



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Vial

**METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD
INTERNACIONAL (IRI) Y SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DE
GUATEMALA**

Ing. Fredí Maxelio Román Reyes

Asesorado por el Mtro. Ing. César Augusto Morales Castillo

Guatemala, febrero de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD
INTERNACIONAL (IRI) Y SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DE
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. FREDÍ MAXELIO ROMÁN REYES

ASESORADO POR EL MTRO. ING. CÉSAR AUGUSTO CASTILLO MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA VIAL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|---------------------------------------|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I | Ing. José Francisco Gómez Rivera |
| VOCAL II | Ing. Mario Renato Escobedo Martinez |
| VOCAL III | Ing. José Miltón de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Christian Moisés de la Cruz Leal |
| VOCAL V | Br. Kevin Armando Cruz Lorente |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|---------------------------------------------|
| DECANA | Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| DIRECTOR | Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí |
| EXAMINADOR | Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca |
| EXAMINADOR | Mtro. Ing. Gustavo Adolfo Cancinos |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) Y SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DE GUATEMALA

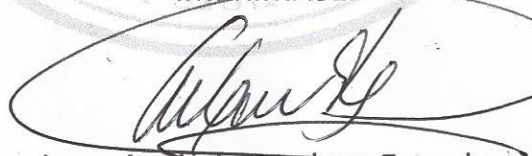
Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 12 de septiembre de 2019.

Ing. Fredí Maxelio Román Reyes

DTG. 076.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) Y SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DE GUATEMALA**, presentado por el **Ingeniero Fredí Maxelio Román Reyes**, estudiante de la **Maestría en Ingeniería Vial** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, febrero de 2020.

AACE/asga

Guatemala, Febrero 2020

EEPFI-059-2020

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **"METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) Y SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DE GUATEMALA"** presentado por el Ingeniero Civil Fredí Maxelio Román Reyes quien se identifica con Carné **100021118**, correspondiente al programa de Maestría en Artes Ingeniería Vial ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

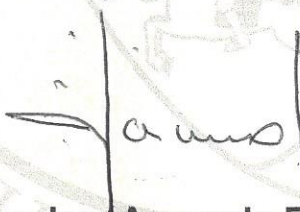
Guatemala, Febrero de 2020

EEPMI-058-2020

Como Coordinador de la Maestría en Artes de Ingeniería Vial doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) Y SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DE GUATEMALA”** presentado por el Ingeniero Civil **Fredí Maxelio Román Reyes** quien se identifica con Carné **100021118**

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, Febrero de 2020

En mi calidad como Asesor el Ingeniero Civil **Fredí Maxelio Román Reyes** quien se identifica con Carné **100021118** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) Y SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DE GUATEMALA”** quien se encuentra en el programa de Maestría en Ingeniería Vial en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. César Augusto Castillo Morales
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por guiarme día con día y darme sabiduría e inteligencia para poder concluir mis metas.
- Mis padres** Elsidio Román Vega y Odilia Reyes Meza, por el apoyo, comprensión y cariño que desde niño me han brindado, por guiarme en la vida con energía y por estar al pendiente siempre de mí.
- Mis hermanos** Elfido Felipe Román, su esposa Lisbeth Gudiel y Odilia Mercedes Román por ser el motivo de inspiración, siendo ejemplo en mí, con sus lecciones y experiencias para mi formación personal.
- Mis sobrinos** Luis Gerardo Román Gudiel, Daniela Sofia Román Gudiel y Barbarita Román, por su cariño y apoyo, haciéndome feliz en la vida.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Gloriosa y tricentenaria casa de estudios, brindándome formación académica y profesional. |
| Facultad de Ingeniería | Por forjar profesionales de éxito y brindar la oportunidad de seguir especializándonos en los diferentes campos de la ingeniería. |
| Escuela de Estudios de Postgrado | Por dotarme de conocimientos en mi vida profesional. |
| Ing. César Augusto Morales Castillo | Por su dedicación al asesorarme en la realización de mi trabajo de graduación. |
| Ing. Carlos Ramos y la Empresa SIVA | Por el apoyo en la elaboración de mi trabajo de graduación. |
| Licda. Flor de María Zeissig Directora de Planificación de la Municipalidad de Guatemala | Por brindarme el apoyo en el cumplimiento de esta meta. |

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.5.2.1. | Características de las Rutas Nacionales (RN) | 12 |
| 1.5.3. | Red terciaria | 13 |
| 1.5.3.1. | Características de Rutas Departamentales (RD)..... | 13 |
| 2. | ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) | 15 |
| 2.1. | Visión general de la escala de rugosidad IRI | 17 |
| 2.2. | Definición del IRI | 19 |
| 2.3. | Determinación del modelo matemático en el cálculo del IRI | 21 |
| 2.4. | Diferenciación del IRI según la longitud de apreciación | 23 |
| 2.5. | Particularidades en la medición y cálculo del IRI | 24 |
| 2.6. | Elementos que afectan la rugosidad en pavimentos flexibles | 25 |
| 2.6.1. | Efectos de cargas dinámicas en los pavimentos | 26 |
| 2.7. | Características de la rugosidad en los pavimentos | 27 |
| 2.8. | Descripción de los equipos y maquinaria en la medición del IRI..... | 28 |
| 2.8.1. | Equipo denominado perfilógrafos (<i>profilographs</i>) | 28 |
| 2.8.2. | Equipos denominados tipo respuesta (RTRRM) | 29 |
| 2.8.3. | Equipo nivel y estadía | 31 |
| 2.8.4. | Equipo Dipstick..... | 32 |
| 2.8.5. | Equipo Perfilómetro Inercial (Inertial Profilometer) | 33 |
| 2.9. | Categorización de los equipos para la medición de la rugosidad superficial de los pavimentos..... | 36 |
| 2.9.1. | Clase I: perfiles de precisión | 36 |
| 2.9.2. | Clase II: otros métodos perfilométricos | 37 |
| 2.10. | Estimaciones IRI por medio de ecuaciones de correlación | 38 |

| | | |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.10.1. | Valores subjetivos y medidas sin calibrar | 39 |
| 2.11. | Elementos que afectan la medición del IRI..... | 39 |
| 2.12. | Valores del IRI y especificaciones internacionales (escala del Banco Mundial)..... | 41 |
| 2.13. | Método para determinar el cálculo del IRI | 44 |
| 3. | CASO PRÁCTICO AUTOPISTA PALÍN - ESCUINTLA | 47 |
| 3.1. | Ubicación..... | 47 |
| 3.2. | Descripción del tramo | 48 |
| 3.3. | Proceso para la medición del IRI | 49 |
| 3.3.1. | Resultados obtenidos en la medición del IRI | 51 |
| 4. | PROPUESTA DE RECOMENDACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA GUATEMALA | 59 |
| 4.1. | Definición..... | 59 |
| 4.2. | Procedimiento..... | 60 |
| 4.3. | Equipo | 61 |
| 4.4. | Parámetros | 61 |
| 4.5. | Normas de aplicación | 62 |
| 4.6. | Medida..... | 64 |
| 4.7. | Pago | 64 |
| | CONCLUSIONES | 65 |
| | RECOMENDACIONES..... | 67 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 69 |
| | ANEXO | 71 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|-----------------------------------------------------------------|----|
| 1. | Ejemplificación pavimento flexible..... | 3 |
| 2. | Características del pavimento flexible | 4 |
| 3. | Ejemplo pavimento rígido..... | 6 |
| 4. | Porcentaje de la conformación de la red vial en Guatemala | 8 |
| 5. | Ubicación de la red de carreteras en Guatemala | 10 |
| 6. | Irregularidades en la carpeta asfáltica..... | 16 |
| 7. | Modelo cuarto de carro | 20 |
| 8. | Ejemplo: vialetas, boyas y reductores de velocidad | 25 |
| 9. | Efecto de carga dinámica en el pavimento..... | 27 |
| 10. | Perfilógrafo California..... | 29 |
| 11. | Modelo equipo tipo respuesta | 31 |
| 12. | Equipo nivel y estadía | 32 |
| 13. | Equipo Dipstick | 33 |
| 14. | Equipo de Perfilómetro Inercial | 35 |
| 15. | Equipo Perfilómetro Inercial | 35 |
| 16. | Descripción de la escala de IRI (m/km)..... | 42 |
| 17. | Tramo de evaluación (autopista Palín - Escuintla)..... | 48 |
| 18. | Nomenclatura de carriles | 48 |
| 19. | Perfilómetro Inercial (RSP) Dynatest-Mark III L5.2+ | 49 |
| 20. | Resultados IRI carril 5, calzada derecha..... | 51 |
| 21. | Resultados del IRI carril 7, calzada derecha | 52 |
| 22. | Resultados del IRI carril 6, calzada izquierda | 53 |
| 23. | Resultados del IRI carril 8, calzada izquierda | 54 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 24. Resultados (IRI) carril 10 auxiliar calzada izquierda | 55 |
| 25. Comparación IRI, PSI Y PCI ruta Palín - Escuintla | 57 |

TABLAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I. Clasificación general de la República de Guatemala según el tipo de rodadura, año 2019 | 9 |
| II. Valores de IRI utilizados en mantenimiento de carreteras por país | 17 |
| III. Cuantificaciones del modelo Cuarto de Carro | 23 |
| IV. Escala de rugosidad de carreteras pavimentadas con asfalto especificación ASTM E 1926 | 43 |
| V. Medición de rugosidad de carreteras pavimentadas con asfalto | 44 |
| VI. Valores obtenidos del IRI carril 5, calzada derecha | 52 |
| VII. Valores obtenidos del IRI Carril 7, calzada derecha | 53 |
| VIII. Valores obtenidos del IRI carril 6, calzada izquierda | 54 |
| IX. Valores obtenidos del IRI carril 8, calzada izquierda | 55 |
| X. Valores obtenidos del IRI carril 10 auxiliar, calzada izquierda | 56 |
| XI. Resumen de resultados obtenidos de IRI promedio | 56 |
| XII. Valores de IRI | 61 |
| XIII. Normas para la medición de la rugosidad | 62 |

LISTADO DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------------------|-----------------------------------------------------|
| C_s | Coeficiente de viscosidad del amortiguado |
| dt | Incremento del tiempo |
| h_{ps} | Elevación del perfil |
| km | Kilómetro |
| k_s | Constante elásticas de resorte |
| km/h | Kilómetros por hora |
| k_u | Constante elástica de resorte |
| L | Longitud del tramo en metros |
| m | Metro |
| mm | Milímetro |
| m/km | Metro por kilómetro |
| m/s | Metros por segundo |
| m_1 | Masa del eje apoyado por el neumático |
| m_2 | Masa del carro apoyado en la suspensión |
| mm/m | Milímetro por metro |
| m_s | Masa del vehículo |
| m_u | Masa del vehículo y eje |
| r_1 | Resorte vertical |
| r_2 | Suspensión del vehículo representada por un resorte |
| V | Velocidad del carro modelo en m/s |
| X | Distancia longitudinal en metros |

XV

Tiempo que el modelo toma en recorrer
cierta distancia X

z's

Velocidad vertical de la masa del vehículo

z'u

Velocidad vertical de la masa del eje

GLOSARIO

| | |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AASHO | The American Association of State Highway Officials (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales). |
| AASHTO | The American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte). |
| CA | Ruta Centroamericana |
| CIV | Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, Guatemala. |
| Conservación | Acción tendiente a mantener los estándares que corresponden a un funcionamiento predeterminado. |
| Construcción | Acción que corresponde a la materialización de un bien que no existe. |
| DGC | Dirección General de Caminos. |

| | |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ERD | Engineering Research Division (División de Investigación de Ingeniería). |
| Especificaciones | Vocablo general aplicado a todas las normativas, disposiciones y requisitos relativos a la construcción de obra vial. |
| Especificaciones especiales | Complemento y revisión de las Especificaciones generales, que abarcan las condiciones peculiares de la obra. |
| Especificaciones generales | Las especificaciones contenidas en las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la DGC. Comúnmente conocido como Libro Azul. |
| ERD | Engineering Research Division Federal (División de Investigación de Ingeniería). |
| FHWA | Federal Highway Administration (Administración federal de carreteras). |
| IRI | Index Roughnes International (Índice de Rugosidad Internacional). |

| | |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IRI_p | Índice de Rugosidad Internacional promedio. |
| Perfil longitudinal | Es el desarrollo sobre un plano de la sección obtenida empleando como plano de corte una superficie reglada cuya directriz es el eje longitudinal de la carretera, empleando una recta vertical como generatriz. |
| Perfil transversal | Se obtiene seccionando la vía mediante un plano perpendicular a la proyección horizontal del eje de la carretera. |
| PCI | (Pavement condition index) Índice de Condición del Pavimento, es un índice numérico que clasifica la superficie condiciones del pavimento, varía desde cero (0), para un pavimento fallado o en mal estado, hasta cien (100) para un pavimento en perfecto estado. |
| PSI | (Present Serviceability Index) Índice de Serviciabilidad Presente del pavimento, la condición necesaria de un pavimento para proveer a los usuarios un manejo seguro y confortable en un determinado momento. |

| | |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rehabilitación | Ejecución de las actividades constructivas necesarias para restablecer las condiciones físicas de la carretera a su situación como fue construida originalmente. |
| RD | Ruta Departamental. |
| RN | Ruta Nacional |
| RoadRuf | Software para analizar el perfil en carreteras. |
| RTRRM | Response Type Road Roughness Measuring Systems (Equipo Tipo Respuesta para medir la regularidad de las carreteras). |
| SIECA | Secretaría de Integración Económica Centroamericana. |
| Transductor | Dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente a la salida. |

RESUMEN

El aspecto rugoso que presentan las superficies de los pavimentos es una de las causas que incomodan a los usuarios de las carreteras, la cual generalmente está asociada a la modificación del estado de esfuerzos y deformaciones de la superficie de rodamiento; esto repercute en las actividades de conservación, mantenimiento y rehabilitación. Por tal aspecto, es importante poder predecir cuándo las carreteras han llegado a un nivel crítico de rugosidad, con el objeto de determinar las acciones correctivas que se deban tomar. Además, es importante la determinación de la rugosidad que presentan las superficies de las carreteras nuevas, al momento de terminarse de construir un proyecto carretero, a fin de determinar el cumplimiento de las especificaciones técnicas y los parámetros de calidad exigidos.

Este trabajo describe la metodología para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) aplicado a pavimentos flexibles; dando a conocer los procedimientos para el cálculo del mismo, garantizando así la calidad derivada del proceso constructivo, y las actividades que se requieren realizar de manera rutinaria o periódica para prolongar su vida útil.

El caso práctico realizado, fue sobre la Ruta CA-9 Sur, tramo autopista Palín - Escuintla, donde los resultados obtenidos de la medición del IRI, fueron encontrados dentro del rango idóneo esperado.

Se pretende que la metodología descrita en el presente trabajo, sea tomada en cuenta para trabajos de campo relacionados con la medición de este parámetro. Además, se propone recomendar su inclusión en la próxima revisión

de las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, documento rector de los procesos constructivos nacionales, con lo cual se obtendrán resultados mayores en lo referente a la calidad de la construcción de pavimentos flexibles.

OBJETIVOS

General

Proponer una metodología para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en pavimentos flexibles de Guatemala, que pueda estar reglamentada en las Especificaciones Generales de Construcción.

Específicos

1. Analizar la tipología de la Red Vial en Guatemala para conocer la composición de carreteras con estructura de pavimento flexible.
2. Describir los procesos que se realizan para el cálculo del IRI aplicables a los pavimentos flexibles.
3. Ejemplificar un caso práctico realizado por una empresa para la medición del IRI en un trayecto vial nacional, específicamente la Ruta CA-9 Sur, tramo autopista Palín-Escuintla.
4. Proponer una serie de ajustes a las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes, de la Dirección General de Caminos, de Guatemala, que incluya la estructura de una sección sobre la medición del IRI, en pavimentos flexibles, que puedan ser consideradas e incluidas en su próxima revisión.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

No existe un proceso metodológico debidamente regulado para la medición del IRI en Guatemala. Por lo cual, los resultados obtenidos, tienen diversas variables que no se estandarizan, sino, más bien, solo establecen los valores que reflejan la magnitud de las irregularidades.

