

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**“ESTUDIO DEL INDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL
EN VÍAS PAVIMENTADAS MEDIANTE EL USO DEL
PERFILÓMETRO LÁSER ROMDAS”**

Tesis para obtener el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

LEONARDO RAMOS PÉREZ

ASESOR: ING. NOELIA VALDERRAMA CRUZ DE MOUGENOT

Lima, marzo del 2018



Agradezco y dedico este trabajo a mis padres, por apoyarme y preocuparse a todo momento. Todo lo que soy se lo debo a ustedes.

A la Ing. Noelia Valderrama, por la asesoría y el gran apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

Al Ing. Roger Coaquira, reconocimiento especial por el gran aporte que hace posible el desarrollo del presente trabajo.

A mi hermana Milagros y mi primo Juan, por ser ejemplos a seguir.

A Claudia, por creer en mí y ser la compañera para luchar las adversidades.

RESUMEN

El desarrollo de un país es medido mediante indicadores económicos. Sin embargo, se considera que no se puede hablar de desarrollo sin vías de comunicación que permitan la conexión de todo el país; y vías de comunicación no es otra cosa que carreteras en buen estado que permitan un adecuado flujo vehicular.

Las vías de comunicación representan la capacidad de un estado de generar movimiento no solo industrial o comercial, sino público. Si bien la mayoría de carreteras en el departamento de Lima se encuentran pavimentadas; muchas de estas no presentan un adecuado estado para el servicio público. Mientras que el estado de las carreteras empeora en provincias donde la mayoría son pavimentos afirmados, trochas y tratamientos superficiales.

Debido a esto es necesario un control, es decir, una adecuada gestión de carreteras, que no solo se enfoque en la construcción de las carreteras, sino que se diseñe en el crecimiento de las ciudades y en el mantenimiento del tiempo vida de las mismas.

Toda carretera tiene un tiempo de vida; sin embargo, la experiencia demuestra que a menudo, este periodo es menor del proyectado. Esto es porque no hay una adecuada gestión que realice un mantenimiento continuo de toda la infraestructura vial del territorio nacional. La calidad de las carreteras es un aspecto cuantificable expresado en el Índice internacional de regularidad (IRI) el cual refleja el nivel de servicio de las carreteras.

El uso de equipos para la medición del parámetro IRI ha sido diverso tanto en el tiempo como en diferentes partes del mundo. Sin embargo, en el contexto mundial, el uso de equipos clase 1 como los perfilómetros láser, según el Banco mundial, ha sido difundido y es el de mayor uso en países desarrollados, mientras que en países en vías de desarrollo y subdesarrollados, se encuentra en proceso de acoplamiento. Específicamente en América latina, países como Chile y Colombia son los pioneros en el uso de equipos dinámicos como los perfilómetros láser para la medición del parámetro IRI.

El desarrollo de tecnologías que permitan un eficiente control de calidad en carreteras muestra un buen manejo político debido a la adecuada administración de las carreteras por parte del Ministerio de Transportes del Perú; por otro lado, un buen estado de carreteras significa mejoras sociales reflejadas en el desarrollo de

peruanos que necesitan no solo cantidad sino calidad en la infraestructura vial del territorio nacional.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

Título : Estudio del Índice de regularidad internacional en vías pavimentadas mediante el uso del perfilómetro láser ROMDAS

Área : Geotecnia

Asesor : Ing. Noelia Victoria Valderrama Cruz

Alumno : LEONARDO RAMOS PEREZ

Código : 2011.0973.412

Tema N° : # 61

Fecha : Lima 14 de noviembre de 2017



RESUMEN

El desarrollo de un país se ve reflejado no solo en el crecimiento económico, sino en la capacidad de un estado en generar movimiento comercial, industrial y público a través de creación de nuevas vías de comunicación. Sin embargo, el enfoque no debe realizarse solamente en la construcción de carreteras, sino en el crecimiento de las ciudades y en el mantenimiento durante el tiempo de vida de las mismas.

