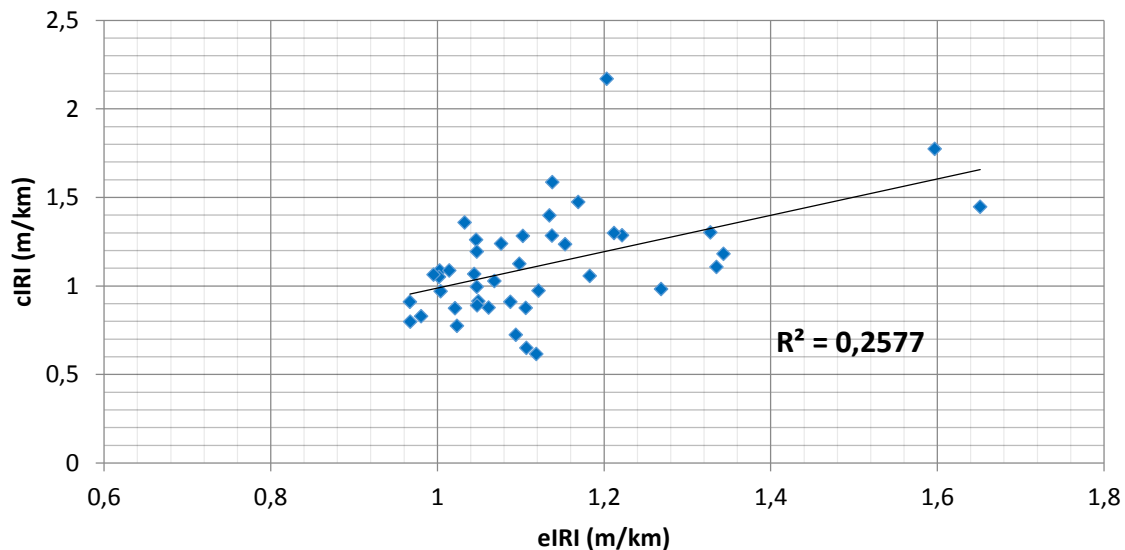


Gráfico 5. Correlación entre eIRI y cIRI, para carril #1.

En la Gráfico 6 se muestran los valores eIRI y cIRI respectivamente del carril #2 obtenidos de ANEXO 4, donde se observa de igual manera que para este recorrido los valores de macrotextura y rugosidad en una misma sección son muy diferentes. El valor eIRI de cada sección es superior que el valor cIRI, por lo que existe mayor influencia de la textura superficial en las lecturas realizadas. En la escala eIRI los picos ocurrieron dentro de las primeras 20 secciones, siendo los tramos 5 y 9 los más altos y se encuentran ubicados antes y después de la intersección con la Av. Primero de Mayo, respectivamente. Mientras que los valores más altos de cIRI se hallan entre las secciones 9 y 20, siendo los más desfavorables en las secciones 9, 15 y 19, ubicadas después de cruzar la Av. Primero de Mayo para la primera sección y la Av. Isabel la Católica para las dos restantes.

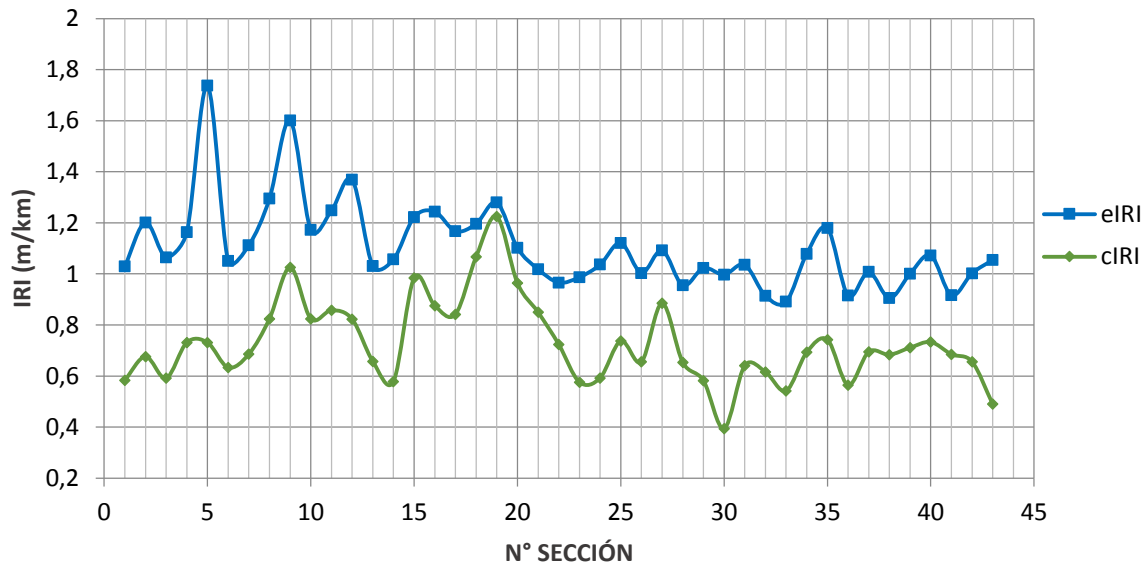


Gráfico 6. eIRI y cIRI obtenidos en el carril #2.

De igual manera que para el primer carril, se graficó los valores eIRI y cIRI del carril #2 para buscar semejanzas de las lecturas del programa Roadroid, tal como se muestra en Gráfico 7. En este caso se tiene un R^2 de 0.3082, que presenta una mejoría con respecto al anterior caso, pero del mismo modo, no existe relación entre estos dos índices.