La red vial del país, especialmente la pavimentada, se ha deteriorado de forma alarmante en los últimos años, derivado en parte, de la repetición de fenómenos hidrometeorológicos, políticas inadecuadas en el mantenimiento de las carreteras, incremento en las cargas del tráfico, incremento del parque vehicular y acciones antropogénicas.

En los pavimentos flexibles pueden presentarse daños en su rodadura, tales como ahuellamientos, fisuras o grietas, baches, entre otros. Adicionalmente también se presentan deficiencias en los aspectos constructivos como lo son las juntas de construcción y longitudinales asociadas a estructuras de drenajes y puentes.

Derivado de tales circunstancias, la ingeniería vial debe contar con una normativa específica que describa los procedimientos para determinar el estado de los pavimentos flexibles; la cual pueda regularse a través de la medición del (IRI), buscando a futuro que esta regulación, pueda proponerse para su incorporación en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos DGC. Por lo tanto, se plantean la siguiente interrogante principal:

¿Por qué las formas utilizadas actualmente para el cálculo del IRI requieren tener un parámetro regulado de medición e interpretación de valores que tenga un estándar aceptable en el país?

De lo anterior, se derivan las preguntas secundarias:

¿Cómo se compone la red vial pavimentada de Guatemala?

¿Qué procesos de campo se utilizan en el cálculo del IRI en pavimentos flexibles de la red vial?

¿Existe algún caso práctico que determine la rugosidad de la carpeta de rodadura del pavimento flexible de la red vial y esta pueda servir de parámetro para otras vías?

¿Cuál es el proceso metodológico propuesto para el cálculo del IRI que se ajuste a una eventual reglamentación de carácter nacional?

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El enfoque del trabajo es mixto, ya que representa un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implica la recolección y análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su discusión e integración conjunta; la cual se logra en la investigación planteada; enfocado en un diseño descriptivo.

En el análisis se determinaron las variables:

- Dependiente: es el IRI.
- Independiente: el pavimento flexible.

Este documento describe un análisis que proporciona parámetros con los cuales se basan las evaluaciones del cálculo de la rugosidad realizadas al pavimento flexible (uso del método de investigación cuantitativo), basado en normas establecidas por entidades internacionales que han definido los parámetros de medición a evaluarse para el cálculo del IRI; la cual debe de realizarse tanto en el proceso constructivo como en el operativo. Así mismo, describe las características del pavimento flexible: perfil tanto transversal como longitudinal, textura, rugosidad superficial resistencia al deslizamiento (uso del método de investigación cualitativo).

El propósito de fue describir la metodología para evaluar la superficie del pavimento a través del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), con base en este análisis se determinó el tipo de mantenimiento o rehabilitación a llevar a cabo. Con un ejemplo práctico, dar a conocer el uso de esta metodología para que el

profesional de la ingeniería vial pueda contar con una herramienta que sea de utilidad para el desarrollo de otros proyectos similares.

Además, se presentará una propuesta formal para que las especificaciones desarrolladas puedan ser evaluadas, analizadas y consideradas para su inclusión dentro de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos y de esta forma, normar el proceso de evaluación de la rugosidad de la carpeta asfáltica flexible.

Para la ingeniería vial contar con una herramienta técnica y eficaz que le permitan cumplir con los estándares de calidad requeridos, es algo que actualmente tiene un vacío en el medio nacional.

INTRODUCCIÓN

Se conoce como Infraestructura Vial a todo el conjunto de elementos que permiten el desplazamiento vehicular en forma confortable y seguro de un punto a otro. Dentro de estos elementos se ubican carreteras, puentes, túneles, pasarelas, muros de contención, entre otros, de los cuales las carreteras son elementos principales de la infraestructura vial, ya que estas permiten el desplazamiento.

Es importante mencionar, además, que la superficie de rodadura es la parte de la estructura del pavimento que mantiene una relación constante de confort y seguridad con el usuario.

Por lo anterior, la rugosidad e irregularidades en la carpeta asfáltica, no solo provocan efectos dinámicos nocivos en los vehículos, sino también en el pavimento, modificándose el estado de esfuerzos y deformaciones en su estructura, produciendo incrementos en las actividades de conservación o rehabilitación de las mismas, sin dejar de mencionar que los estándares de calidad originales, derivados del proceso constructivo se ven reducidos sustancialmente.

Así mismo, es de suma importancia conocer el estado superficial del pavimento a través del tiempo, desde el inicio de su operación y en cualquier momento que se haga necesario, para poder definir las acciones preventivas o correctivas, que mantengan este estándar de calidad original, situación que es responsabilidad del Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda (CIV) y sus dependencias vinculadas a las redes viales. Uno de los parámetros

utilizados para la evaluación de la rugosidad de los pavimentos, es el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), el cual refleja el nivel de comodidad y seguridad al circular por las carreteras.

Se propone la metodología para el cálculo del IRI y la aplicación en carreteras de pavimento flexible en nuestro país.

En el capítulo uno se describe la composición de la Red Vial de Guatemala, detallando la clasificación que ha venido manejando la Dirección General de Caminos, dividiendo las mismas en red primaria, secundaria y terciaria, esto para conocer el registro de las carreteras pavimentadas con que cuenta la red vial nacional, principalmente las de rodadura asfáltica.

El capítulo dos refiere a conceptos que describen el IRI, el cual es definido como una escala para la medición de la rugosidad basada en la respuesta que tiene un vehículo (cuarto de carro), a la rugosidad superficial de la carretera, así como algunas especificaciones internacionales que son la base para definir la metodología a utilizarse en Guatemala, la cual permita evaluar la condición superficial de los pavimentos flexibles que conforman la red vial guatemalteca.

El tercer capítulo muestra el proceso metodológico utilizado para la medición del IRI, realizada en la ruta CA-9 Sur, tramo autopista Palín-Escuintla, obteniendo el estado de la ruta y verificando si cumple con los estándares internacionales.

En el capítulo cuatro se presenta la propuesta de Especificaciones Técnicas para la medición y evaluación del IRI en pavimentos flexibles, que deben aplicarse tanto en la construcción, rehabilitación o mantenimiento de proyectos carreteros, mismas que pueden ser incorporadas en las Especificaciones

Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de la República de Guatemala, cuando se realice su próxima revisión y actualización.

1. CARACTERÍSTICAS DE LA RED VIAL

1.1. Estructura de pavimento

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, cuyos espesores se diseñan y se construyen técnicamente con materiales apropiados, los que son debidamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una carretera, obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmitirán durante el período para el cual sea diseñada esta estructura (Montejo Fonseca, 2010).

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial.
- Debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.

- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios, en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.

El objetivo fundamental de una infraestructura vial es prestar a los usuarios un servicio de calidad que contribuya a satisfacer (junto al servicio que puedan prestar otros modos de transporte) sus necesidades de movilidad, que sea un adecuado soporte de las actividades económicas y que contribuya a la integración territorial, es decir, que proporcione accesibilidad. Para ello, una vez puesta en servicio la infraestructura, hay que gestionarla, desarrollando una serie de actividades de explotación y de conservación.

Las inversiones en carreteras han aumentado considerablemente su valor patrimonial y, por tanto, las necesidades de conservación, cuyos gastos anuales el Banco Mundial estima que deberían ser de un 2 o 3 por ciento del valor de su inversión inicial.

Si los recursos financieros destinados a su conservación son inferiores, lo que desafortunadamente suele ser lo habitual, se producen sobrecostos en el transporte por carretera y aumentan considerablemente los gastos futuros requeridos para recuperar el déficit acumulado. Un estado defectuoso de las carreteras origina incrementos en los costos de operación de los vehículos, con aumento del tiempo de viaje y del costo de accidentes producidos (Merrit, Loftin, & Ricketts, 2005; Merrit, Loftin, & Ricketts, 2005).

Algunas actividades de conservación en los pavimentos flexibles deben ser ejecutadas al poco tiempo de la puesta en servicio de la carretera y, a partir de ese momento, con una cierta periodicidad. Sin embargo, existen otras

actividades, llevadas a cabo solo en determinados momentos de la vida útil de la carretera y, en general, no antes de que haya transcurrido un cierto número de años, que tienen una inversión comparable a la de construcción inicial, las cuales reciben el nombre de rehabilitaciones.

1.2. Pavimentos flexibles

Este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa, apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la sub base. No obstante, en casos especiales, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades o características particulares de cada obra (Montejo Fonseca, 2010).

Figura 1. Ejemplificación pavimento flexible



Fuente: elaboración propia.

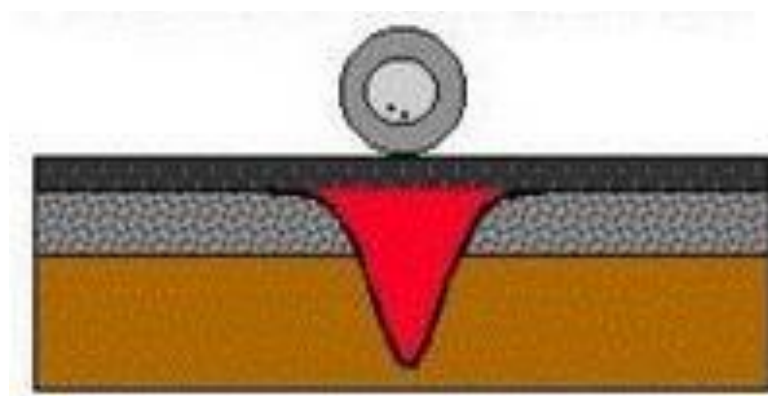
Dentro de la estructura del pavimento flexible, podemos mencionar los siguientes componentes:

1.2.1. Subbase granular

La función de esta capa es netamente financiera, en efecto, el espesor total que se requiere para que el nivel de esfuerzos en esta capa sea igual o menor que su propia resistencia. Puede ser construido con materiales de alta calidad; sin embargo, es preferible distribuir las capas más calificadas en la parte superior y colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad, la cual es frecuentemente más barata.

La capa de transición impide la penetración de los materiales que constituyen la base en la sub rasante. Por otra parte, actúa como filtro de la base impidiendo que los agregados finos la contaminen menoscabando su calidad. Visualmente, la resistencia que la subbase debe soportar, son los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores como se observa en la figura 2. (Meritt, Loftin, & Ricketts, 2005),

Figura 2. Características del pavimento flexible



Fuente: Arancibia, F. (2006). *Ingeniería y Construcción*.

1.2.2. Base granular

Su principal función consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.

1.2.3. Carpeta de rodadura

Esta capa debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito.

1.3. Pavimentos rígidos

Estos pavimentos están constituidos por una losa de concreto hidráulico como carpeta de rodadura, el mismo se apoya sobre una capa de material seleccionado la cual se define como base o en su caso directamente sobre la subrasante si esta cumple con las especificaciones requeridas. Los esfuerzos de deformación que se transmiten a la subrasante son de bajo valor, ya que, la carpeta de rodadura absorbe dichos esfuerzos.

Entre sus características destacan: el módulo de elasticidad, el cual produce presiones bajas hacia el material soportante, esfuerzos y deformaciones bajas.

Figura 3. Ejemplo pavimento rígido



Fuente: elaboración propia.

1.4. Técnicas para prolongar la vida útil de los pavimentos

Existe una serie de técnicas para extender la vida útil del pavimento. Estas se pueden clasificar en: conservación o mantenimiento y rehabilitación. La diferencia entre ambas radica en que el mantenimiento restaura la condición funcional y la rehabilitación restaura la condición estructural del pavimento. Para la conservación y mantenimiento vial, es aconsejable que se evalúen las carreteras de manera periódica, utilizando los sistemas de administración de pavimentos que les permitan monitorear la calidad de la superficie de rodadura de la red vial y tomar oportunamente las decisiones para el mantenimiento o rehabilitación de las mismas.

1.4.1. Mantenimiento o conservación

Las alternativas de conservación o mantenimiento del pavimento se refieren a las acciones llevadas a cabo para proteger el camino de la humedad, tratando de mantenerla alejada para evitar daños a su estructura. Los drenajes tanto

longitudinales como transversales deberán tener el mantenimiento preventivo necesario para evitar azolvamientos que las hagan colapsar.

Asimismo, deberán sellarse las fisuras que se presenten en la superficie para evitar filtraciones que afecten su resistencia a las cargas del tránsito y evacuar el agua fácilmente a través de las cunetas para evitar los estancamientos. También los efectos producidos por el envejecimiento u oxidación del asfalto pueden ser tratados efectivamente con la aplicación de un sello asfáltico. El deterioro del pavimento es un proceso lento. Los factores que causan este deterioro, son principalmente los del medio ambiente y las cargas del tránsito.

1.4.2. Rehabilitación

La rehabilitación se refiere a la ejecución de las actividades constructivas necesarias para restablecer las condiciones físicas de la carretera a su condición original. Es necesaria la rehabilitación de los pavimentos cuando estos ya han cumplido su vida útil. Muchas veces, cuando el mantenimiento periódico no se realiza y cuando este llega a realizarse, se evidencia que el deterioro es tal, que la rehabilitación total del camino es imperativa. Esto sucede como resultado a que no se cuenta con un sistema efectivo de administración de pavimentos en la red vial nacional.

La rehabilitación superficial se refiere a los trabajos cuando el deterioro del pavimento se presenta a una profundidad de 50 a 100 milímetros de la superficie del pavimento, el cual se asocia a envejecimiento y fisuramiento de la carpeta asfáltica.

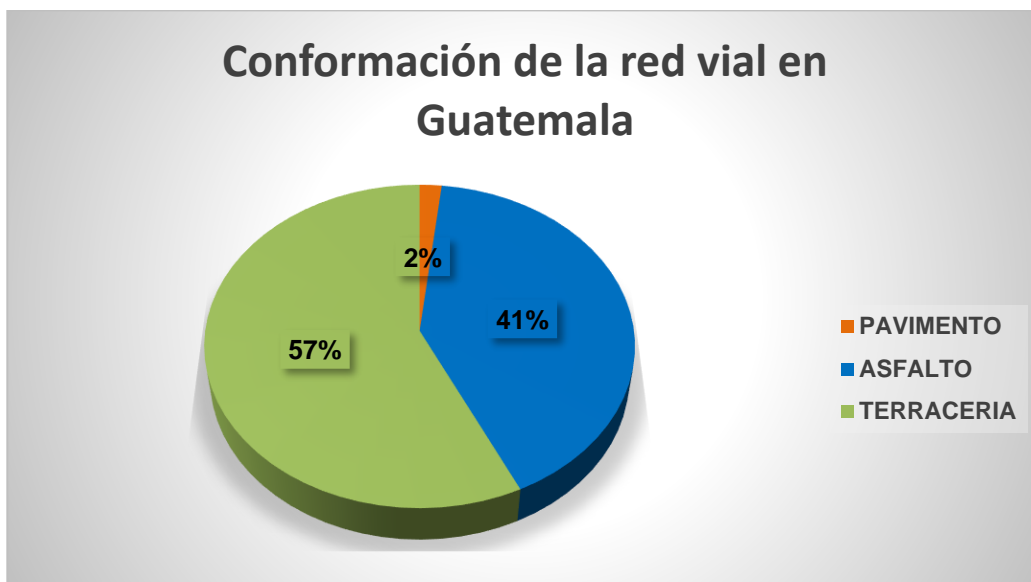
Dentro de los métodos utilizados en la rehabilitación se encuentran:

- Recapeo Asfáltico
- Fresado del pavimento
- Rehabilitación estructural del pavimento

1.5. La red vial en Guatemala

La red vial de Guatemala está conformada por 17,426.09 kilómetros de carreteras de los cuales 7,167.66 kilómetros cuentan con superficie de rodadura de asfalto, 314.84 kilómetros son de concreto hidráulico y 9,943.60 kilómetros son carreteras de terracería. Ver figura 4.

Figura 4. Porcentaje de la conformación de la red vial en Guatemala



Fuente: elaboración propia con base a datos de tabla I.

La Dirección General de Caminos (DGC), divide la red vial en rutas, siendo estas: Centroamericana, CA; Nacional, RN y Departamental; RD. Así mismo las divide en tres categorías: Primaria, Secundaria y Terciaria. Esta división está en función de los aspectos estratégicos de comunicación, estructuración y técnicos viales como: sección transversal, perfil y diseño.