La infraestructura vial requiere de un mantenimiento rutinario y periódico que permita una condición funcional y estructural del pavimento, además de mantenerlo seguro y adecuado para el flujo vehicular. Uno de los parámetros más representativos de evaluación de los pavimentos es el Índice de regularidad internacional (IRI), el cual mide la rugosidad y el nivel de confort que brindan.

En el presente proyecto de investigación se evaluó la condición actual del pavimento usando indicador IRI mediante el equipo dinámico perfilómetro láser en el tramo Serpentin-Pasamayo desde el km 4+00 (Peaje) hasta el km 22+250 (Óvalo Chacra y Mar). Además, se realizó una encuesta de confortabilidad a los conductores para identificar la percepción que tienen los usuarios del estado situacional del pavimento. Finalmente se comparó los resultados del perfilómetro láser con las encuestas esperando encontrar una similitud en el nivel de confort brindado por la carretera.

OBJETIVOS

Objetivo general

El objetivo general es determinar los valores de IRI (Índice de regularidad internacional) mediante el uso del perfilómetro láser ROMDAS para la mejor gestión del mantenimiento y conservación vial.

Objetivos específicos

- Determinar el nivel de servicio del tramo Serpentin-Pasamayo de la Concesión vial N°5 en la panamericana norte; así como la confortabilidad del usuario en estos pavimentos.
 - Determinar el cumplimiento de las vías inspeccionadas con los estándares de la norma peruana vigente y normas internacionales.
 - Comparación de los resultados del perfilómetro láser con las encuestas en el tramo de medición.
- 

JUSTIFICACIÓN E HIPÓTESIS

El desarrollo de evaluaciones de un pavimento se realizan de manera tradicional en nuestro país, los equipos y metodologías usados son convencionales y de un rendimiento muy bajo, lo cual genera un deficiente control y gestión de la infraestructura vial. El presente proyecto de tesis comprende el uso del equipo dinámico y de alto rendimiento perfilómetro láser ROMDAS como una mejor alternativa para la medición del estado de las vías y así mejorar la gestión del mantenimiento vial.

METODOLOGÍA

La evaluación se realizó en el tramo Serpentin-Pasamayo perteneciente a la concesión de la Red Vial N°5 Ancón-Huacho-Pativilca en la Panamericana Norte. La elección de la carretera se dio debido a los siguientes parámetros:

- Clasificación de la norma E.010. Pavimentos urbanos
- Estado actual de la carretera
- Disponibilidad de operación

La presente investigación se desarrollará en dos etapas que permitan analizar la condición funcional del pavimento de manera objetiva y subjetiva; siendo la medición de IRI en campo y la encuesta de confortabilidad a usuarios, respectivamente:

Medición de IRI en campo

Se registraron los valores de IRI mediante el equipo dinámico perfilómetro láser, los valores de posicionamiento lineal (progresivas) mediante el odómetro de alta resolución, valores de posicionamiento espacial (coordenadas UTM), registro videográfico mediante videocámaras panorámicas y el software de recolección de datos ROMDAS.

Encuestas de confortabilidad

Se realizaron encuestas en dos puntos clave para ubicar la mayor cantidad de usuarios-conductores: Peaje El Serpentin (punto de inicio) y el Óvalo Chacra y Mar (punto de fin). El modelo de encuesta asumido fue basado en el sistema de clasificación propuesto por el Banco mundial para la determinación del Ratio de serviciabilidad presente (PSR).

Relevamiento y procesamiento de información

Se procesó la información de datos y realizó un análisis estadístico que permita ajustar el estado situacional de la carretera a un valor promedio móvil o característico.

Conclusiones y recomendaciones

Se presentará las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas de este estudio.

NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.