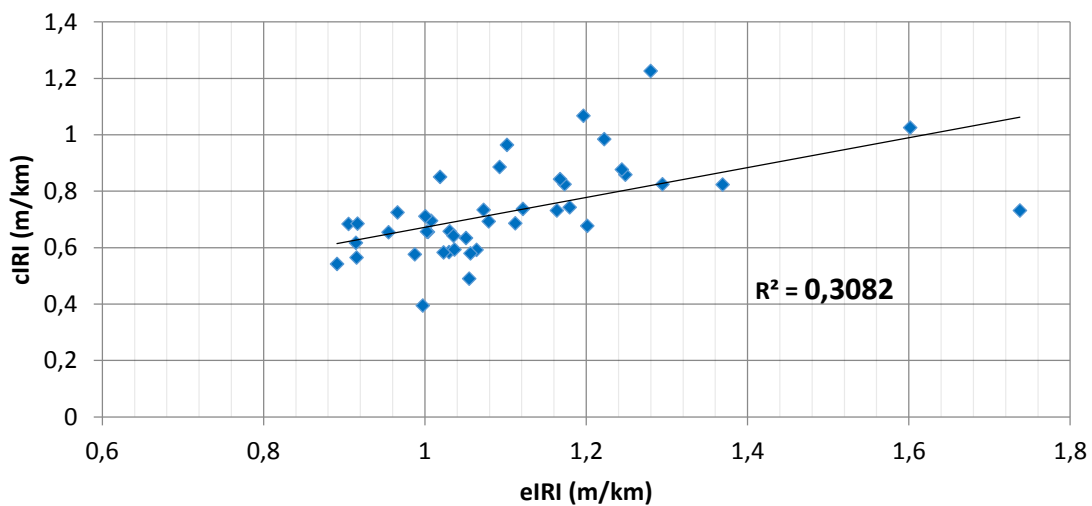


Gráfico 7. Correlación entre eIRI y cIRI, para carril #2.

Con los resultados obtenidos para ambos carriles, descritos en los Gráficos 5 y 7, se puede afirmar que los índices recolectados por Roadroid no poseen similitud alguna, para una velocidad de 40 km/h.

4.3 Calibración del IRI

Se procedió a escoger 7 secciones para obtener el valor exacto del IRI de éstas mediante el método de nivelación (clase 1). Estas secciones fueron escogidas de manera que abarquen valores IRI bajos, medios y altos obtenidos con Roadroid, tal como se muestra en Tabla 21:

Tabla 21. Secciones seleccionadas para la calibración con mira y nivel.

# SECCIÓN	CARRIL	eIRI	cIRI
33	#2	0,890	0,542
33	#1	0,981	0,829
26	#2	1,003	0,656
35	#2	1,179	0,742
19	#2	1,290	1,225
40	#1	1,335	1,107
11	#1	1,597	1,774

Para cada sección se midió 400 puntos de elevación en total (200 por cada camino que pasó la rueda en intervalos de 25 cm cada punto). Luego, con la ayuda de la computadora se procedió a graficar el perfil de la vía, calcular la pendiente media de la misma y se dibujó el perfil filtrado de la sección. Se muestra un ejemplo en Gráfico 8 del perfil del recorrido de la rueda derecha de la sección 33 del carril #2. Todos los perfiles medidos y filtrados se pueden observar en ANEXO 5.

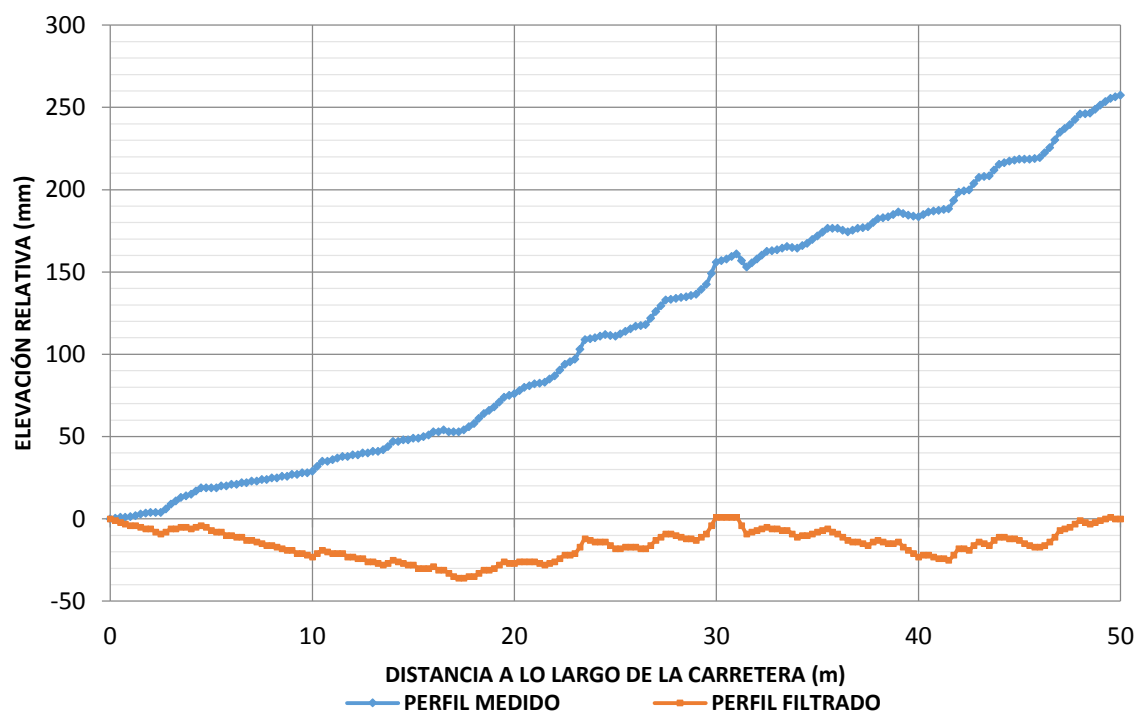


Gráfico 8. Perfil medido y filtrado del recorrido de la rueda derecha de la sección #33 (carril #2).



Una vez obtenido los perfiles filtrados se procedió a ejecutar el algoritmo descrito anteriormente en el Capítulo 3, Fig. 64, ingresando los puntos de elevación como dato de entrada, y se obtuvo los valores exactos del IRI de cada sección. Se muestra a continuación la Tabla 22 con los valores IRI (usando mira y nivel), eIRI y cIRI de las 7 secciones elegidas para la calibración.

Tabla 22. Valores IRI para la calibración.

Punto	# Sección	Carril	IRI (mira y nivel)	eIRI	cIRI
A	33	#2	4.66	0,890	0,542
B	33	#1	5.28	0,981	0,829
C	26	#2	6.01	1,003	0,656
D	35	#2	7.65	1,179	0,742
E	19	#2	7.90	1,290	1,225
F	40	#1	8.54	1,335	1,107
G	11	#1	9.84	1,597	1,774

Para la calibración, se graficó los valores IRI, obtenidos con mira y nivel, contra los valores eIRI (Gráfico 9) y mediante el proceso de regresión lineal se determinó la ecuación con mejor ajuste (valor R^2).