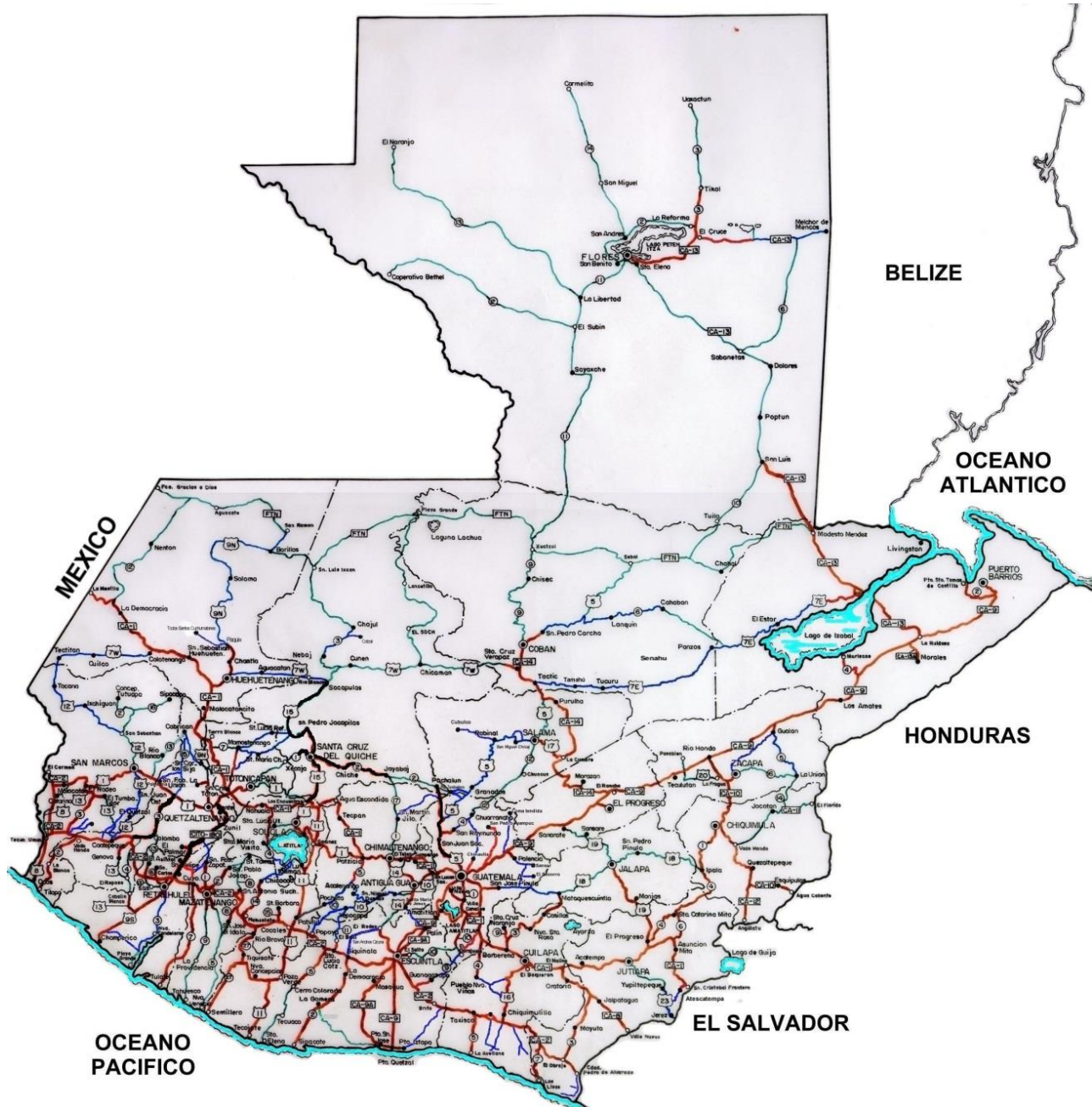
Tabla I. **Clasificación general de la República de Guatemala según el tipo de rodadura, año 2019**

| TOTAL DE LA RED VIAL NACIONAL (kilómetros) | | | | |
|---------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------|------------------|
| Clasificación | Tipo de Rodadura | | | Total |
| | Asfalto | Pavimento Hidráulico | Terracería | |
| Centroamericana | 1,964.18 | 214.00 | 160.00 | 2,338.18 |
| Nacional | 1,824.90 | 44.00 | 848.80 | 2,717.70 |
| Departamental | 3,360.23 | 50.95 | 4,431.32 | 7,842.50 |
| Caminos Rurales | 18.35 | 5.89 | 4,503.47 | 4,527.71 |
| TOTAL | 7,167.66 | 314.84 | 9,943.59 | 17,426.09 |

Fuente: elaboración propia.

Lo importante de esta información, es que Guatemala posee más del 40% de su red vial con rodadura asfáltica, que debe ser monitoreada para mejorar sus condiciones de transitabilidad y proponer acciones correctivas para alargar su vida útil. Es sobre esta red identificada, a la cual se le aplicaría la metodología para el cálculo del IRI.

Figura 5. Ubicación de la red de carreteras en Guatemala



Fuente: Dirección General de Caminos (2017).

1.5.1. Red primaria

El propósito es facilitar y fortalecer la comunicación directa vía terrestre a nivel regional e internacional. Para tener comunicación entre los principales puertos marítimos, puertos fronterizos con los centros poblacionales y de producción de Guatemala y los países vecinos, para propiciar el intercambio de bienes y servicios tanto local como internacional.

En la actualidad, la red primaria incluye casi todo el conjunto de carreteras centroamericanas (CA), algunas rutas nacionales (RN) y las rutas de nomenclatura especial, como lo es la Franja Transversal del Norte (FTN) y carretera Inter Troncal de Occidente 180 (CITO-180). (DGC & Dirección General de Caminos, 2017).

1.5.1.1. Características de las carreteras Centroamericanas (CA)

Las principales características de las carreteras centroamericanas se detallan a continuación:

- Unen la ciudad capital de Guatemala con las fronteras de los países vecinos.
- También conectan las rutas centroamericanas entre sí.
- Atraviesan longitudinal o transversalmente el país.
- Reúnen las mejores condiciones de diseño geométrico que la topografía les permite.
- Derecho de Vía: 25:00 m. (12.50 m. de cada lado desde la línea central).
- Área de reserva: 80.00 m. (40.00 m. a cada lado de la línea central).

1.5.2. Red secundaria

La red secundaria tiene como objetivo principal alimentar a la red Primaria, siendo complemento de dicha red. Contribuyendo a la comunicación directa entre las cabeceras departamentales y orientada a comunicar hacia y desde los mayores poblados y zonas productivas del país, para facilitar su conectividad. Está constituida en algunos tramos por rutas Centroamericanas; la mayoría de Rutas Nacionales (RN) y parte de las Rutas Departamentales (RD) (DGC & Dirección General de Caminos, 2017).

1.5.2.1. Características de las Rutas Nacionales (RN)

Dentro de las características de las Rutas Nacionales (RN) se describen las siguientes:

- Une cabeceras departamentales.
- Une rutas centroamericanas con cabeceras departamentales.
- Conecta rutas centroamericanas.
- Une Rutas centroamericanas con puertos marítimos de importancia comercial para el país.
- Red auxiliar de las rutas centroamericanas.
- Su derecho de vía es de 25.00 m (12.50 m de cada lado de la línea central);
- Su área de reserva es de 80.00 m (40.00 m de cada lado de la línea central).

1.5.3. Red terciaria

Esta red complementa la red primaria y secundaria, proporcionando comunicación entre las cabeceras departamentales y sus respectivos municipios y aldeas. Está orientada a permitir el ingreso de los insumos y servicios desde los centros de consumo y producción. Conformada en su mayoría por rutas departamentales (RD) con rodadura de terracería (balasto), así como por los caminos rurales (CR) (DGC & Dirección General de Caminos, 2017).

1.5.3.1. Características de Rutas Departamentales (RD)

Dentro de las características de las rutas departamentales (RD) se describen las siguientes:

- Interconecta cabeceras departamentales.
- Unen cabeceras departamentales entre sí.
- Une cabeceras municipales con cabeceras departamentales.
- Une cabeceras municipales con rutas centroamericanas o rutas nacionales con otras rutas departamentales.
- Su derecho de vía es de: 20.00 m. (10.00 m. de cada lado de la línea central).
- Une rutas nacionales (RN).
- Une rutas centroamericanas o nacionales con litorales.
- Tienen una longitud mayor de 20 km.
- Su tránsito diario es mayor a 200 vehículos por día.
- Tiene importancia turística.

2. ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI), fue desarrollado por el Banco Mundial en los años ochenta y está basado en la simulación de la respuesta de un vehículo viajando a 80 km/h, que es la referencia rectificada de pendiente promedio que expresa la proporción del movimiento de la suspensión acumulada del vehículo, dividido por la distancia viajada durante la prueba (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

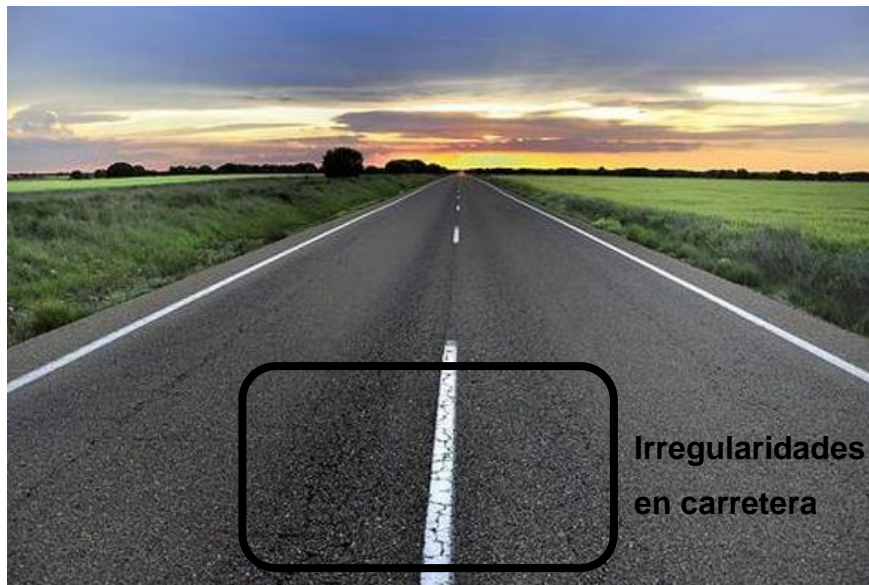
El IRI es una medida de la aspereza que presenta la superficie de una carretera a lo largo de su perfil longitudinal. En lo que respecta al servicio que presta la infraestructura vial al usuario, lo que se persigue es representar la calidad de viaje de un vehículo al transitar por carreteras.

El IRI es considerado como una característica importante de los pavimentos, ya que se le puede relacionar con diversos factores como lo son: desempeño del pavimento a lo largo de su vida útil, confort del usuario al circular por carreteras, seguridad al manejar. Además se puede considerar el costo de operación de los vehículos (Cardona Villa, 2007).

Es importante mencionar que las irregularidades en las carreteras, figura 6, no solo provocan efectos dinámicos en los vehículos, sino también en el pavimento, lo cual produce incrementos en las tareas de funcionamiento de la carretera. Razón por la cual, se hace necesario conocer el estado de estas irregularidades superficiales a través del tiempo, desde el momento que inician las operaciones, como en cualquier momento de la vida funcional de las

carreteras, con lo cual se definen las acciones tanto preventivas como correctivas para mantenerlas en buen estado.

Figura 6. Irregularidades en la carpeta asfáltica



Fuente: El Economista, (2016). Recuperado de:
<https://www.eleconomista.net/actualidad/Guatemala-irregularidades-de-Odebrecht-paralizan-ampliacion-de-carretera-con-Mexico-2016129-0043html>

En la medición del IRI existen diferentes clases y tipos de equipos, los cuales han ido evolucionando con el tiempo, variando unos de otros tanto en lo que respecta a la precisión y rapidez para la obtención de los resultados.

La carpeta asfáltica con rugosidad perfecta tendría un valor del IRI igual a cero las carreteras con rugosidad moderada presentan valores alrededor de 2.5 y 4 m/km (carpeta asfáltica con daños en su estructura) y para las carreteras no pavimentadas el valor estaría por arriba los 20 m/km (Cardona Villa, 2007).

Intervenir las carreteras con trabajos de mantenimiento periódico o rutinario, de acuerdo a las evaluaciones del IRI variará dependiendo el tipo de carretera,

por ejemplo, los valores límites del IRI que utilizan algunos países del continente para evaluar sus intervenciones en mantenimiento se muestran en la siguiente tabla II.

Tabla II. **Valores de IRI utilizados en mantenimiento de carreteras por país**

| VALOR IRI | PAÍS |
|-----------|----------------|
| 2.7 m/km | Estados Unidos |
| 3.5 m/km | Brasil |
| 4.0 m/km | Chile |
| 6.0 m/km | Uruguay |
| 6.0 m/km | España |

Fuente: Sayers, M., Gillespie, T., & Paterson, W. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*.

Debido a diversos factores, la rugosidad en la carpeta asfáltica de los pavimentos puede variar en su medición del valor final. La construcción de carreteras con irregularidades, cargas de tráfico, condiciones ambientales y los materiales utilizados, son algunos de los aspectos que generen irregularidades o variaciones en su perfil. Las cargas de tráfico incrementan la rugosidad debido a que el peso vehicular puede causar fallas en la carpeta asfáltica, los efectos ambientales afectan el cambio de volumen de la subrasante debido al aumento y disminución de la humedad del suelo, pudiendo causar rugosidad en el transcurrir del tiempo, los materiales y procesos de compactación no uniformes en la estructura del pavimento, pueden contribuir con daños en la estructura del pavimento y en específico en la carpeta de rodadura.

2.1. Visión general de la escala de rugosidad IRI

Con el fin de abordar los detalles específicos de las medidas de rugosidad o cuestiones de exactitud, es necesario definir primero su escala. El IRI se ha

nombrado así, ya que fue un producto del “Experimento Internacional sobre Rugosidad de Carretera”, realizado por equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, los Estados Unidos y Bélgica, con el propósito de identificar dicho índice. El experimento fue realizado en Brasilia, Brasil en el año 1982 e implicó la medida controlada de rugosidad de carreteras para un determinado número de vías bajo una serie de condiciones y una variedad de instrumentos y métodos. La escala de rugosidad seleccionada para el IRI fue la que cumplió con los criterios de ser estable en el tiempo, transportable y relevante, mientras que era fácilmente medible por todos los participantes. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

El IRI es una medida estandarizada de rugosidad relacionada a aquellas medidas obtenidas por sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta con diversas medidas recomendadas:

- Metros por kilómetros (m/km),
- Milímetros por metro (mm/m), y
- Pendiente x 1000.

(Cardona Villa, 2007) describe que la medida obtenida de los sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta con medidas recomendadas es llamada por su nombre técnico de la referencia rectificadora de pendiente promedio, o comúnmente, por las unidades usadas: metros por kilómetro (m/km), milímetros por metro (mm/m), entre otros. La referencia en los sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta con medidas recomendadas usados para IRI es un modelo matemático, en lugar de un sistema mecánico, que existe como un procedimiento computacional aplicado al perfil medido. El proceso en el mundo informático o computacional es llamado simulación de cuartos de vehículo, debido a que el modelo matemático representa a los sistemas de medición de

rugosidad de tipo respuesta con medidas recomendadas teniendo una sola llanta. Este tipo de medida varía con la velocidad del vehículo, por lo tanto, la velocidad estándar de 80 km/h es específica a la definición del IRI.

La característica particular del perfil que define el IRI fue demostrada para ser medida directamente por la mayoría de métodos perfilométricos, más que cualquiera de los otros sistemas basados en perfiles que fueron considerados en el Experimento Internacional sobre Rugosidad de Carreteras. Al mismo tiempo, el perfil de características del IRI es compatible con las medidas obtenidas por los sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta que estos instrumentos pueden ser calibrados a la escala IRI para alcanzar la mejor o lo más cercano a la precisión que sea posible con este tipo de instrumento. El IRI está fuertemente relacionado a las opiniones subjetivas acerca de la rugosidad que presenta la carpeta asfáltica en carreteras que puede ser obtenida del público en general. Ya que el IRI es medido por varios métodos perfilométricos (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

2.2. Definición del IRI

(Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986) definieron que “El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie de la carretera en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad de la carretera en un auto de pasajeros típico, está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas, que es la razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida, producto de la simulación del modelo cuarto de carro, a una velocidad de 80 km/h”.