Godofredo
Zavala



INDICE

1. CAPÍTULO 1. Planteamiento del problema	1
1.1. Objetivo general	1
1.2. Objetivos específicos	1
1.3. Hipótesis del proyecto	1
1.4. Alcance y limitaciones del proyecto	1
2. CAPÍTULO 2. Revisión de la literatura	2
2.1. Antecedentes	2
2.2. Control de calidad de carreteras	3
2.2.1. Nivel de servicio de carreteras	3
2.2.2. Índice de serviciabilidad presente (PSI)	4
2.3. IRI como indicador del nivel de servicio de las carreteras	8
2.3.1. Definición	8
2.3.2. Modelo del cuarto coche	10
2.3.3. Métodos de medición de IRI	12
2.3.4. Resumen de métodos medición de IRI	15
2.4. Norma peruana – MTC Manual de inventarios viales 2014	16
2.5. Normas Internacionales:	17
2.5.1. Norma española	17
2.5.2. Norma chilena	18
2.6. Concesiones y contratos en el Perú	19
3. CAPÍTULO 3. Procedimiento de operación en campo	21
3.1. Metodología de trabajo	21
3.1.1. Tipo de estudio	21
3.1.2. Localización de las mediciones	21
3.1.3. Población y muestra	22
3.2. Medición de IRI en campo	23
3.2.1. Descripción de equipos	23
3.2.2. Instalación	29
3.2.3. Calibración/ Validación de equipos	31
3.2.4. Procedimiento de medición	31
3.3. Encuestas de confortabilidad	32
3.4. Relevamiento de información en gabinete	33
3.4.1. Procesamiento de información	33
3.4.2. Análisis de datos /singularidades	34
3.4.3. Presentación de resultados	34
4. CAPITULO 4. Resultados	35

4.1. Resultados de IRI en el tramo Serpentín Pasamayo - Sentido Sur - Norte:35	
4.1.1. Sector A: km 4+500 – km 10+000	36
4.1.2. Sector B: km 10+000 – km 16+000	38
4.1.3. Sector C: km 16+000 – km 22+250.....	40
4.2. Resultados de IRI en el tramo Serpentín Pasamayo - Sentido Norte - Sur: 43	
4.2.1. Sector A: km 4+500 – km 10+000	44
4.2.2. Sector B: km 10+000 – km 16+000	46
4.2.3. Sector C: km 16+000 – km 22+250.....	48
4.3. Análisis estadístico:.....52	
4.3.1. Tramo Serpentín Pasamayo – Sentido sur-norte:.....	52
4.3.2. Tramo Serpentín Pasamayo – Sentido norte-sur:.....	57
4.4. Resultados de las encuestas de confortabilidad64	
5. CAPITULO 5. Conclusiones y observaciones66	
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS69	
7. ANEXO A. Valores de IRI en el tramo Serpentín Pasamayo Km 4+500 – 22+250 – Sentido sur-norte.	
8. ANEXO B. Valores de IRI en el tramo Serpentín Pasamayo Km 4+500 – 22+250- Sentido norte-sur	
9. ANEXO C. Manual propuesto para el uso del software ROMDAS	