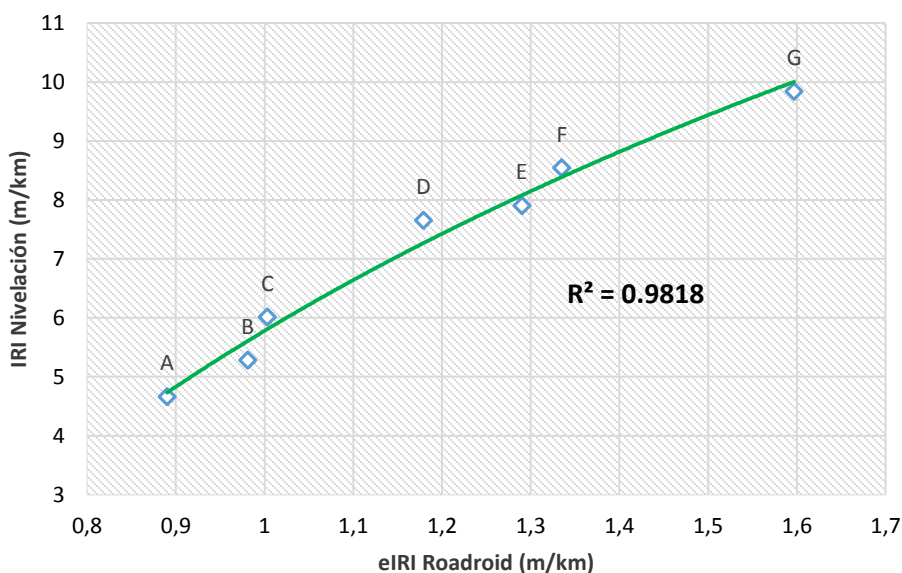


Gráfico 9. Calibración de los valores eIRI.

La calibración del IRI (con mira y nivel) y eIRI resultó con un R^2 de 0.9818 empleando una ecuación logarítmica (Ecuación 31), como se indica en el Gráfico 9. Las mediciones eIRI obtenidas con Roadroid (método clase 3) poseen una correlación muy fuerte con las mediciones hechas con mira y nivel (método clase 1), entonces, a partir de la Ecuación 31 se puede estimar el IRI a partir de las mediciones eIRI usando la aplicación Roadroid, siendo para este caso el eIRI para el eje X e IRI para el eje Y.

$$IRI = 9.0226 \ln(eIRI) + 5.7805 \quad (31)$$

De manera similar se graficó los valores IRI obtenidos mediante nivelación contra los valores cIRI (Gráfico 10) y de la misma manera se determinó la ecuación que mejor se ajustó a los datos.

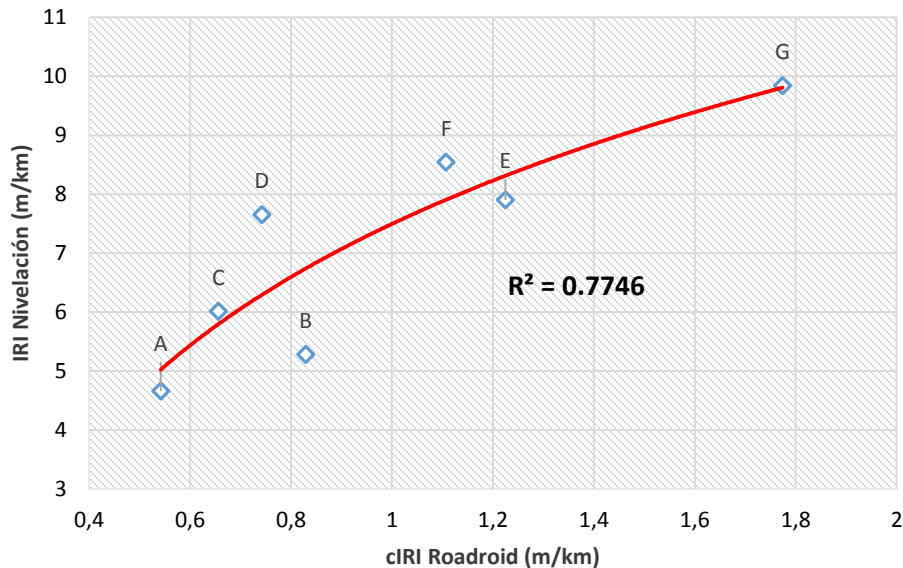


Gráfico 10. Calibración de los valores cIRI.

Para las mismas 7 secciones, la calibración de los valores IRI resultó buena, pero con un ajuste menor en comparación con la anterior, obteniéndose un R^2 de 0.7746 usando igualmente una ecuación logarítmica descrita en la Ecuación 32 (Gráfico 10). Con la Ecuación 32 solo se puede estimar valores aproximados o cercanos del verdadero IRI a partir de las mediciones de cIRI con Roadroid, pero con cierto margen de error.

$$IRI = 4.034 \ln(cIRI) + 7.4958 \quad (32)$$

Con las ecuaciones [31] y [32], obtenidas de las calibraciones mostradas anteriormente se obtienen los Gráficos 11 y 12, en los cuales se indica los perfiles eIRI y cIRI calibrados de los dos carriles:

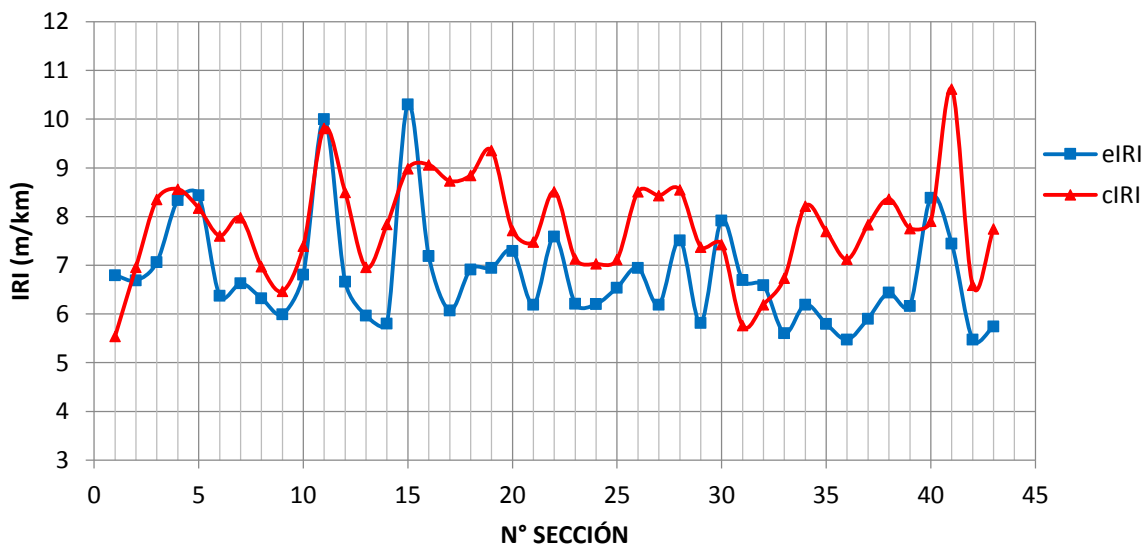


Gráfico 11. eIRI y cIRI calibrados del carril #1.