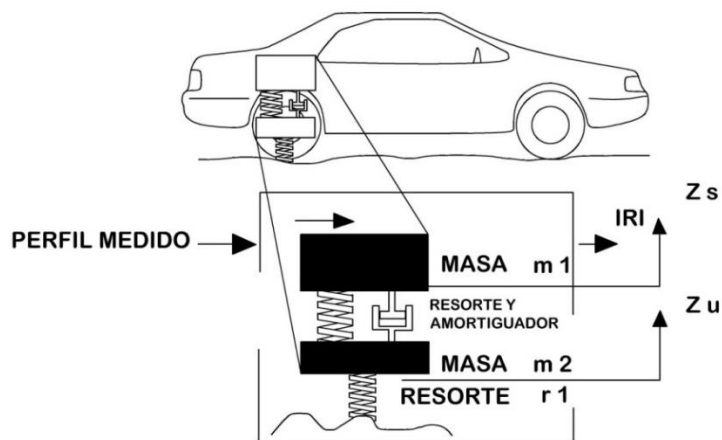
La descripción de la norma ASTM E 867-06 *Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems* (Terminología Estándar Relativa a Sistemas Vehículo-Pavimentación), define el concepto de Roughness (rugosidad) como:

desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de manejo, cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, el perfil longitudinal y el perfil transversal. Por esta definición, algunos autores han utilizado el término “regularidad”, puesto que este concepto se asocia más fácilmente a la definición de roughness (rugosidad), que el término rugosidad. Motivo por el cual se utilizará el término de regularidad para referirse a las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan adversamente a la calidad de rodado, seguridad y costos de operación de los vehículos.

El IRI es una escala de la regularidad superficial de una carretera, propuesta por el Banco Mundial como estadística estándar de la rugosidad que determina la influencia del perfil longitudinal de la carretera en la calidad de la rodadura.

Está basado en un modelo matemático llamado “Cuarto de Carro” mostrado en la figura 7, el cual simula la suspensión y las masas de la cuarta parte de un carro que va a una velocidad promedio de 80 km/h. El desplazamiento simulado acumulado y dividido por la distancia recorrida, daría el Índice con unidades de pendiente (m/km, mm/m, etcétera) (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

Figura 7. Modelo cuarto de carro



Fuente: Cardona Villa, (2007). *Tesis Predicción del IRI, Universidad Nacional de Colombia.*

Este modelo se desarrolló a través de un conjunto de masas ligadas entre sí, las cuales generan un movimiento vertical al ser desplazadas por una carretera. De esta forma se permite reducir el análisis de una superficie al análisis de una línea que representa el perfil longitudinal, es decir, desde un análisis bidimensional a un análisis unidimensional.

2.3. Determinación del modelo matemático en el cálculo del IRI

La mayoría de equipos utilizados para el levantamiento del perfil de las carreteras incluyen el Software para el cálculo del IRI.

En la década de los años setenta, el Banco Mundial financió diferentes programas de investigación a gran escala, entre los cuales se encontraba un proyecto relacionado con la calidad de las carreteras y los costos del uso de las mismas a los usuarios, a través del cual se detectó que los datos de regularidad superficial de diferentes partes del mundo no podían ser comparados.

La modelación matemática representa la esquina de un vehículo tradicional, la cuarta parte de un vehículo, como se mostró en la figura 7. Dicho modelo incluye una llanta representada con un resorte vertical (r_1), la masa del eje apoyado por el neumático (m_1), la suspensión del vehículo representada por un resorte (r_2), un amortiguador y la masa del carro apoyado en la suspensión (m_2). (Cardona Villa, 2007).

El IRI es un índice calculado a partir de perfiles generados matemáticamente por el sistema descrito anteriormente como "Cuarto de Carro".

La rugosidad del perfil actual de una carretera induce a movimientos dinámicos al modelo generando diversas velocidades y aceleraciones verticales,

por lo que el valor del IRI sobre una longitud dada está definido por la siguiente ecuación (Cardona Villa, 2007).

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^X \frac{|z_s - z_u|}{V} dt \quad \text{Ecuación 1 (Cardona Villa, 2007)}$$

Donde:

- IRI Índice de Rugosidad Internacional en mm/m o en m/km
- L Longitud del tramo en metros.
- X Distancia longitudinal en metros.
- V Velocidad del carro modelo en m/s.
- X/V Tiempo que el modelo toma en recorrer cierta distancia x.
- dt Incremento del tiempo.
- z_s Velocidad vertical de la masa del vehículo.
- z_u Velocidad vertical de la masa del eje.

Manera por la cual el IRI representa la suma de los desplazamientos verticales experimentados por un usuario que conduce un carro modelo ficticio sobre una carretera a una velocidad de 80 km/h.

La determinación del IRI de acuerdo a la Ecuación número uno (1) se hace necesario para calcular las velocidades verticales de las masas durante la simulación del modelo. Para este propósito se debe calcular el equilibrio de cada masa por separado, el cual da el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales

$$\dot{z}_u = -\frac{k_s}{m_u}(z_u - z_s) - \frac{c_s}{m_u}(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + \frac{k_u}{m_u}(h_{ps} - z_u)$$

Ecuación 2

$$\ddot{z}_u = -k_2 z_s - C \dot{z}_s + k_2 z_u + C \dot{z}_u$$

Donde h_{ps} es la elevación del perfil real y constituye la principal variable de entrada. Las variables desconocidas son las velocidades y las aceleraciones verticales de las masas. Otros parámetros constantes que se refieren al modelo son m_s y m_u . Estas son las masas del vehículo y eje respectivamente, k_s y k_u son las constantes elásticas de los resortes y C_s es el coeficiente de viscosidad del amortiguador (Cardona Villa, 2007). Los valores del modelo se presentan en la siguiente tabla.

Tabla III. **Cuantificaciones del modelo Cuarto de Carro**

| Parámetro | m_u(kg) | K_u (N/m) | m_s (kg) | K_s (N/m) | C_s(N.s/m) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Valor | 37,5 | 163,250 | 250 | 15,825 | 1,500 |

Fuente: Cardona Villa, (2007). *Tesis Predicción del IRI, Universidad Nacional de Colombia.*

El sistema de ecuaciones diferenciales presentados en la Ecuación número dos (2), debe ser resuelto numéricamente e integrado antes de calcular el IRI de la ecuación número uno (1), con ayuda de un programa o software adecuado. La norma ASTM E 1926-98 “*Standard practice for computing international roughness index of road from longitudinal profile measurements*” (práctica estándar para el cálculo del Índice Internacional de Rugosidad en carreteras a partir de mediciones del perfil longitudinal), presenta el programa que debe ser usado para el cálculo del IRI.

2.4. Diferenciación del IRI según la longitud de apreciación

El IRI puede ser calculado sobre cualquier longitud de la carretera a ser evaluada. Es de suma importancia comprender la relación que existe entre la variación de regularidad o rugosidad a lo largo de la carretera y el tramo de evaluación de la misma, del cual la regularidad o rugosidad es promediada. De esta forma, aunque la bibliografía casi siempre detalla solamente del valor del IRI

de una carretera, es importante que, para ser precisos, se debe añadir la longitud a la cual se determina dicho valor, ya que el IRI es el valor medio de los IRI unitarios o puntuales que se obtienen. Normalmente el valor unitario más utilizado es a cada 0.25 metros y el valor global de referencia puede variar según el criterio de evaluación (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)

De los elementos de una carretera, la longitud es un tema clave para la determinación del IRI. Se hace necesario establecer un intervalo de longitud, ya que intervalos mayores de longitud ocultan niveles altos de regularidad superficial en los pavimentos, obteniendo de una manera inadecuada los valores de IRI satisfactorios. Por otra parte, la utilización de intervalos de longitud menores para la determinación de IRI, puede detectar niveles altos de irregularidad, contribuyendo a obtener carreteras con mejores niveles de seguridad y confort brindado a los usuarios.

2.5. Particularidades en la medición y cálculo del IRI

El acabado final en la superficie de rodadura de una carretera es de mucha importancia para la comodidad, seguridad y costos de operación de los usuarios en las carreteras, factor que, además de tener una gran influencia en la duración de los mismos, repercute en gran parte en el costo de los trabajos a realizar para ampliar la vida útil y/o garantizar el periodo de diseño de carreteras

(Cardona Villa, 2007) Describe el Índice de Rugosidad Internacional IRI involucra la diferencia entre el perfil longitudinal teórico y el perfil longitudinal existente. En la medición se pueden presentar aspectos físicos que afecten su medición. Dentro de la medición se le conocen como irregularidades o singularidades, que en sí es la rugosidad de la carpeta asfáltica. Puede definirse la singularidad. “cualquier alteración del perfil longitudinal de la carretera que no

provenza de fallas constructivas y que incremente el valor del IRI en el tramo en que se encuentra”. Entre ellas se describen puentes, vibradores, reductores de velocidad, tapaderas de pozos de alcantarillas, cruces de calles y otras, que por el diseño geométrico alteren el perfil de la carretera.

Figura 8. Ejemplo: vialetas, boyas y reductores de velocidad



Fuente: elaboración propia.

2.6. Elementos que afectan la rugosidad en pavimentos flexibles

Existen varios elementos o factores que afectan la rugosidad en los pavimentos, con el fin de poder desarrollar modelos que permitan determinar la medición del Índice de Rugosidad Internacional IRI al evaluar la superficie de rodadura. Dentro de los factores se describen los siguientes:

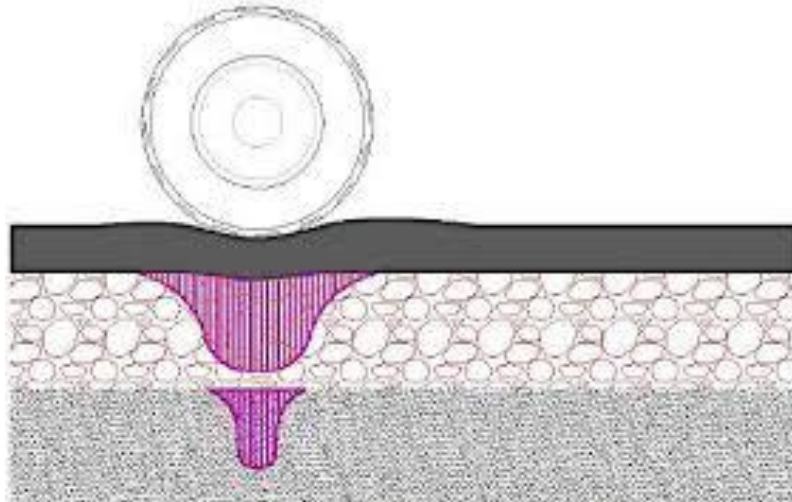
- Tiempo de vida del pavimento.
- Niveles de tráfico.
- Espesores del pavimento.
- El numero estructural.
- Características y propiedades físicas del asfalto como: vacíos de aire, gravedad específica, y contenido de asfalto.

- Parámetros ambientales como: días de lluvia y temperaturas altas.
- Propiedades de la base granular como el contenido de humedad y el contenido de finos.
- Aspectos y propiedades de resistencia de los elementos de la carretera, como lo es el índice de plasticidad de la subrasante, contenido de humedad, contenido de limos y arcillas, y contenido de finos.
- Fallas internas en los elementos de la estructura del pavimento.
- Mal uso de equipos y maquinaria defectuosos en el proceso constructivo
- No cumplir con las especificaciones constructivas de carreteras.

2.6.1. Efectos de cargas dinámicas en los pavimentos

Las cargas dinámicas que los vehículos transmiten a la estructura del pavimento en específico a la carpeta de rodadura causan ondulaciones indeseables, por lo cual se deduce que el fenómeno real es una fluctuación entre cargas estáticas y cargas dinámicas. La dimensión de las cargas dinámicas inducidas a los pavimentos sin irregularidades, es menor que las inducidas a pavimentos que presenten rugosidad. El incremento de las cargas dinámicas puede resultar en el deterioro de los pavimentos y el desarrollo de irregularidades superficiales.

Figura 9. Efecto de carga dinámica en el pavimento



Fuente: Nieto Mora, J & Velásquez, O. (2013). *Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C. Bogotá, Colombia.*

2.7. Características de la rugosidad en los pavimentos

La rugosidad o aspereza de la carpeta asfáltica tomada en cuenta al inicio de la vida útil de los pavimentos, es un indicador valioso de la calidad de construcción de las carreteras. Si los pavimentos son construidos sin irregularidades superficiales o baja rugosidad, se espera que la vida útil de los mismos sea mayor o la que ha sido considerada en el diseño.

Se ha demostrado que la rugosidad inicial incide en las irregularidades futuras de los pavimentos. Existen factores a tomarse en cuenta que son de suma importancia en el rendimiento de los mismos, desde su construcción como lo son: variación de los materiales de construcción, asentamientos los elementos estructurales de la carretera como en la subrasante, el tipo de topografía donde se desarrollen los proyectos, elementos estructurales de puentes, elementos de alcantarillado y otras estructuras presentes en las carreteras.

2.8. Descripción de los equipos y maquinaria en la medición del IRI

La maquinaria y equipo utilizados para la medición del Índice de Rugosidad Internacional se ha desarrollado con el paso del tiempo, esto con el avance de la tecnología, con el transcurrir del tiempo. En la obtención de datos que garanticen la calidad en la construcción de carreteras (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)

A la fecha existe diversidad de equipos con los cuales se determina la rugosidad superficial de los pavimentos, los cuales han venido evolucionando en el tiempo, evolucionando unos de otros en la precisión y obtención de resultados, algunos de los cuales se muestran en la Tabla III.

2.8.1. Equipo denominado perfilógrafos (*profilographs*)

Este tipo de equipo se ha venido utilizando desde los años 1900 y han existido en diversidad de formas, configuraciones y marcas. Este equipo se utiliza para obtener un perfilograma de la superficie de rodadura y determinar a partir de él, el índice del perfil del pavimento existente. Este equipo consiste en una viga o cercha (marco) con un sistema de soporte de ruedas al principio y al final, y una rueda al centro que sirve para obtener las desviaciones en el perfil (Cardona Villa, 2007).

El Perfilógrafo California, usado comúnmente para inspeccionar la construcción de pavimentos rígidos, control de calidad, aceptación de proyectos cumpliendo con la normativa de diseño. Entre los equipos existentes, hay diferencias técnicas las cuales están relacionadas con la configuración de las ruedas, el funcionamiento y procedimiento de medición de estos equipos.

Estos equipos tienen una rueda sensible, la cual está montada al centro del marco para mantener el movimiento vertical libre como se muestra en la figura 10. Estos equipos pueden calcular desviaciones muy ligeras de la superficie y ondulaciones en aproximadamente 6 metros en longitud.

Figura 10. Perfilógrafo California



Fuente: Mencia, F. (2019). Recuperado de <http://cien.mex.tl/>

2.8.2. Equipos denominados tipo respuesta (RTRRM)

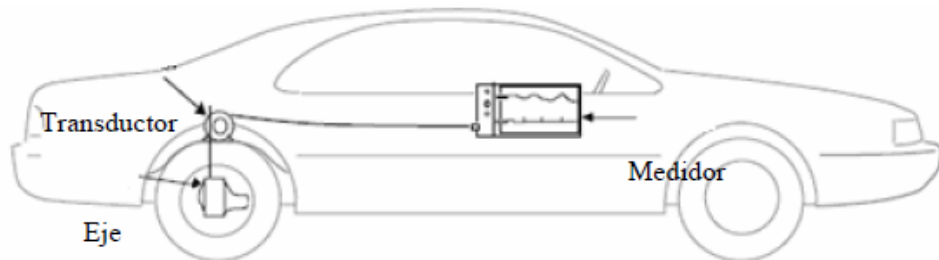
La obtención de datos de regularidad, se realiza a través de equipos Tipo Respuesta, RTRRM (Response Type Road Roughness Measuring Systems), comúnmente llamados medidores de camino. Estos sistemas son adecuados para el monitoreo rutinario de la red pavimentada y para proporcionar una visión global de la condición, así como para el mantenimiento que se necesite en las carreteras evaluadas.