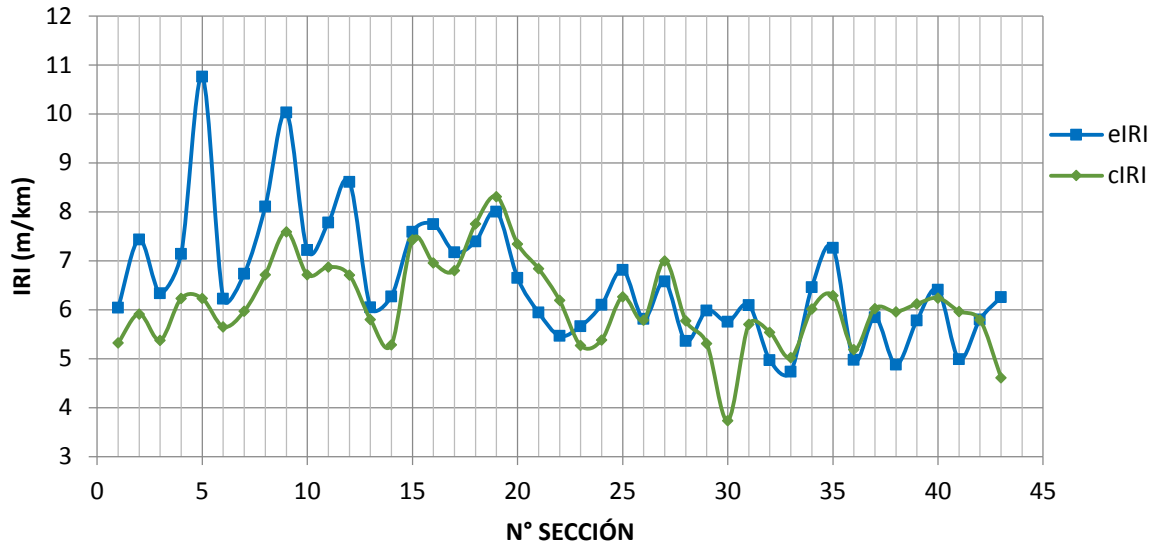


Gráfico 12. eIRI y cIRI calibrados del carril #2.

Para el primer carril, se obtuvo que todos los valores IRI fueron superiores a 5 m/km, con una media de 6.784 y 7.813 m/km para el eIRI y cIRI, respectivamente. Dentro de la escala IRI, descrita en el Capítulo 2, Fig. 23, esta vía está clasificada en su totalidad a un pavimento viejo, dañado y que presenta depresiones menores de manera frecuente. También, se observa que existen secciones (por ejemplo, la sección 11 y 15 en la escala eIRI y la sección 41 de la escala cIRI) que superan un IRI de 10 m/km, indicando que en la vía también se presenta tramos con depresiones superficiales profundas.

Para el segundo carril, se obtuvo que la gran mayoría de los valores IRI fueron superiores a 5 m/km, con una media de 6.589 y 6.119 m/km para el eIRI y cIRI, respectivamente. Dentro de la escala IRI, esta vía también está clasificada en su totalidad a un pavimento viejo, dañado y que presenta depresiones superficiales. Del mismo modo, se visualiza que hay secciones (por ejemplo, la sección 5 y 9 en la escala eIRI) que superan un IRI de 10 m/km, por lo que dentro de la vía también se presentaron al inicio, tramos con depresiones superficiales profundas que afectaron considerablemente la rugosidad de la vía. En el Gráfico 12 se observa que los valores más bajos del índice de rugosidad o donde se presenta menor irregularidad, son los tramos que van a continuación de la intersección de la Av. Don Bosco (correspondientes a las secciones 24 - 43).

4.4 Correlación PCI – IRI (primer análisis – valores promedio)

El Gráfico 13 describe la distribución de los puntos de los datos que comprenden los valores estimados de PCI y eIRI calibrado a lo largo de las líneas de tendencia lineal y logarítmica. Dado que el coeficiente de correlación de Pearson (r) es una medida de la fuerza de relación entre las dos variables y en base a la clasificación de la Tabla 23 se puede alegar que, los dos modelos representados por la Ecuación 33 y 34, tienen una relación lineal fuerte porque el coeficiente r se mantuvo con un valor absoluto mayor de $|-0.79|$ en los dos modelos. El signo negativo indica que las dos variables están inversamente relacionadas, es decir, mientras el PCI aumenta el eIRI disminuye.

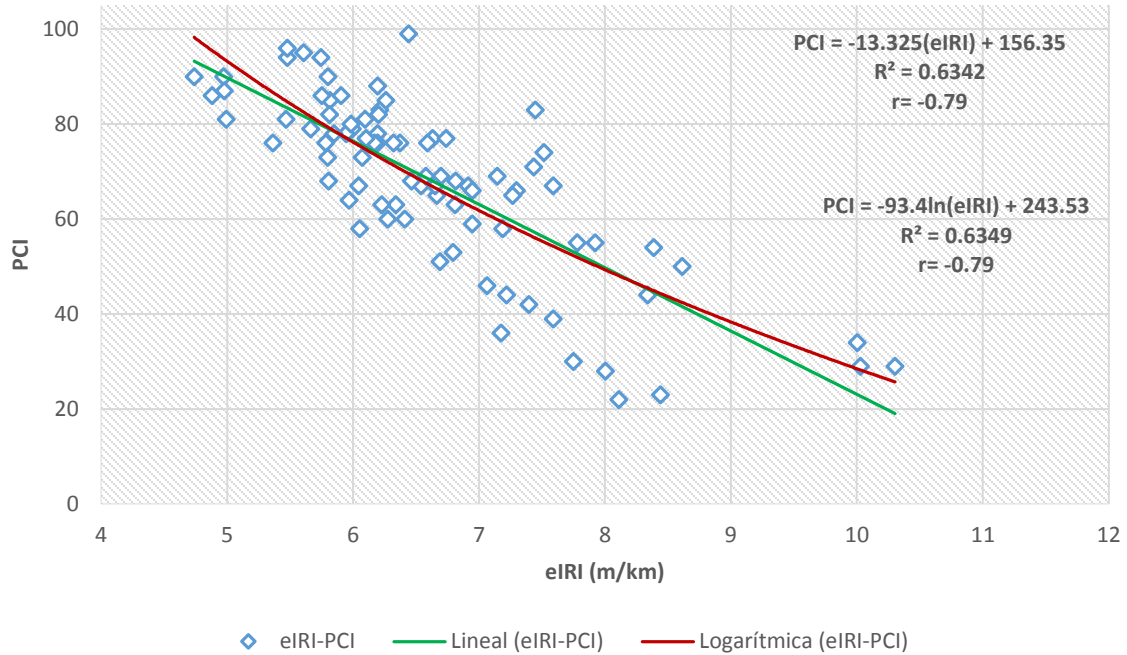


Gráfico 13. Correlación de Pearson entre PCI vs eIRI.