Estos equipos miden movimientos verticales del eje trasero de un automóvil o el eje de un remolque relativo al marco de un vehículo. Este tipo de equipo se instala en los vehículos con un transductor de desplazamiento localizado entre la mitad del eje y el cuerpo del automóvil o remolque como se muestra en la figura 11. El transductor detecta pequeños incrementos del movimiento relativos entre el eje y el cuerpo del vehículo. La norma ASTM E 1082 “*Test Method for Measurement of Vehicular Response to Traveled Surface Roughness*” (*Método estándar de prueba para medir la reacción vehicular a la rugosidad de la superficie de tránsito*); especifica los procedimientos para la medición de la rugosidad con equipo tipo respuesta (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

El movimiento del eje del vehículo versus el tiempo depende de la dinámica de un vehículo particular, lo cual es una desventaja del equipo RTRRM lo que produce efectos no deseados como:

- Las medidas de rugosidad respecto al tiempo no son estables. Medidas realizadas recientemente con el RTRRM, no pueden ser comparadas con mediciones realizadas en años anteriores.
- Las mediciones de regularidad no son transportables, es decir las mediciones realizadas por un RTRRM que utiliza un sistema determinado son raramente reproducibles por otro aún si el vehículo es estandarizado.
- La velocidad del vehículo afecta las mediciones. La velocidad de viaje del vehículo afecta la respuesta del sistema. Como ejemplo de lo descrito, si en la misma sección se toman medidas de rugosidad con el mismo equipo y diferentes velocidades, los resultados serán diferentes.

Figura 11. Modelo equipo tipo respuesta



Fuente: Cardona Villa, (2007). *Tesis Predicción del IRI, Universidad Nacional de Colombia.*

2.8.3. Equipo nivel y estadía

Este equipo se conoce como perfilómetro manual y es quizás el método más preciso para obtener las elevaciones reales de la superficie del pavimento. Se considera de bajo rendimiento debido al proceso de recolección de datos es relativamente lento en comparación con otros equipos. (Badilla Vargas, Gustavo, Elizondo Arrieta, Fabián, Barrantes Jiménez, Roy). Para evaluar la regularidad de la superficie de rodadura de proyectos de gran magnitud es impráctico y de alto costo. Sin embargo, este tipo de equipo tiene gran precisión y con él se puede obtener una medida exacta del perfil del pavimento.

La norma ASTM E 1364, *Método estándar de prueba para medir la rugosidad de carreteras por método estático de nivel*; presenta una guía para la medición del perfil de las carreteras con este equipo.

Figura 12. Equipo nivel y estadía



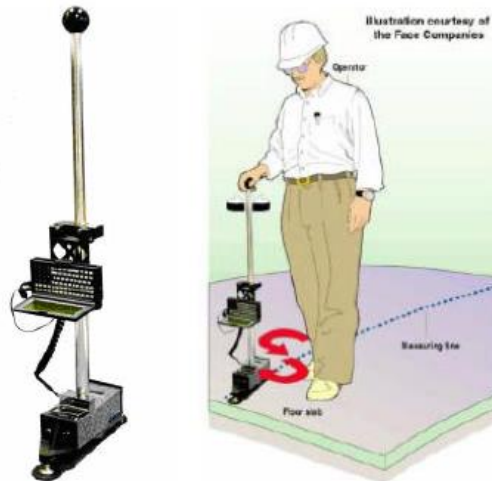
Fuente: Badilla Vargas, G., Elizondo Arrieta, F. (2008). *Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI.*

2.8.4. Equipo Dipstick

Estos equipos pueden utilizarse para obtener una cantidad relativamente pequeña de medidas del perfil del pavimento. El equipo Dipstick presentado en la figura 13 consiste en un inclinómetro soportado en dos apoyos por 305 mm, los cuales registran la elevación de un apoyo relativo a la elevación del otro. Para este equipo el operador conduce el Dipstick sobre una sección del pavimento pre-marcado, rotando el instrumento alternadamente sobre cada apoyo. Para este caso se registran lecturas secuencialmente mientras el operador recorre la sección. Este dispositivo registra de 10 a 15 lecturas por minuto. El software de análisis es capaz de proporcionar un perfil exacto a ± 0.127 milímetros. Este equipo es utilizado comúnmente para medir un perfil para la calibración de

instrumentos más complejos, como el RTRRS, así mismo para verificación de resultados obtenidos con los Perfilómetros Inerciales (Cardona Villa, 2007)

Figura 13. Equipo Dipstick



Fuente: Cardona Villa, (2007). *Tesis Predicción del IRI, Universidad Nacional de Colombia.*

2.8.5. Equipo Perfilómetro Inercial (Inertial Profilometer)

Son equipos de referencia inercial que producen medidas automáticas y de alta calidad del perfil de la carretera. Los Perfilómetros producen medidas continuas del perfil longitudinal a altas velocidades, a través de la creación de una referencia inercial integrada por acelerómetros colocados en un vehículo, para obtener el movimiento vertical del mismo conocida como aceleración vertical y sensores que no son de contacto, tipo laser, que miden el desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento lo cual se muestra en las figuras 14 y 15.

Estos equipos son llamados perfilómetros de alto rendimiento, debido a que son muy precisos y generan el perfil longitudinal de la carretera en tiempo real.

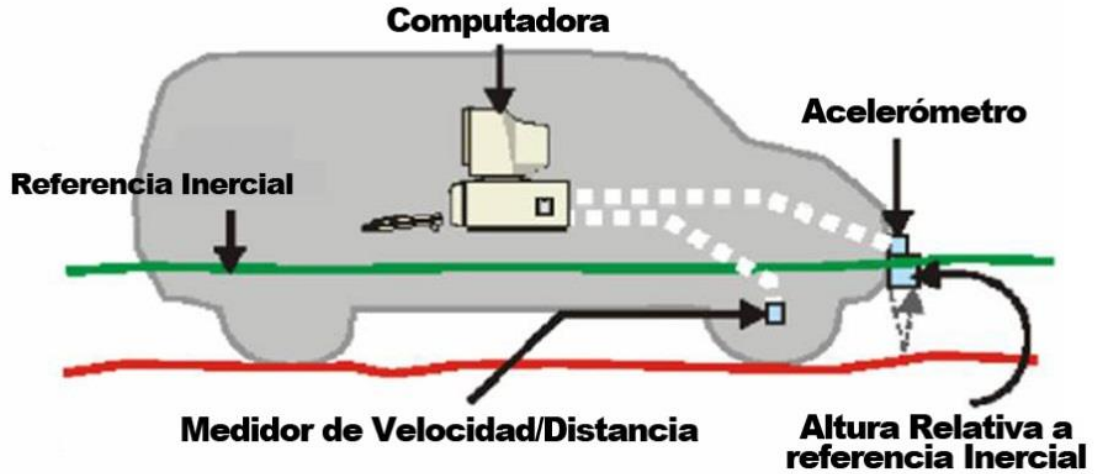
Teniendo como componentes: sensores de altura, acelerómetros, sistema medidor de distancia y un computador con su respectivo software, usado para el cómputo del perfil de la carretera en evaluación. Algunos de estos equipos están equipados con cámaras de videos que pueden grabar diferentes perspectivas de la carretera y pueden ser usados para determinar otras condiciones de la carretera, como los niveles de daño que presente la carretera en evaluación, señales y otros elementos que componen la infraestructura de la carretera (Cardona Villa, 2007).

Según las características de este equipo, del almacenamiento de datos se puede obtener: datos de IRI cada 5 metros y datos del perfil longitudinal cada 25mm (la resolución mínima del equipo), basados en la norma ASTM E 950 la cual clasifica al equipo como clase I; descripción realizada posteriormente. Los resultados son almacenados en formato de archivo ERD, debido a que formato almacena directamente los datos de las elevaciones del perfil longitudinal al intervalo solicitado, lo cual permite analizar posteriores del perfil a diferentes intervalos de longitud del cálculo del (IRI). El formato ERD fue desarrollado por la División de Investigación en Ingeniería del Instituto de Investigaciones de Transportes de la Universidad de Michigan (UMTRI) con lo cual se facilitarían los análisis automáticos de simulación, medición experimental, entre otros.

Los archivos ERD obtenidos fueron procesados posteriormente con el software:

- RoadRuf: software que contiene un conjunto integrado de herramientas para la interpretación de regularidad de datos del perfil longitudinal.
- PRVAL: software que permite al usuario observar y analizar perfiles de pavimentos de diferentes maneras.

Figura 14. Equipo de Perfilómetro Inercial



Fuente: Cardona Villa, (2007). *Tesis Predicción del IRI, Universidad Nacional de Colombia.*

Figura 15. Equipo Perfilómetro Inercial



Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla. Guatemala.*

2.9. Categorización de los equipos para la medición de la rugosidad superficial de los pavimentos

Los equipos utilizados para la medición de la rugosidad de la superficie de las carreteras, son clasificados de acuerdo con el intervalo de almacenamiento de datos y la resolución de la medida. Esta clasificación fue presentada por el Banco Mundial en el documento técnico número 46 “*Guidelings for conducting and calibrating road roughness measuremets*” y la norma ASTM E 958 98. A continuación se hace una descripción por clase de equipo.

2.9.1. Clase I: perfiles de precisión

Esta clase representa los estándares más altos de precisión para medidas del IRI. Un método de la clase I requiere que el perfil longitudinal del ancho de carretera a medir, como bases para calcular el valor del IRI. Para los métodos estadísticos perfilométricos, la distancia entre muestras no deberá ser mayor a 250 mm (4 medidas/ metro) y la precisión en la elevación de medidas deberá ser de 0.5 mm para pavimentos de superficie extremadamente lisas (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

Los métodos de medición en esta clase son aquellos que producen medidas con alta calidad que la reproducibilidad del IRI. La definición puede al principio implicar un ideal inalcanzable, por lo general hay un límite práctico a la repetitividad que se puede obtener en medir la rugosidad de carreteras, inclusive con un método perfecto o un instrumento.

Los métodos del Experimento Internacional sobre Rugosidad de Carretera aclaran que la Clase I ha tenido error de medición insignificante para longitudes de hasta trescientos veinte metros de (320) de longitud, cuando la longitud era

señalada con una marca de pintura espaciada a intervalos de veinte metros (20) o sea en estaciones marcadas cada veinte metros (0+20).

En muchos casos, un método que rinde este nivel de precisión tendrá la desventaja de requerir un gran esfuerzo para lograr la medición de rugosidad (por ejemplo, a través del método de varilla o nivel). La precisión obtenida utilizando un método de Clase I, por definición es igual o supera los requerimientos de una aplicación dada, es por esta razón que el método de Clase I es visto como el que tiene mayor utilidad para validar otros métodos, o cuando se necesite información de alta calidad y precisión.

2.9.2. Clase II: otros métodos perfilométricos

Esta clase incluye todos los métodos en los cuales el perfil es medido como la base directa para una computación en la medición del IRI, pero que no son capaces de proporcionar la precisión requerida por la medición de la Clase I. A pesar que el equipo y los métodos utilizados para la medición del perfil son verificados por un proceso de calibración independiente, están limitados a la precisión o el ancho de banda menor al necesitado para calificar como un método Clase I. Consecuentemente, el valor IRI computado de un perfil de medición de Clase II no será exacto al límite debido a errores aleatorios sobre una serie de condiciones. Esta clase incluye valores IRI computados de perfiles medidos con perfilómetros de alta velocidad con método estáticos que no satisfacen la precisión o requerimientos (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

En esta clase se requiere una frecuencia de puntos del perfil no superior a cero punto cinco (0.5) metros y una precisión en la medida de elevación de un (1) mm para IRI entre uno (1), tres (3) m/km y seis (6) mm para valores de IRI entre diez (10) y veinte (20) m/km.

Los perfilómetros de alta velocidad tienen la desventaja de ser los sistemas más complejos y caros para medir la rugosidad de carreteras, y, generalmente, requieren operadores con entrenamiento. Ofrecen una gran ventaja al ser capaces de obtener mediciones de alta calidad rápidamente, sin requerir un gran esfuerzo para mantener la calibración.

2.10. Estimaciones IRI por medio de ecuaciones de correlación

La mayoría de información de rugosidad en carretera es recolectada por los sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta. Las mediciones de estos sistemas dependen sobre la dinámica de un vehículo para escalar las mediciones para producir propiedades de rugosidad comparadas con el IRI.

Las propiedades dinámicas son únicas para cada vehículo a utilizarse en la medición, sin embargo, cambian con el tiempo, así las medidas de referencia obtenidas de los sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta deben ser corregidas a la escala del Índice de Rugosidad Internacional IRI utilizando una ecuación de correlación que se ha obtenido experimentalmente para ese sistema de medición de rugosidad de tipo respuesta específico. Ya que las dinámicas de un vehículo cambian fácilmente, mantenimientos y procedimientos de operación rigurosos deben ser empleados para los vehículos utilizados, pruebas de control deberán formar parte de las operaciones normales (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

El IRI estimado mediante ecuaciones de correlación. La obtención del perfil longitudinal se hace mediante equipo tipo respuesta (RTRRM), los cuales han sido previamente calibrados con perfilómetros de precisión mediante ecuaciones de correlación.

2.10.1. Valores subjetivos y medidas sin calibrar

Existen situaciones en las cuales una base de datos acerca de rugosidad es necesaria, pero la alta precisión no es esencial. Aun así, es deseable relacionar las medidas a las de la escala Índice de Rugosidad Internacional IRI. En esos casos, una evaluación subjetiva que involucre ya sea una experiencia de manejo en carretera o una inspección visual. Otra posibilidad es usar las medidas de un instrumento sin calibrar. La conversión de estas observaciones a la escala IRI es limitada a una equivalencia aproximada que puede ser establecida por medio de una comparación a una descripción verbal o pictórica de las carreteras identificadas con sus valores (IRI) asociados (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

2.11. Elementos que afectan la medición del IRI

Los equipos utilizados en la medición de las rugosidades superficiales de las carreteras han evolucionado considerablemente. Errores y discrepancias en las mediciones del perfil se han presentado debido a la variación de los equipos, procedimientos de operación inadecuados, aspectos de la superficie del pavimento y ambiente circundante. Como ejemplo se describe que los operadores de los equipos de medición no pueden tomar siempre la misma posición o seguir la misma línea, lo cual afecta la medida, aunque se utilicen equipos sofisticados.

Dentro de los aspectos que pueden afectar la medición, se describen los siguientes: diseño del equipo, forma del pavimento, el medio ambiente, la operación del equipo y la práctica o habilidad del operador.

Dentro de los aspectos de diseño del equipo que pueden afectar la calidad de los datos son la altura de los sensores, los tipos de acelerómetros y las distancias medidas del sistema. Uno de los factores importantes en la medición que contribuye a obtener perfiles precisos es la manera de tomar los datos. En menores distancias o tramos cortos los cálculos son precisos para la obtención del IRI.

Por la forma de las carreteras, se tiene que las medidas de los perfiles usualmente se realizan a través de dos líneas en la superficie de la carretera en una longitud dada. La posición lateral de las medidas, posee una fuerte influencia en el perfil, ya que la forma y superficie de la carretera cambian a lo largo de la longitud. De igual manera el tiempo y la fecha de obtención de los datos puede influenciar en los resultados, en muchos casos, por los cambios cíclicos en la rugosidad debido a factores ambientales. Se deben considerar las fallas que existen en los pavimentos ya que tienen un efecto considerable en la medición de la rugosidad, así como la evolución y progresión de las mismas.

La mayoría de fallas que son capturadas en las mediciones de un perfil aparecen como características severas que incrementan el valor del IRI. Las carreteras que presentan daño en su estructura y los intervalos de toma de las mediciones, poseen un impacto elevado en los resultados.

La humedad y los periodos de lluvia son aspectos naturales que afectan los resultados de la medición de la rugosidad del perfil en una carretera.

La ruta que el equipo toma sobre una sección tiene una alta influencia en las mediciones de la rugosidad, por las variaciones transversales del perfil. Dos medidas que siguen diferentes líneas pueden producir resultados igualmente validos pero diferentes. Así mismo, la conducción del vehículo con velocidades

fuera de lo normado por el equipo, puede producir resultados de rugosidad inadecuados.