$$PCI = -13.325(eIRI) + 156.35 \tag{33}$$

$$PCI = 93.4 \ln(eIRI) + 243.53 \tag{34}$$

Tabla 23. Fuerza de relación lineal en función del valor del coeficiente de correlación. Chan, 2003.

Valor del Coeficiente de Correlación	Fuerza de relación lineal
> 0.8	Muy fuerte
entre 0.6 y 0.8	Fuerte
entre 0.3 y 0.5	Aceptable
< 0.3	Pobre

En el Gráfico 14 se observa una gran dispersión de los puntos, representándose en el coeficiente de Pearson de -0.35. Este valor se obtuvo en la regresión de las tendencias lineal y logarítmica (Ecuación 35 y 36, respectivamente). Debido a la ausencia de una tendencia el valor de correlación es muy bajo, y según la Tabla 23 se indica que la fuerza de la relación entre PCI y cIRI es aceptable. Al igual que en el caso anterior el signo negativo indica que el PCI y cIRI tienen una relación lineal inversa, es decir, a mayor PCI los valores del cIRI son menores

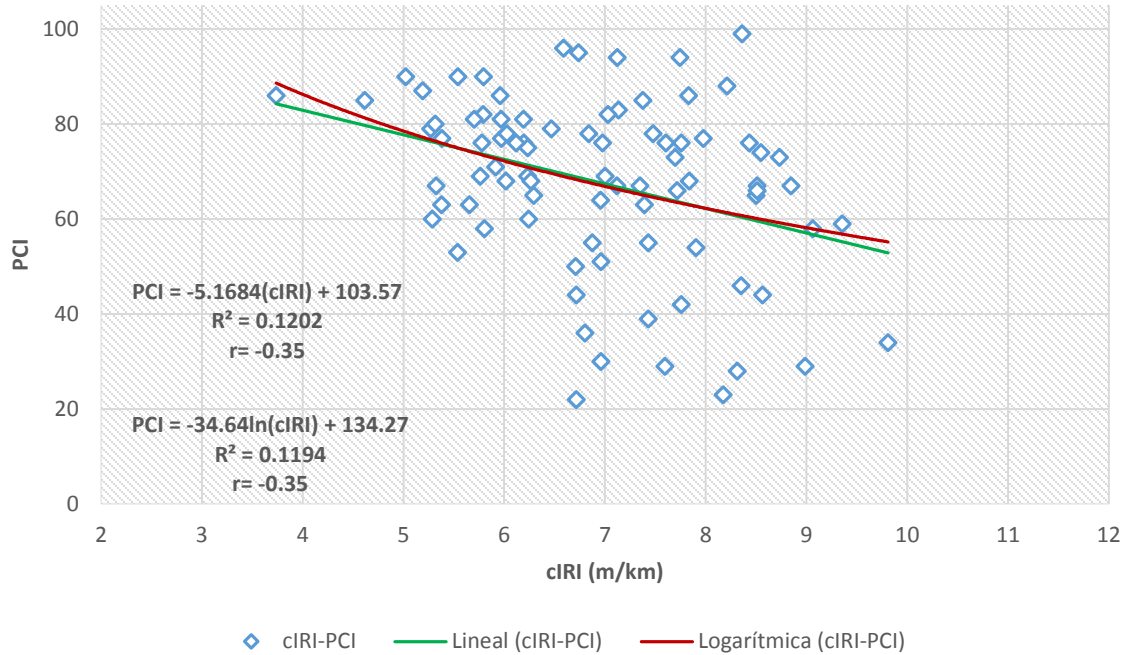


Gráfico 14. Correlación de Pearson entre PCI vs cIRI.

$$PCI = -5.1684(cIRI) + 103.57 \quad (35)$$

$$PCI = -34.64 \ln(cIRI) + 134.27 \quad (36)$$

4.5 Correlación PCI – IRI (segundo análisis – valores máximos)

Para este análisis se realizó un procedimiento similar al primero, con la diferencia que se utilizó el punto IRI máximo que se haya encontrado dentro de cada sección junto con el PCI de la losa, cuya ubicación es la misma que la del punto registrado y solo se tomó los valores más representativos (valores que superen un IRI de 3 m/km), también denominados “picos”. El Gráfico 15 muestra los valores máximos IRI obtenidos del ANEXO 3 y 4, donde se encuentran situados tomando en cuenta ambos carriles (el carril #2 comienza a partir de la posición 2150 m). Observándose que los valores de eIRI poseen un gran número de picos, siendo 16 valores, que fueron utilizados para este análisis. En tanto la cantidad de valores picos de cIRI es muy pequeño, con solo 4 valores, por lo que no hay suficientes datos para determinar una correlación.

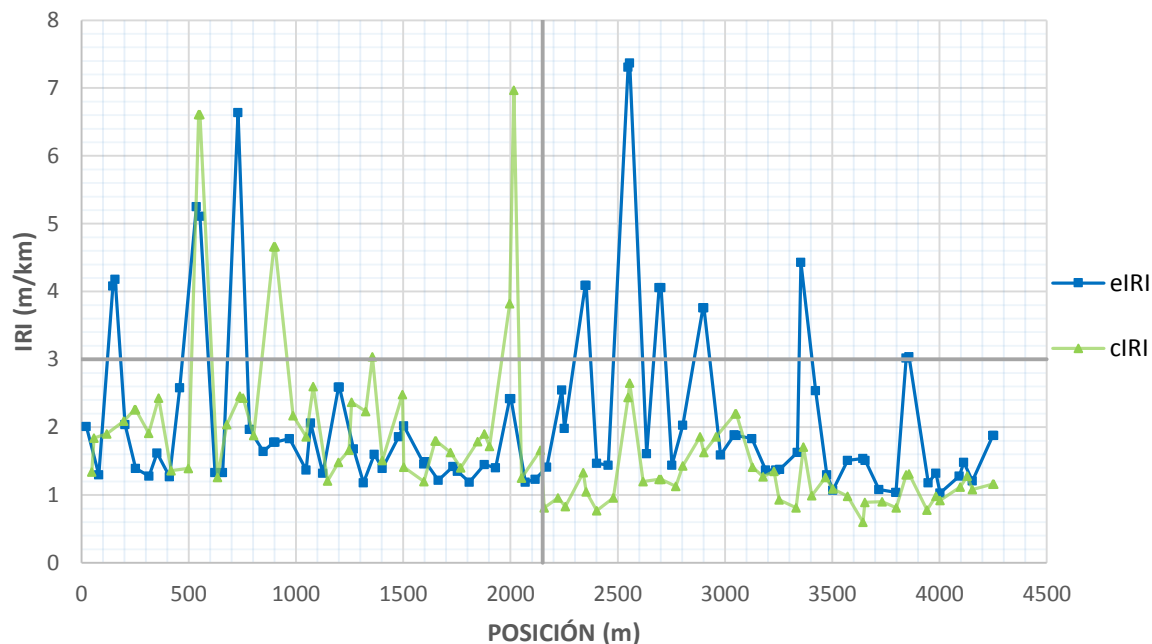


Gráfico 15. Ubicación y valores de IRI máximos

Una vez obtenidos los 16 valores eIRI picos junto con su posición a lo largo del recorrido, se calculó el PCI de las losas correspondientes, como se muestra en Tabla 24. Los cálculos del PCI de las 16 losas se adjunta en el ANEXO 6.

Tabla 24. PCI y eIRI de los valores picos.

eIRI Máx (m/km)	UBICACIÓN			N° Losa de la sección	PCI
	Carril	Sección	Posición dentro de sección (m)		
7,37	2	9	6	2	3
7,31	2	8	48	10	10
6,64	1	15	30	5	8
5,25	1	11	36	7	5
5,11	1	12	6	2	41
4,43	2	25	3	1	71
4,18	1	4	7	2	57
4,09	2	4	48	13	62
4,09	2	5	3	1	72
4,08	1	3	47	11	73
4,06	2	11	43	8	50
4,06	2	12	2	1	50
3,76	2	15	47	9	29
3,76	2	16	2	1	48
3,04	2	35	8	3	68
3,02	2	34	44	12	77

El Gráfico 16 muestra la distribución de los puntos que comprenden los valores picos de eIRI y PCI a lo largo de las líneas de tendencia lineal y exponencial respectivamente. Se observa una gran dispersión de los puntos, representándose en el coeficiente de Pearson (r) cuyo valor es de -0.85 para la ecuación exponencial (descrita en la Ecuación 38). En base a la clasificación de la Tabla 23 se puede alegar que, el modelo representado en la Ecuación 38, tiene una relación lineal muy fuerte dado que el coeficiente r tiene un mayor valor absoluto que $|-0.85|$. El signo negativo indica que las dos variables están inversamente relacionadas, es decir, mientras el PCI aumenta el eIRI disminuye, confirmando lo establecido en el primer análisis.

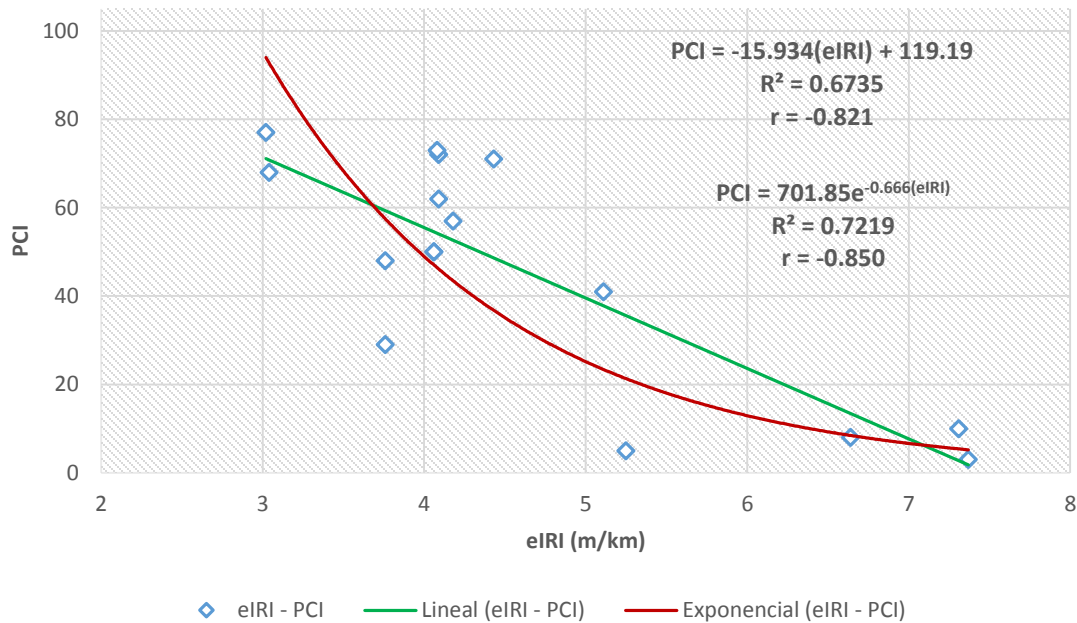


Gráfico 16. Correlación entre eIRI y PCI, usando valores picos.

$$PCI = -15.934(eIRI) + 119.19 \quad (37)$$

$$PCI = -701.85 e^{-0.666(eIRI)} \quad (38)$$



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El presente trabajo de titulación tiene como finalidad encontrar la correlación entre el IRI y el PCI en el pavimento rígido, analizando un tramo de la Avenida Loja, situado entre la Av. 10 de Agosto y calle Alfonso Pinzón, con una longitud de 2.3 km. Se dividió en 43 secciones para cada sentido de circulación de la avenida. Del estudio realizado se desprende:

El estado de la Avenida Loja según la norma ASTM D6433 se clasifica como excelente en un 45% de la vía, como bueno el 35%, aceptable el 11% y malo el 9% restante. En las ocho secciones, que conforman el 9% de las secciones clasificadas como malo, se manifiestan las fallas: agrietamiento lineal, parcheo largo y despedazamiento, permitiendo concluir que los 3 tipos de fallas son las más perjudiciales debido a su gran impacto negativo en la condición apropiada de la vía.