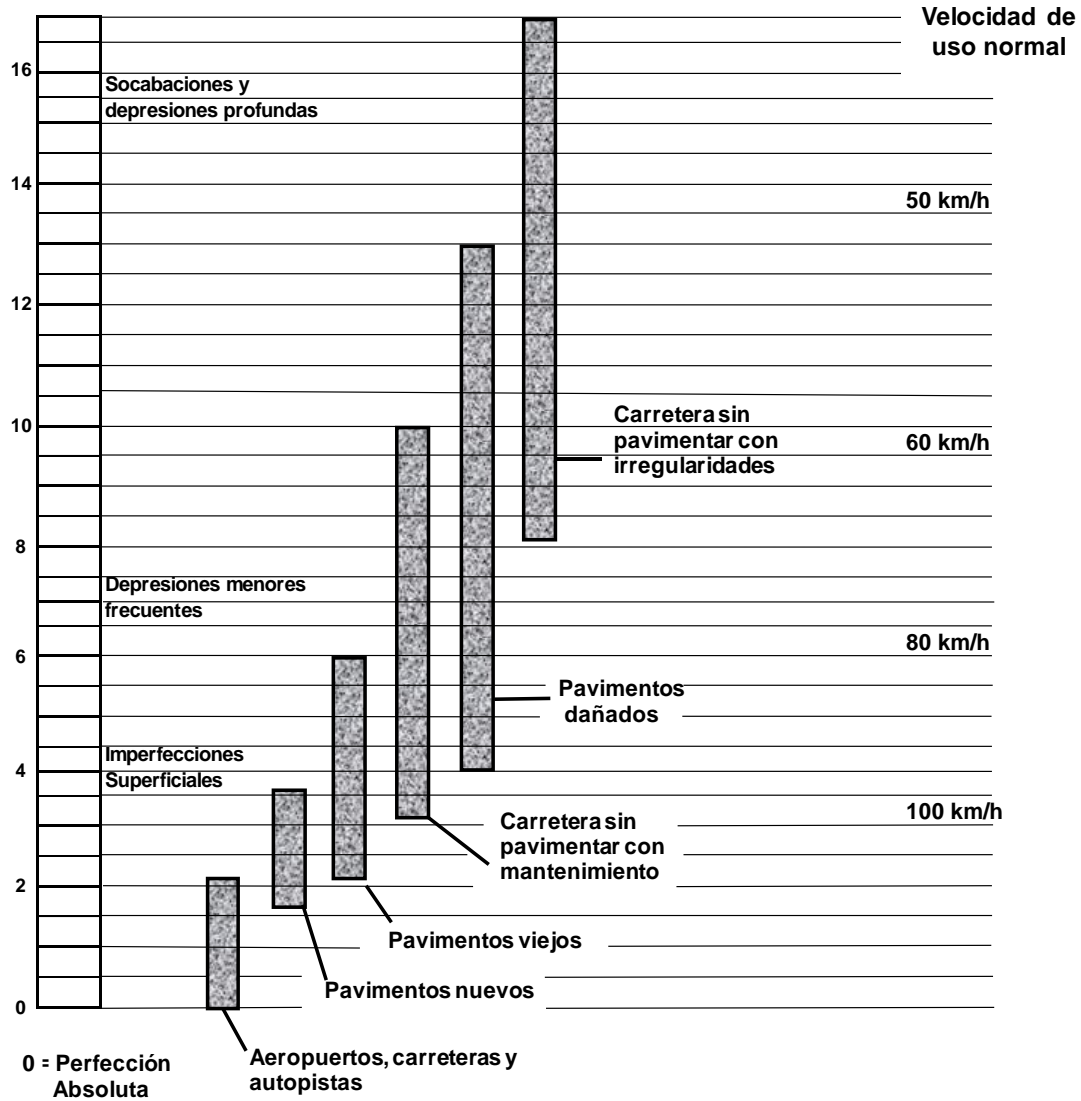
Tanto el operador y el conductor de los equipos pueden influenciar en la calidad de los datos del perfil ya que ellos controlan la velocidad, la ruta, la posición lateral, del vehículo y la permanencia en la línea correcta.

2.12. Valores del IRI y especificaciones internacionales (escala del Banco Mundial)

A partir del estudio realizado por Banco Mundial en 1982, se propuso la escala presentada en la figura 16, para la medición del índice de rugosidad internacional en diferentes carreteras. Otras escalas son presentadas por la especificación ASTM E 1926, en la figura 16 y por el Banco Mundial el documento técnico No. 46, en la tabla IV, las cuales se muestran a continuación.

Figura 16. Descripción de la escala de IRI (m/km)

IRI (m/km = mm/m)



Fuente: Sayers, M., Gillespie, T., & Paterson, W. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*.

Tabla IV. **Escala de rugosidad de carreteras pavimentadas con asfalto especificación ASTM E 1926**

| Valores de IRI (M/KM) | Características de la carpeta asfáltica y velocidad de viaje |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0 - 3 | Manejo confortable arriba de 120 km/h. Ondulación levemente perceptible a 8 km/h en un rango entre 1.3 y 1.8 depresiones, baches o corrugaciones no son fácilmente visibles; depresiones menores a 2 o 3 milímetros. Típicamente en asfaltos de alta calidad con valores de 1.4 y 2.3 mm/m. |
| 3 - 6 | Manejo confortable entre 100 y 120 km/h. a 80 km/h, movimientos moderadamente perceptibles o largas ondulaciones, pueden ser percibidas. Superficie defectuosa con depresiones ocasionales, cortes o baches con valores de 5 mm/m hasta 10 mm/m. |
| 6 - 9 | Manejo confortable entre 70 y 90 km/h, grandes movimientos perceptibles y oscilaciones. Usualmente asociados con defectos como: depresiones frecuentes, cortes grandes, baches y deformaciones en la carpeta asfáltica; con valores entre 15 o 40 mm/m. |
| 9 - 11 | Manejo confortable entre 50 y 60 km/h, frecuentes movimientos puntales u oscilaciones. Asociados con severos defectos como depresiones profundas y variables con valores entre 20 u 80 m/km. |
| 11 en adelante | Necesario reducir velocidad, por debajo de 50 km/h. Muchas depresiones profundas, baches y desintegración severa de la carpeta asfáltica; con valores entre 40 u 80 mm/m. |

Fuente: Cardona Villa, (2007). *Tesis Predicción del IRI, Universidad Nacional de Colombia.*

Tabla V. **Medición de rugosidad de carreteras pavimentadas con asfalto**

| Valores de IRI (M/KM) | Características de la carpeta asfáltica y velocidad de viaje |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0 - 3 | Superficie de grava recientemente aplanada, o superficie de suelo con excelente perfil longitudinal y transversal (usualmente en tramos cortos). |
| 3 - 6 | Viaje cómodo en el rango de 80 a 100 km/h, con precaución debido a ondulaciones suaves. Depresiones insignificantes. |
| 6 - 10 | Viaje cómodo en el rango de 70 a 80 km/h con depresiones superficiales moderadas o pequeños baches. |
| 10 - 14 | Viaje cómodo a 50 km/h. Frecuentes depresiones transversales moderadas o depresiones profundas ocasionales o baches. |
| 14 - 18 | Viaje cómodo en el rango de 30 a 40 km/h. Frecuentes depresiones transversales y profundas, baches o depresiones muy profundas ocasionales, con otras depresiones superficiales. Imposible evitar todas las depresiones excepto las peores. |
| 18 - 24 | Viaje cómodo en el rango de 20 a 30 km/h. Velocidades mayores a los 50 km/h causarán incomodidad extrema, y posibles daños al vehículo. En un buen perfil general: frecuentes depresiones profundas y/o baches ocasionales presentados en superficie de terracería. |

Fuente: Sayers, M., Gillespie, T., & Paterson, W. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*.

2.13. Método para determinar el cálculo del IRI

El cálculo del IRI involucra la utilización de herramientas matemáticas, estadísticas y computacionales que permiten derivar la medida de regularidad asociada a la carpeta asfáltica, lo cual contempla etapas claramente diferenciadas y ajustadas a un desarrollo sistemático. El primer paso del procedimiento para el cálculo del IRI, y el más importante de todos, consiste en medir las cotas o elevaciones del terreno que permiten representar el perfil real

de la carretera. Esto significa que el IRI es independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil y dependerá, únicamente, de la calidad del perfil longitudinal. Estos datos son sometidos a un primer filtro, en el cual se realiza un análisis estadístico (medida móvil) y adecuaciones matemáticas para poder generar un nuevo perfil, con el cual es posible analizarlo desde el punto de vista de las irregularidades que se pudieran observar (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)

Las razones para aplicar este primer filtro se fundamentan en lo siguiente:

- Para simular el comportamiento entre las llantas de los vehículos y la carretera, y
- Para reducir la sensibilidad del algoritmo del IRI al intervalo de muestreo.

Al nuevo perfil generado se le aplica un segundo filtro, el cual consiste en la aplicación de un modelo de cuarto de carro que se desplaza a una velocidad de 80 km/h. A través de este, se registran las características asociadas al camino basadas en los desplazamientos verticales inducidos a un vehículo estándar, el cual es modelado de forma simplificada como un conjunto de masas ligadas entre sí y con la superficie de la carretera mediante resortes y amortiguadores. El movimiento sobre el perfil de la carretera produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las masas que nos lleva a medir los movimientos verticales no deseados atribuibles a la irregularidad de la carretera.

3. CASO PRÁCTICO AUTOPISTA PALÍN - ESCUINTLA

Se ha considerado en el presente trabajo la evaluación al tramo de la autopista Palín - Escuintla, ubicado en el departamento de Escuintla. La Empresa que tiene a su cargo el funcionamiento de dicho tramo, conocida como: "SIVA", proporcionó los resultados de la evaluación realizada, debido a que está enmarcado dentro de los estatutos de la concesión: "realizar la medición del Índice de Rugosidad Internacional de la calzada, para así garantizar el confort a los usuarios que transitan por la autopista". Ver Anexo.

Para ello se efectuó el estudio del servicio de la carretera y confortabilidad del usuario mediante esta medición con el perfilómetro inercial MARK IV de la compañía Dynatest, para determinar la condición superficial de la carpeta asfáltica.

La longitud total del tramo evaluado es de veintitrés (23) kilómetros, mismos que se conforman de tres (3) carriles de ascenso (Escuintla - Palín) y dos (2) carriles de descenso (Palín - Escuintla).

3.1. Ubicación

El tramo en evaluación se ubica en Ruta CA-9 Sur, tramo autopista Palín - Escuintla, que forma parte de la Ruta Interoceánica, de la Estación 38+00 a la Estación 61+00.

Figura 17. Tramo de evaluación (autopista Palín - Escuintla)



Fuente: Google Maps, (2019). Recuperado de:
<https://www.google.com/maps/search/autopista+palin+escuintla/@14.4077805,-90.7045131,15.25z>.

3.2. Descripción del tramo

La pista derecha, Palín, 38+000 a Escuintla, 61+00, consta de dos carriles, el carril interno o de alta velocidad y el carril externo o de baja velocidad. La pista izquierda, Escuintla, 61+000 a Palín 38+00, consta de tres carriles, siendo el adicional denominado carril de ascenso.

Figura 18. Nomenclatura de carriles

| | | | | |
|---------------------------------|--|------------|----|---|
| Calzada 2 Escuintla Palín | | Carril No. | 10 | ← |
| | | | 7 | ← |
| | | | 5 | ← |
| Calzada 1 Palín Escuintla | | Carril No. | 6 | → |
| | | | 8 | → |

Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla. Guatemala.*

3.3. Proceso para la medición del IRI

La medición del perfil longitudinal se realizó a ambas pistas, utilizando el perfilómetro inercial Dynatest Mark IV (Figura 19) midiendo la acumulación de irregularidades con respecto a un plano horizontal imaginario y expresando el resultado en unidades de m/km.

Figura 19. Perfilómetro Inercial (RSP) Dynatest-Mark III L5.2+



Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla. Guatemala.*

El IRI está relacionado directamente con el servicio de la carretera y el desempeño estructural que tiene el pavimento durante su vida útil. Es importante mencionar que, a mayores valores de rugosidad, las cargas del tránsito serán altamente agresivas para la estructura de pavimento y esto disminuirá la

capacidad para contrarrestar los ejes equivalentes contemplados para un cierto periodo de tiempo.

También es importante monitorear los valores de IRI durante la vida útil del pavimento, ya que influirán en la confortabilidad del usuario, depreciación de los vehículos, emisiones de agentes contaminantes, seguridad vial y tiempos de recorrido. Éstos valores representan el movimiento vertical acumulado de la masa superior de la suspensión de una rueda, es decir un cuarto de carro, cuando recorre la superficie a una velocidad de referencia de 80 km/h y se expresan como la variación acumulada por unidad de longitud, es decir mm/m (milímetros por metro) o m/km (metros por kilómetro).

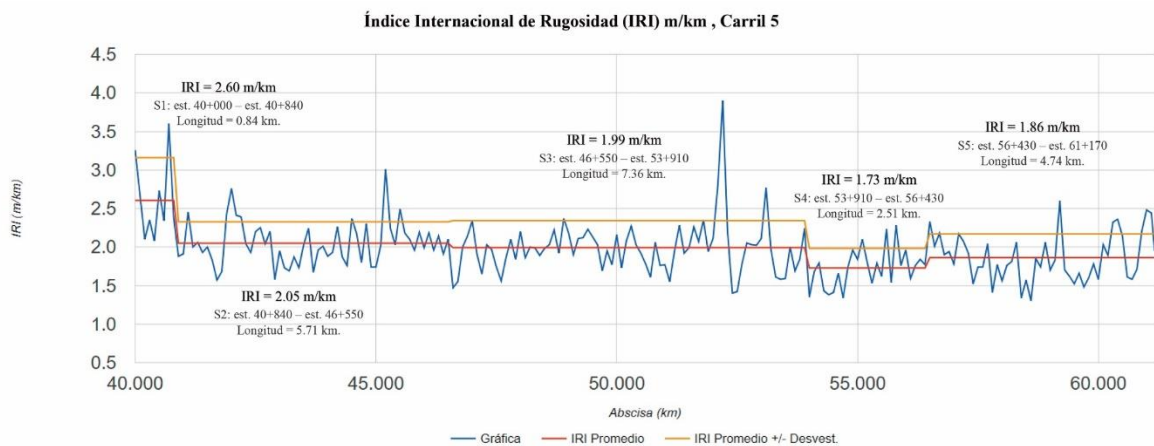
Las metodologías de diseño contemplan un índice de servicio o desempeño inicial y final. Si estos parámetros cumplen con las especificaciones del diseñador, se podrá detectar el momento adecuado para una intervención de mantenimiento estructural, esto con el objetivo de aumentar la vida útil del pavimento a un menor costo aprovechando los módulos de elasticidad de las capas existentes. Los parámetros de exigencia dependen de la clasificación de la vía, topografía y equipo disponible para ejecución.

En rehabilitaciones, los valores promedio de IRI iniciales normalmente oscilan entre los valores de 1.8 m/km y 3.0 m/km (tomando datos promedio a cada 100 metros). En este estudio se consideró para el diseño un índice de serviciabilidad inicial de 4.0 que equivale a un IRI menor a 3.0 m/km (tomando datos promedio a cada 100 metros).

3.3.1. Resultados obtenidos en la medición del IRI

Los resultados fueron analizados y procesados en gabinete. En esta fase, se realizaron algunos filtros los cuales corresponden a las mediciones realizadas sobre los vibradores (reductores de velocidad), los cuales se ubican específicamente en las garitas de peaje de la Autopista. Este tipo de estructuras presentan una deformación en la vía, lo cual provoca que el vehículo perdiera velocidad constante requerida para la medición, resultando en el incremento del IRI en esta área, por lo cual, estos valores obtenidos en estas secciones no son representativos del perfil longitudinal estrictamente del pavimento construido. (Rubio H., 2019).