Para evaluar el IRI del pavimento rígido se empleó la aplicación Roadroid, cuyo tiempo empleado para la determinación de la rugosidad fue mucho menor en comparación con los datos recolectados usando mira y nivel, por lo que el rendimiento de esta aplicación es mejor. Roadroid proporciona dos índices, cIRI y eIRI, el primero está basado en la simulación del cuarto de carro para determinar la rugosidad y el segundo cuantifica la textura de la superficie del pavimento. Se determinó que Roadroid tiene gran correlación con los valores obtenidos usando mira y nivel. Los valores eIRI obtenidos con Roadroid, realizando viajes a una velocidad de 40 km/h, tuvieron una correlación R^2 igual a 0.98 con los valores IRI de mira y nivel, y por ende se puede obtener el IRI real de la vía con gran certeza, siendo necesario solo un par de recorridos usando la aplicación. Asimismo, se evidenció que Roadroid proporciona valores de cIRI con una correlación de R^2 de 0.77 con el IRI (mira y nivel), esta diferencia se debe principalmente a que no se pudieron llevar a cabo los recorridos a la velocidad mínima requerida de 60 km/h, descrita en el manual de Roadroid, debido a que la velocidad máxima permitida para esta vía es de 40 km/h, establecida por las leyes de la ciudad. Por lo tanto, se exige que el cIRI sea utilizado en autopistas y caminos interprovinciales donde se pueden alcanzar velocidades entre 60 – 80 km/h.

Ambos carriles presentaron eIRI y cIRI altos, con medias de 6.78 y 6.59 m/km para eIRI del carril #1 y #2 respectivamente. Mientras que para el cIRI se obtuvieron promedios de 7.81 y 6.12 m/km. Estas irregularidades son ocasionadas por el clima (lluvias y cambios drásticos de temperatura en el transcurso del día) y también son producto del aumento de tránsito vehicular en esta zona por el cierre de la Av. de las Américas (vía adyacente) que desvió a todos los vehículos que salían o entraban a la ciudad por esta ruta. Se debe indicar que existen hay secciones que se vieron más afectadas, que requieren de mantenimiento y/o rehabilitación de manera inmediata. Estas presentan un IRI superior a 9 m/km, las cuales son: sección 5 (ubicada entre Av. 10 de Agosto y Primero de Mayo), secciones 9 y 11 (ubicadas entre Av. Primero de Mayo e Isabel la Católica), secciones 15, 16 y 19 (ubicadas entre Av. Isabel la Católica y Don Bosco) y las sección 41 (ubicada entre Av. Don Bosco y calle Alfonso Pinzón). Dentro de la normativa ecuatoriana, NEVI, no es posible clasificar el pavimento, dado que no se estipula un límite del índice de rugosidad para pavimentos rígidos. Mientras que en la normativa uruguaya se clasifica al pavimento rígido como malo si el IRI sobrepasa los 4.3 m/km, por



lo que en base a este límite el pavimento de la Av. Loja se consideró como malo. Además, en base a la escala descrita por el Banco Mundial, se puede concluir que los resultados mostrados en la Av. Loja, presentan desgastes e irregularidades que afectan de gran manera el confort y seguridad de los usuarios y se encuentran clasificados como pavimentos viejos y deteriorados.

Los resultados de la correlación del primer análisis PCI-eIRI, utilizando los promedios de cada sección de 50 m, muestran una relación lineal fuerte, debido al valor del coeficiente de correlación lineal de -0.79. Considerando el signo negativo, los índices en mención están inversamente relacionados, lo que quiere decir que mientras el PCI aumenta el eIRI disminuye, esta relación esta descrita por la ecuación $PCI = -13.325(eIRI) + 156.35$, por lo tanto, es acertado afirmar que se puede utilizar la aplicación Roadroid para determinar el eIRI y de esta forma clasificar el estado actual de una vía urbana mediante esta ecuación, acelerando el proceso de evaluación de los pavimentos.

A partir del coeficiente de correlación entre PCI-cIRI de -0.35 se concluye que la relación lineal inversa entre los dos índices no es lo suficientemente buena, permitiendo alegar que no es útil emplear los valores cIRI obtenidos con la aplicación Roadroid para calcular el PCI. Este resultado se puede atribuir a que no hay relación entre los datos obtenidos de eIRI y cIRI, a causa de que, en el presente estudio, los recorridos se realizaron a una velocidad de 40 km/h y la aplicación Roadroid requiere mínimo 60 km/h para lecturas más representativas del cIRI.

Dentro del segundo análisis, la correlación PCI-eIRI utilizando los valores picos, se obtuvo un coeficiente de correlación lineal de -0.85. Indicando que los índices efectivamente se encuentran inversamente relacionados, mientras el eIRI sube el PCI disminuye, este modelo se encuentra representado por la ecuación $PCI = -701.85 e^{-0.666(eIRI)}$, lo que implica que utilizando la aplicación Roadroid, se puede determinar la ubicación aproximada de una losa que se encuentre en estado crítico y necesite una rehabilitación o intervención inmediata.

5.2 Recomendaciones

Cuando se requiera obtener el IRI mediante el uso de la aplicación Roadroid usando otro vehículo, para cualquier sección, tramo o longitud de vía, es necesario realizar una calibración. Esto se debe a que, el vehículo de prueba con el que se realice los recorridos tendrá características diferentes y por ende los índices que calcule Roadroid tendrán diferentes respuestas, aunque se realice sobre una sección ya analizada con la misma aplicación.

Para obtener valores cIRI más precisos, se recomienda realizar viajes de prueba a partir de los 60 km/h en vías libres de obstáculos y en horas con bajo tráfico vehicular, tales como autopistas, donde se puede alcanzar mayores velocidades y recorrer de manera rápida, sin interrupciones, segura y con velocidad constante. Conjuntamente, para una mayor precisión de la calibración se recomienda calcular el IRI mediante nivelación, de un número mayor de secciones que se utilizaron en este estudio.

Finalmente, se puede aplicar las recomendaciones detalladas anteriormente en un estudio similar para el pavimento flexible, ya que el presente trabajo de titulación se enfocó en el análisis del pavimento rígido. Se podría emplear este procedimiento en una autopista dentro de la ciudad de Cuenca, como la Panamericana Norte, cuyo límite de velocidad es 90 km/h.