Figura 20. Resultados IRI carril 5, calzada derecha



Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla. Guatemala.*

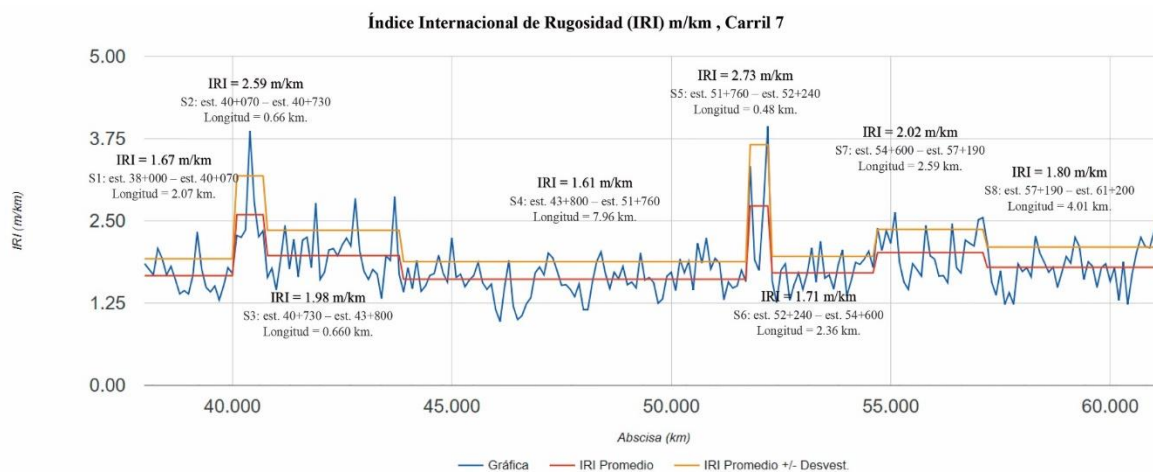
Tabla VI. Valores obtenidos del IRI carril 5, calzada derecha

| Inicio | Final | Longitud | IRI promedio | Desviación | IRI promedio más desviación |
|--------|-------|----------|--------------|------------|-----------------------------|
| 40.00 | 40.84 | 0.84 | 2.60 | 0.55 | 3.16 |
| 40.84 | 46.55 | 5.71 | 2.05 | 0.28 | 2.33 |
| 46.55 | 53.91 | 7.36 | 1.99 | 0.35 | 2.34 |
| 53.91 | 56.43 | 2.52 | 1.73 | 0.26 | 1.98 |
| 56.43 | 61.17 | 4.74 | 1.86 | 0.31 | 2.17 |

Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla. Guatemala.*

En términos generales, los valores del IRI del carril 5 indican una superficie de rodadura adecuada. El primer sub tramo es el que presenta el resultado más alto del tramo con un promedio de 2.60 m/km. Por el contrario, el cuarto sub tramo es el que presenta mejores resultados del IRI al tener un promedio menor a 1.73 m/km.

Figura 21. Resultados del IRI carril 7, calzada derecha



Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla. Guatemala.*

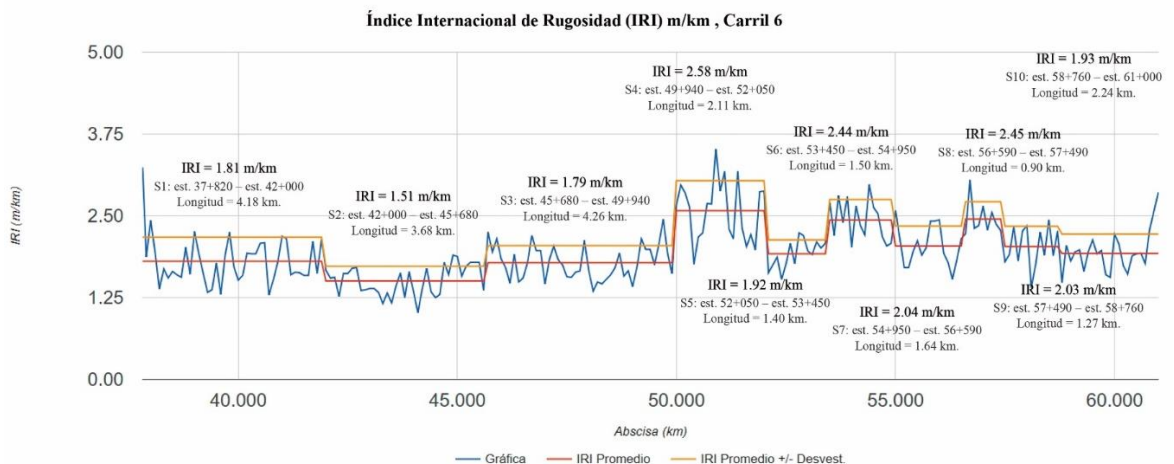
Tabla VII. Valores obtenidos del IRI Carril 7, calzada derecha

| Inicio | Final | Longitud | IRI promedio | Desviación | IRI promedio más desviación |
|--------|-------|----------|--------------|------------|-----------------------------|
| 38.00 | 40.07 | 2.07 | 1.67 | 0.26 | 1.92 |
| 40.07 | 40.73 | 0.66 | 2.59 | 0.59 | 3.19 |
| 40.73 | 43.8 | 3.07 | 1.98 | 0.38 | 2.36 |
| 43.80 | 51.76 | 7.96 | 1.61 | 0.27 | 1.88 |
| 51.76 | 52.24 | 0.48 | 2.73 | 0.93 | 3.66 |
| 52.24 | 54.6 | 2.36 | 1.71 | 0.25 | 1.96 |
| 54.60 | 57.19 | 2.59 | 2.02 | 0.35 | 2.37 |
| 57.19 | 54.6 | 4.01 | 1.80 | 0.31 | 2.10 |

Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla, Guatemala.*

En términos generales, los valores del IRI del carril 7 indican una superficie de rodadura adecuada. El quinto sub tramo es el que presenta el resultado más alto del tramo con un promedio de 2.73 m/km. Por el contrario, el cuarto sub tramo es el que presenta mejores resultados del IRI al tener un promedio menor a 1.61 m/km.

Figura 22. Resultados del IRI carril 6, calzada izquierda



Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla, Guatemala.*

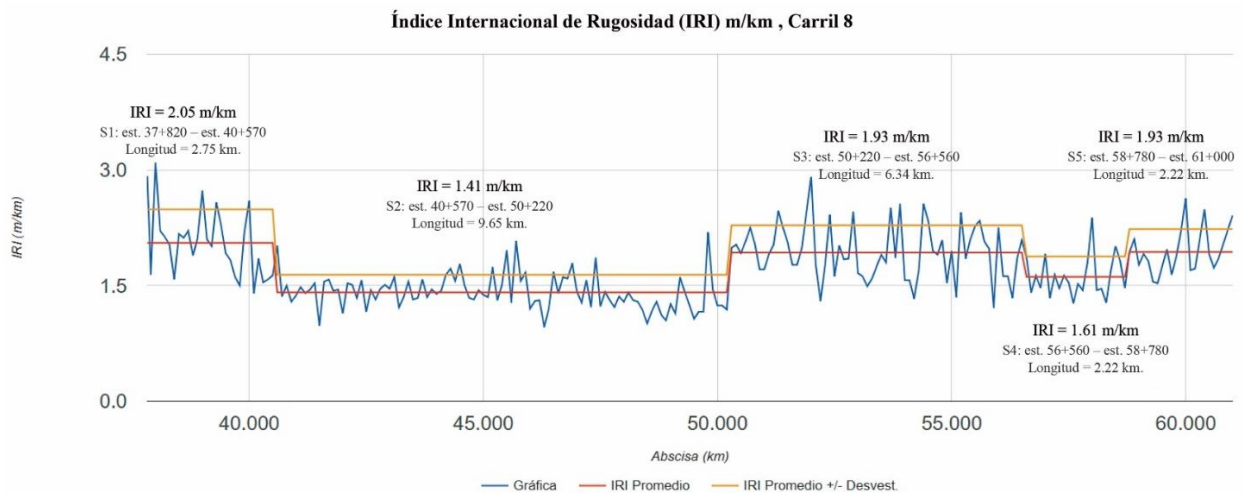
Tabla VIII. Valores obtenidos del IRI carril 6, calzada izquierda

| Inicio | Final | Longitud | IRI promedio | Desviación | IRI promedio más desviación |
|--------|-------|----------|--------------|------------|-----------------------------|
| 37.82 | 42 | 4.18 | 1.81 | 0.36 | 2.17 |
| 42 | 45.68 | 3.68 | 1.51 | 0.22 | 1.73 |
| 45.68 | 49.94 | 4.26 | 1.79 | 0.26 | 2.04 |
| 49.94 | 52.05 | 2.11 | 2.58 | 0.46 | 3.04 |
| 52.05 | 53.45 | 1.4 | 1.92 | 0.21 | 2.13 |
| 53.45 | 54.95 | 1.5 | 2.44 | 0.31 | 2.75 |
| 54.95 | 56.59 | 1.64 | 2.04 | 0.31 | 2.35 |
| 56.59 | 57.49 | 0.9 | 2.45 | 0.26 | 2.71 |
| 57.49 | 58.76 | 1.27 | 2.03 | 0.31 | 2.34 |
| 58.76 | 61 | 2.24 | 1.93 | 0.30 | 2.22 |

Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla. Guatemala.*

Los valores del IRI del Carril 6 indican una superficie de rodadura aceptable. El cuarto sub tramo es el que presenta el resultado más alto del tramo con un promedio de 2.58 m/km. Por el contrario, el segundo sub tramo es el que presenta mejores resultados del IRI al tener un promedio de 1.51 m/km.

Figura 23. Resultados del IRI carril 8, calzada izquierda



Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla. Guatemala.*

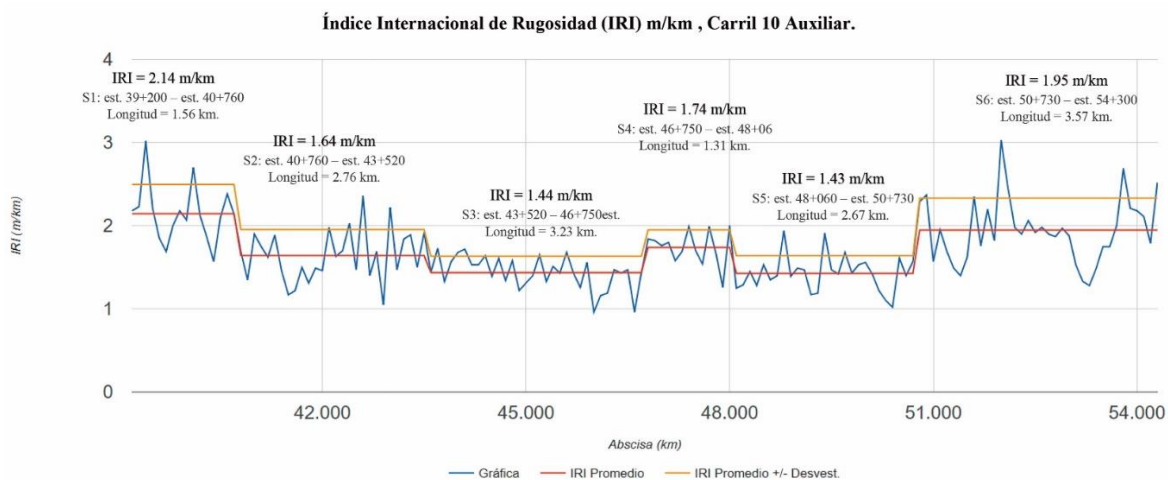
Tabla IX. Valores obtenidos del IRI carril 8, calzada izquierda

| Inicio | Final | Longitud | IRI promedio | Desviación | IRI promedio más desviación |
|--------|-------|----------|--------------|------------|-----------------------------|
| 37.82 | 40.57 | 2.75 | 2.05 | 0.44 | 2.49 |
| 40.57 | 50.22 | 9.65 | 1.41 | 0.23 | 1.64 |
| 50.22 | 56.56 | 6.34 | 1.93 | 0.35 | 2.28 |
| 56.56 | 58.78 | 2.22 | 1.61 | 0.27 | 1.88 |
| 58.78 | 61 | 2.22 | 1.93 | 0.30 | 2.23 |

Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla. Guatemala.*

Los valores del IRI del Carril 8 indican una superficie de rodadura adecuada. El primer sub tramo es el que presenta el resultado más alto del tramo con un promedio de 2.05 m/km, Por el contrario, el segundo sub tramo es el que presenta mejores resultados del –IRI al tener un promedio de 1.41 m/km. En comparación con el Carril 6, el Carril 8 presenta rugosidades más bajas.

Figura 24. Resultados (IRI) carril 10 auxiliar calzada izquierda



Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla. Guatemala.*

Tabla X. **Valores obtenidos del IRI carril 10 auxiliar, calzada izquierda**

| Inicio | Final | Longitud | IRI promedio | Desviación | IRI promedio más desviación |
|--------|-------|----------|--------------|------------|-----------------------------|
| 39.20 | 40.76 | 1.56 | 2.14 | 0.35 | 2.55 |
| 40.76 | 43.52 | 2.76 | 1.64 | 0.31 | 1.95 |
| 43.52 | 46.75 | 3.23 | 1.44 | 0.20 | 1.63 |
| 46.52 | 48.06 | 1.31 | 1.74 | 0.21 | 1.95 |
| 48.06 | 50.73 | 2.67 | 1.43 | 0.21 | 1.64 |
| 50.73 | 54.3 | 3.57 | 1.95 | 0.39 | 2.33 |

Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla. Guatemala.*

Los valores del IRI del carril 10 auxiliar indican una superficie de rodadura adecuada. El primer sub tramo es el que presenta el resultado más alto del tramo con un promedio de 2.14 m/km. Por el contrario, el quinto sub tramo es el que presenta mejores resultados del IRI al tener un promedio de 1.43 m/km. En comparación con el carril 6 y el carril 8, el carril 10 auxiliar presenta rugosidades más bajas, ya que estas se encuentran debajo del promedio del 2.14 m/km.

Tabla XI. **Resumen de resultados obtenidos de IRI promedio**

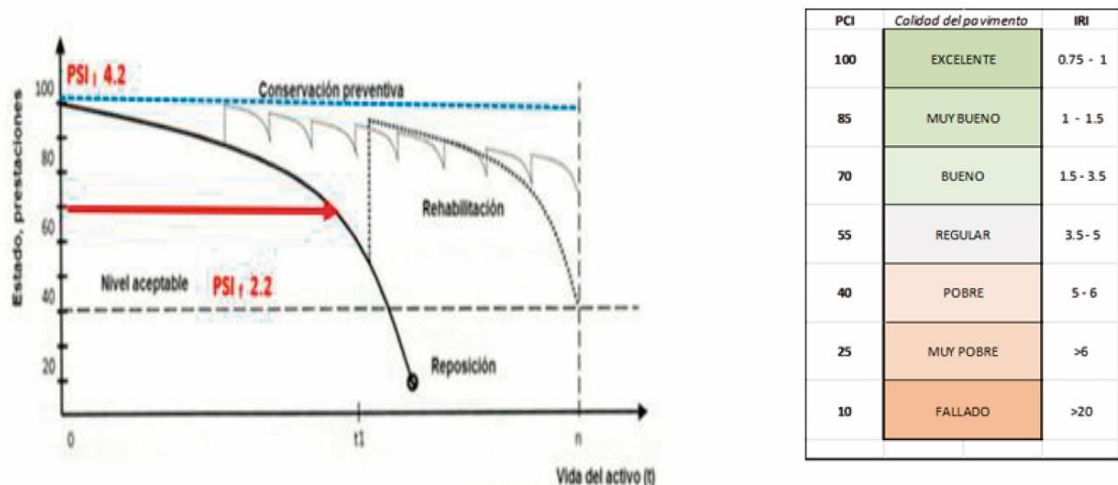
| Carril evaluado | Rangos IRI promedio |
|-----------------|---------------------|
| Carril 5 | 1.73 - 2.60 m/km |
| Carril 7 | 1.61 - 2.73 m/km |
| Carril 6 | 1.51 - 2.58 m/km |
| Carril 8 | 1.41 - 2.05 m/km |
| Carril 10 | 1.43 - 2.14 m/km |

Fuente: elaboración propia, basada en información de este capítulo.

En los tramos evaluados, los resultados promedios obtenidos por carril, muestran valores de rugosidad entre 1.41 a 2.73 m/km, con lo cual se concluye,

de acuerdo con los rangos propuestos en la figura 25 como BUENA la estructura existente. Sin embargo, debido a la pérdida constante de soporte y fatiga del pavimento, el deterioro a futuro podrá ver estos valores incrementados, lo cual obligaría a una intervención mayor, en 3 años plazo (marzo 2022), a fin de mantener la estructura inferior del pavimento (sub base y base) en condiciones operativas aceptables, lo que representaría que la rehabilitación de la rodadura existente, pueda realizarse a un costo menor.

Figura 25. Comparación IRI, PSI Y PCI ruta Palín - Escuintla



Fuente: Rubio H. (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo autopista Palín – Escuintla. Guatemala.*

Además, se visualiza el deterioro con indicación del nivel actual de la ruta y su correlación con el Índice de Rugosidad y el Índice de condición presente (PCI). La correlación de los valores de IRI, PCI y PSI son consistentes dando una calificación aceptable, que se considera adecuado dado que el período de diseño original de la ruta fue de 20 años, ya que fue puesta en servicio en 1998.

4. PROPUESTA DE RECOMENDACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA GUATEMALA

Ante la falta de una sección relacionado con la medición del IRI en carreteras, dentro de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la DGC, se hace imperativo proponerlo, con el objetivo de llenar este vacío dentro de la Ingeniería vial guatemalteca. Las Especificaciones Generales, únicamente abordan el tema con una mínima recomendación al respecto de su aplicación. En la sección 401.18 control de calidad, tolerancias y aceptación, inciso c), numeral 4; se refiere a la creación de una Especificación Técnica Especial para cada caso en particular.

Por lo anterior, se formula también una propuesta sobre la determinación del IRI, que pueda ser evaluada y de ser posible, incluida dentro de las especificaciones de construcción del Manual Centroamericano de la SIECA, 2004, ya que también se carece de esta norma dentro del área centroamericana.

4.1. Definición

El Índice Internacional de Rugosidad IRI se define como la desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de manejo, cargas dinámicas y el drenaje. El término Regularidad es asociado al concepto de rugosidad, para referirse a las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan adversamente a la calidad de rodado, seguridad y costos de operación de los vehículos.

4.2. Procedimiento

- Paso 1

Medición física de un perfil longitudinal.

- Paso 2

El perfil medido se propone sobre una base de 250 mm de largo. Con este filtrado se simula el efecto suavizante de la deformación del neumático del vehículo en uso; eligiendo el equipo a utilizar para obtener el Índice de Rugosidad Internacional IRI.

- Paso 3

Se obtienen resultados con los cuales el software filtra los datos obtenidos, mediante la simulación del cuarto de carro. Esta información se registra la respuesta física de un auto ideal que circula sobre el perfil a una velocidad de 80 km/h.

- Paso 4

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) (m/km o mm/m) se calcula como el movimiento acumulado en metros o milímetros (m o mm) de la suspensión del auto ideal, dividido por la longitud del perfil transitado o en evaluación.

Lo anterior facilita la conveniencia de cumplir con las especificaciones del proyecto en el proceso constructivo; controlando la rugosidad de las capas estructurales inferiores a la superficie de rodadura ya que de esta forma los resultados de rugosidad en la carpeta de superficie serán mínimos y de esta forma el proyecto cumplirá con los estándares de calidad.

4.3. Equipo

Utilizar equipos para medición de la rugosidad, que estén comprendidos en las clases I y II siguientes.

Clase I: incluye perfilógrafos manuales de precisión, como el Dipstick; el método de mira y nivel clasifica dentro de esta clase.

Clase II: incluye perfilógrafos de medición directa, de la vía con sistema láser, viga de luces o técnicas acústicas, calibradas de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

Ambos equipos deben excluir las singularidades, que no son debidas a defectos constructivos; sino son afectaciones definidas por diseño geométrico (perfiles, secciones, detalles) y se relacionan principalmente con intersecciones, cruces de carreteras, losas y elementos de puentes, pozos de alcantarillado y similares.

4.4. Parámetros

En la siguiente tabla se describen los parámetros propuestos para proyectos a ejecutarse en Guatemala.

Tabla XII. Valores de IRI

| | IRI (m/km) | IRI (m/km) | Velocidad Máxima |
|---------------------------------------------|------------|------------|------------------|
| | Min | Max | |
| Aeropuertos, autopistas y pavimentos nuevos | 0 | 2.5 | 100 km/h |
| Pavimentos existentes | 2.5 | 4 | 80 km/h |
| Pavimento dañado | 4 | 6 | 60 km/h |

Fuente: elaboración propia.

4.5. Normas de aplicación

En la siguiente tabla se describen las normas utilizables para la medición de la rugosidad en proyectos a ejecutarse en Guatemala.

Tabla XIII. **Normas para la medición de la rugosidad**

| Norma | Descripción |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ASTM E 1170 | Proceso estándar para simular la reacción vehicular a los perfiles longitudinales de superficies transitadas. |
| ASTM E 950 | Método estándar de prueba para medir el perfil longitudinal de superficies transitadas con referencia inercial establecida con acelerómetro. |
| ASTM E 867 | Terminología relacionada con sistemas vehículo-pavimento. |
| ASTM E 1364 | Método estándar de prueba para medir la rugosidad de carreteras por método estático de nivel. |
| ASTM E 1274 | Método estándar de prueba para medir la rugosidad del pavimento utilizando un perfilógrafo. |
| ASTM E 1926 | Proceso estándar para calcular el Índice Internacional de Rugosidad de carreteras basado en mediciones de perfil longitudinal. |
| ASTM E 1082 | Método estándar de prueba para medir la reacción vehicular a la rugosidad de la superficie de tránsito. |
| AASHTO P 37-04 | Proceso estándar para determinar el Índice de rugosidad Cuantificando la rugosidad de pavimentos. |

Fuente: Cardona Villa, (2007). *Tesis Predicción del IRI, Universidad Nacional de Colombia.*

- Los valores del IRI deben ser obtenidos cuando existan buenas condiciones climáticas y la superficie de la carretera en estado seco.
- Debe realizarse en tramos homogéneos, que correspondan a un pavimento de estructuración uniforme y que no es dividido por puentes, líneas férreas, cruce de calles y otros detalles que puedan alterar el perfil longitudinal de la carretera e incrementen el valor obtenido del IRI.

La utilización de cualquier tipo de equipo para el cálculo del (IRI). Se recomienda utilizar un tramo de carretera como control, para lo cual cualquier contratista pueda comparar y verificar sus resultados para certificar su equipo de medición y este cumpla con los estándares de calidad en la obtención de resultados de la medición del (IRI).

Se sugiere que los resultados de las cotas de elevación del perfil longitudinal sean tomados en intervalos de 25 mm y guardados en archivo con formato ERD (*Engineering Research Division, ERD*) (*División de Investigación de Ingeniería*), ya que los archivos pueden ser analizados con programas tales como RoadRuf o PROVAL, los cuales permiten analizar posteriormente el perfil; permitiendo observar el perfil con la utilización de otros intervalos o longitudes de evaluación así como las singularidades que puedan afectar el tramo de la carretera en evaluación.

- Se debe medir el perfil longitudinal de la carretera, al menos 20 metros antes del punto de inicio e iniciar a partir de allí, la medición del IRI.
- Los resultados obtenidos, deben estar basados en la norma ASSHTO P37 2004 04, reportando el valor promedio del IRI para los

sensores izquierdo y derecho del perfilómetro laser, que corresponden a las huellas de las llantas del vehículo, indicando el IRI promedio y los resultados expresados en unidades mm/m o m/km con al menos dos decimales.

4.6. Medida

La medida se debe hacer en kilómetros con aproximación en metros, de la longitud total de cada carril a evaluar, medido de conformidad con el equipo seleccionado y aceptado dentro del ancho establecido de la sección típica de cada carril en la carretera.

Un informe con los resultados, conclusiones y recomendaciones de las lecturas obtenidas, deben formar parte de la medición de los trabajos contratados.

4.7. Pago

El pago debe de hacerse por kilómetro de longitud, medidos a partir del eje longitudinal de cada carril. El pago se realizará cuando el mismo sea recibido satisfactoriamente por el delegado residente y conforme los precios unitarios y cantidades de trabajo establecidos en el contrato de obra respectivo.

CONCLUSIONES

1. La metodología para la medición del IRI, involucra un proceso que debe realizarse necesariamente en tramos homogéneos dando cumplimiento a valores descritos en tabla XII.
2. Para una carretera nueva o rehabilitada, la lectura inicial del IRI mostrará el estado del pavimento al inicio de su vida operativa, la cual servirá de parámetro para las futuras mediciones que se realicen, mostrando el nivel de deterioro que va sufriendo con el uso vehicular.
3. El tramo en estudio, Palín – Escuintla, registra un rango promedio de 1.41-2.73 m/km, con lo cual se determina que la condición de la carpeta asfáltica es buena.
4. En carreteras en operación, el IRI determina el valor de rugosidad, producto de las deformaciones o fallas por efecto del tránsito vehicular y efectos ambientales. A partir de aquí, valores superiores a 4, deben ser evaluados para mantenimiento periódico. Valores entre 4 y 6 deben ser considerados para procesos de reconstrucción.
5. La especificación propuesta para la determinación y medición del IRI, fue adecuada al formato que utiliza el Libro Azul de la DGC, basado en el caso práctico realizado en congruencia con los valores recomendados por el Banco Mundial, impulsor de esta metodología, a fin de contar con una normativa para este proceso.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar el IRI de las carreteras con pavimento flexible y con los valores obtenidos poder determinar el tipo de intervención a realizar.
2. Los equipos deben estar debidamente calibrados y con las certificaciones que lo acrediten antes de realizar cualquier labor de medición.
3. Para el caso de la autopista Palín-Escuintla, debido a la pérdida constante de soporte y fatiga del pavimento y los valores de IRI promedio obtenido (1.41 - 2.73 m/km), el deterioro a futuro podrá ver estos valores incrementados, lo cual obligaría a una intervención mayor, en 3 años plazo (marzo 2022), a fin de mantener la estructura inferior del pavimento (sub base y base) en condiciones operativas aceptables.
4. Las superficies de rodadura con un IRI comprendido entre 2.5 y 4 m/km deben considerarse para labores de mantenimiento rutinario y periódico. Para las superficies con un IRI superior a 4 m/km deben considerarse labores de reconstrucción.
5. Utilizar un tramo de carretera como parámetro de control, para lo cual, cualquier contratista pueda confrontar y confirmar sus resultados para certificar el equipo de medición y este cumpla con los estándares de calidad en el proceso de obtención resultados de la medición del IRI.
6. En la ejecución de proyectos, los resultados de las cotas de elevación del perfil longitudinal sean tomados en intervalos de 25 mm y guardados con

formato ERD (*Engineering Research Division, ERD*) (*División de Investigación de Ingeniería*), ya que la información pueden ser desarrollados con programas tales como RoadRuf o PROVAL.

7. Contar con una base de datos de la información histórica y actual del estado físico de las carreteras debiendo incluir cada una de las mediciones del IRI realizadas, a efecto de contar con una herramienta para la toma de decisiones para el mantenimiento y rehabilitación de la red vial del país.
8. Implementar dentro de la normativa vial para la ejecución de proyectos carreteros en Guatemala, las especificaciones planteadas en este trabajo de tesis, con el fin de poder garantizar la calidad de las obras.

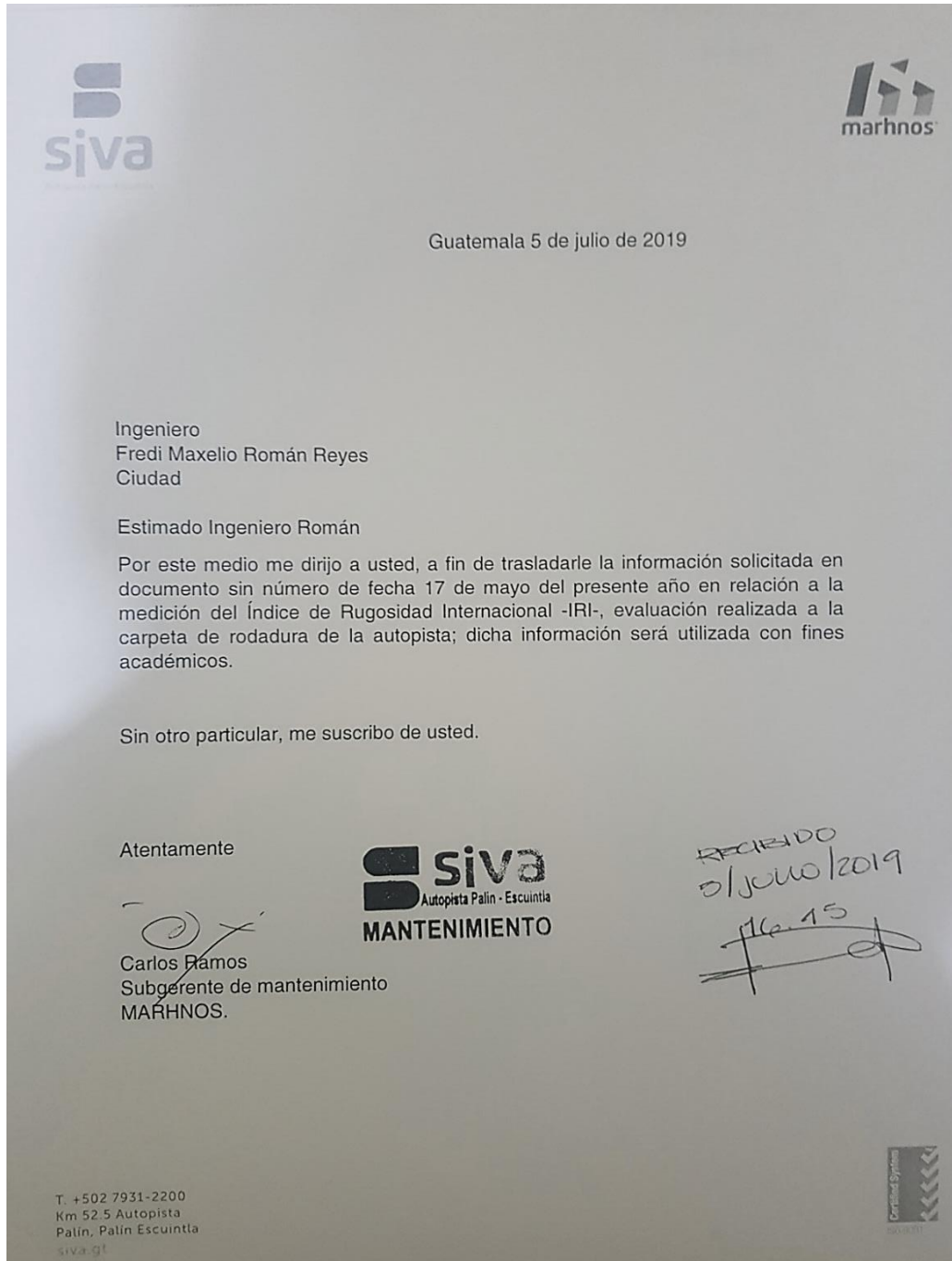
BIBLIOGRAFÍA

1. Arancibia, F. (2006). *Ingeniería y Construcción*. Recuperado de <http://photos1.blogger.com/blogger/6961/2128/1600/imagen11.jpg>
2. Badilla Vargas, G., Elizondo Arrieta, F., & Barrantes R. (2008). *Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI*. Tesis de Universidad de Costa Rica. Costa Rica, Costa Rica.
3. Cardona, C. (2007). *Tesis Predicción del IRI, Universidad Nacional de Colombia*. Colombia.
4. DGC, & Dirección General de Caminos. (2017). *Reformulación y actualización del plan de desarrollo vial. periodo 2008-2017. Guatemala*.
5. El Economista. (2016). *El Economista*. Recuperado de: <https://www.eleconomista.net/actudad/Guatemala-irregularidades-de-Odebrecht-paralizan-ampliacion-de-carretera-con-Mexico-20161229-0043.html>
6. Google Maps. (2019). *Autopista Palin - Escuintla*. Recuperado de <https://www.google.com/maps/search/autopista+palin+escuintla/@14.4077805,-90.7045131,15.25z>
7. Mendiá, F. (2019). *2019 Cien*. Recuperado de <http://cien.mex.tl/>

8. Merrit, F., Loftin, M., & Ricketts, J. (2005). *Manual del Ingeniero Civil*. Mexico: McGraw-Hill.
9. Montejo, A. (2010). *Ingeniería de pavimentos, evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías* (3era. ed.). Colombia: Panamericana Formas e Impresos.
10. Nieto Mora, J., & Velásquez, O. (2013). *Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C.* Bogotá, Colombia.
11. Rubio H., (2019). *Evaluación Estructural y de Servicio del tramo Autopista Palín-Escuintla*. Guatemala.
12. Sayers, M., Gillespie, T., & Paterson, W. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*. Washinton, D.C. Estados Unidos.

ANEXO

Anexo 1. Documento traslado de información, medición (IRI)



Fuente: proporcionado por la empresa SIVA.