REFERENCIAS



- (Arhin et al., 2015) Arhin, S. A., Williams, L. N., Ribbiso, A., & Anderson, M. F. (2015). Predicting pavement condition index using international roughness index in a dense urban area. *Civil Engineering Research*, página 8.
- (Arriaga et al., 1998) Arriaga M. C., Anguas P. G. & Rodríguez A. R.; Índice Internacional de Rugosidad en la Red Carretera de México, Publicación Técnica Número 10. Sanfandila, Querétaro, México, 1998.
- (ASTM, 1995) Designation E1364 95 – “Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method”.
- (ASTM, 2011) Designation: D6433 11 – “Standard Practice for Road and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys”.
- (Canavos, 1988) Canavos, George C. (1988). Probabilidad y estadística, aplicaciones y métodos. Naucalpan de Juárez, México: McGraw-Hill/Interamericana de Mexico, S.A. de C.V.
- (Chan, 2003) Chan, Y. H. (2003). Biostatistics 104: correlational analysis, *Singapore Med. J.* Vol 44(12): 614-619.
- (Elhadidy et al., 2015) Elhadidy, A. A., Elbeltagi, E. E., and Ammar, M. A. (2015). Optimum analysis of pavement maintenance using multi-objective genetic algorithms. *HBRC Journal*, 11(1):107 – 113.
- (FHWA, 2005) Federal Highway Administration, HPMS Field Manual Appendix E, Measuring Pavement Roughness (2005).
- (Forslof, 2014) Forslof Lars. Roughness and Texture. Publicado el 30 de noviembre de 2014. Recuperado de <https://www.linkedin.com/pulse/20141130211746-97325448-roughness-and-texture>.
- (Gaete et al., 1988) Gaete, R., de Solminihaç, H., Echeverría, G. Estudio de la resistencia al deslizamiento en pavimentos asfálticos chilenos. *Revista de Ingeniería de Construcción N°4*, Departamento de Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, marzo 1988.
- (Gartner, 2017) Fierce Battle Between Apple and Samsung to Hold the No. 1 Global Smartphone Ranking. Egham, U.K., febrero 15, 2017. Recuperado de <https://www.gartner.com/>.
- (González et al., 2008) González, A., O’Brien, E., Li, Y.-Y., & Cashell, K. (2008). The use of vehicle acceleration measurements to estimate road roughness. *Vehicle System Dynamics*, 46(6):483–499.
- (Harris et al., 2010) Harris, N., Gonzalez, A., O'Brien, E., & McGetrick, P. (2010). Characterisation of pavement profile heights using accelerometer readings and a combinatorial optimisation technique. *Journal of Sound and Vibration*, 329(5):497 – 508.
- (Johnston & Islam, 2013) Myles Johnston & Tasnimul Islam " Using cell-phones to monitor road roughness", University of Auckland, Auckland, New Zealand, 2013.
- (Juang & Amirhanian, 1992). Juang, C. H., & Amirhanian, S. N. (1992). Unified pavement distress index for managing flexible pavements, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 118 (5), 686-699.



(Montejo, 2002) Montejo F, Alfonso (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras (2 ed.). Bogota, DC, Colombia: Universidad Católica de Colombia.

(Morales, 2012) Morales Juan O., La Avenida Loja. Periódico El tiempo. Recuperado de <https://www.eltiempo.com.ec/noticias/columnistas/1/la-avenida-loja>.

(NEVI, 2012) Norma Ecuatoriana Vial, Volumen 6: “Conservación vial”. Capítulo 6.200. Manual de estudios para programar obras de conservación de pavimentos de carreteras.

(Nunez & Shahin, 1986) Nunez, M. M., & Shahin, M. Y. (1986). Pavement condition data analysis and modeling. Transportation Research Record, 1070, páginas 125-132.

(Osuna, 2008) Osuna R, Rafael (2008). “Propuesta para la implementación de un Sistema de administración de pavimentos para la red vial de la ciudad de Mazatlan”. UNAM.

(PIARC, 1995) PIARC. “Experimento Internacional AIPRC de Comparación y Armonización de las Medidas de Textura y Resistencia al Deslizamiento”. Comité Técnico C.1. Francia, 1995.

(Puga, 2018) Puga C. N. (2018). Evaluación funcional de pavimento rígido tramo avenida Loja (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

(Putra & Suprpto, 2018) Putra, Danny & Suprpto, Mamok (2018). Assessment of the road based on PCI and IRI roadroid measurement. MATEC Web of Conferences 195, 04006 (2018). ICRMCE 2018.

(Roadroid, 2017) Roadroid. “Essentials for professionals”. Guía Esencial para Roadroid 2. Versión de aplicación 2.3.2. Noviembre, 2017.

(Saéz, 2012) Sáez C, Antonio. Apuntes de Estadística para Ingenieros, Universidad de Jaén, Dpto. de Estadística e Investigación Operativa, 2012.

(Sayers et al., 1986a) Sayers, M. W.; Gillespie, T.D. & Queiroz, C., The International Road Roughness Experiment, Technical Paper Number 45. Banco Mundial. Washington 1986.

(Sayers et al., 1986b) Sayers, M.W.; Gillespie, T.D. & Paterson W. D. O., Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements, Technical Paper Number 46. Banco Mundial, Washington 1986.

(Shah et al., 2013) Shah, Y. U., Jain, S., Tiwari, D., & Jain, M. (2013). Development of overall pavement condition index for urban road network. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 104(Supplement C):332 – 341. 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG).

(U.S, Army, 1982) Pavement Maintenance Management, Technical Manual TM 5-623.

(Vittorio et al., 2014) Vittorio, A., Rosolino, V., Teresa, I., Vittoria, C. M., Vincenzo, P. G., & Francesco, D. M. (2014). Automated sensing system for monitoring of road surface quality by mobile devices. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 111 (Supplement C):242 – 251. Transportation: Can we do more with less resources? - “16th Meeting of the Euro Working Group on Transportation”- Porto 2013.



(Walpole et al., 2012) Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers S. L., & Ye., K. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias (9 ed.). Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V

(Zhang et al., 1993) Zhang, Z., Singh, N. and Hudson, W. R. (1993). Comprehensive ranking index for flexible pavement using fuzzy sets model. Transportation Research Board, TRR 1397, 96-102.



ANEXOS

ANEXO 1. Cálculo PCI del carril #1.

ANEXO 2. Calculo PCI del carril #2.

ANEXO 3. Datos tabulados de eIRI y cIRI obtenidos mediante Roadroid del carril #1.

ANEXO 4. Datos tabulados de eIRI y cIRI obtenidos mediante Roadroid del carril #2.

ANEXO 5. Perfiles medidos y filtrados para la calibración del IRI.

ANEXO 6. Calculo PCI de las 16 losas con los eIRI máximos.