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 2.1. FORMULARIO DE CALIFICACIÓN DE CONDICIONES DE SERVICIO DE UN PAVIMENTO, PSR. (SÁNCHEZ, 2014)	5
FIGURA 2.2. CALIFICACIÓN DEL PSI PARA PAVIMENTOS HIDRÁULICOS SEGÚN CLASIFICACIÓN AASHTO 1993 (INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, 2009)	6
FIGURA 2.3. CURVA DE DETERIORO DEL PAVIMENTO (CRESPO DEL RÍO, 1999).....	7
FIGURA 2.4. ESCALA DE VALORES DE IRI Y LAS CARACTERÍSTICAS DEL PAVIMENTO (SAYERS, GILLESPIE, & QUEIROZ, 1986)	9
FIGURA 2.5. MODELO MATEMÁTICO DEL CUARTO COCHE (VARGAS, 2009)	10
FIGURA 2.6. NIVEL Y MIRA PARA MEDICIÓN DE IRI (NAVA, 2007).....	13
FIGURA 2.7. PERFILÓMETRO INERCIAL APL (SÁNCHEZ & DE SOLMINIHAC, 1989)	14
FIGURA 2.8. EQUIPO MAYS METER (STEVENSON, 2015).....	14
FIGURA 2.9. EVALUACIÓN SUBJETIVA DEL PAVIMENTO (ACTIVA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN, 2015)	15
FIGURA 2.10. ENFOQUE ACTUAL DEL SISTEMA DE CONCESIONES VIALES A NIVEL NACIONAL DESDE PROVIAS NACIONAL. (OBANDO, 2010)	19
FIGURA 2.11. PARÁMETROS DE CONDICIÓN Y SERVICIABILIDAD EXIGIBLES EN CONCESIONES VIALES. (OSITRAN-NORVIAL, 2015).....	20
FIGURA 3.1. TRAMO SERPENTÍN-PASAMAYO RED VIAL N°5 ANCÓN-HUACHO-PATIVILCA (GOOGLE EARTH, 2016)	21
FIGURA 3.2. TRAMO SERPENTÍN-PASAMAYO RED VIAL N°5 ANCÓN-HUACHO-PATIVILCA (OSITRAN, 2006).....	22
FIGURA 3.3. PERFILÓMETRO LÁSER (ACTIVA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN, 2015)	24
FIGURA 3.4. FUNCIONAMIENTO UNIDAD LÁSER (ROMDAS, 2015).....	24
FIGURA 3.5. PERFIL LONGITUDINAL OBTENIDO DE LA UNIDAD LÁSER Y EL ACELERÓMETRO (KOHLEER, 2016).....	25

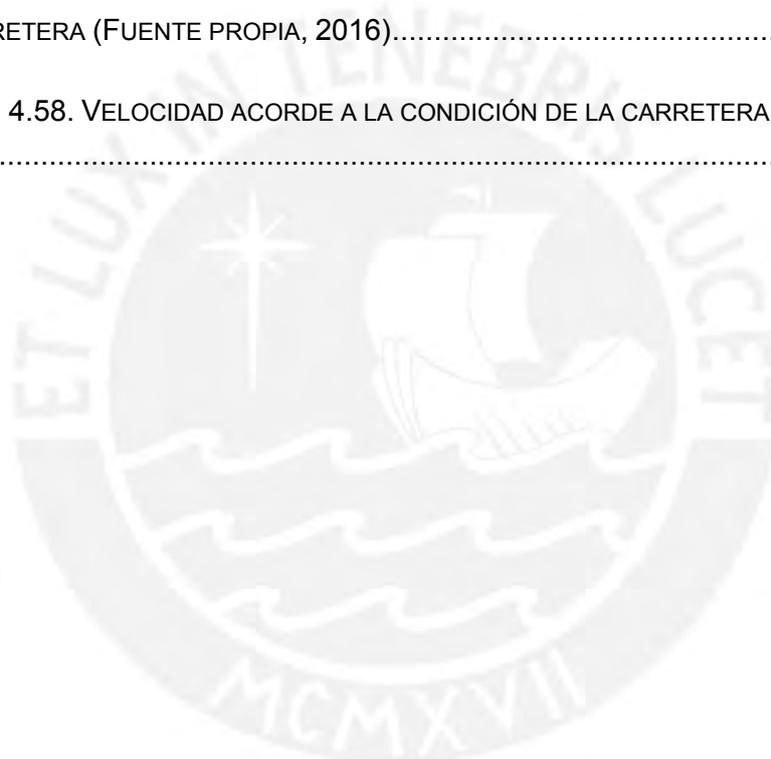
FIGURA 3.6. EXIGENCIAS PARA EL PERFILÓMETRO LÁSER (MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES, 2014)	27
FIGURA 3.7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL FABRICANTE (ROMDAS, 2015).....	27
FIGURA 3.8. ODÓMETRO ACOPLADO AL NEUMÁTICO TRASERO IZQUIERDO DEL VEHÍCULO. (ACTIVA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN, 2015)	28
FIGURA 3.9. SISTEMA COMPUTARIZADO EN LA PARTE INTERIOR DE UN VEHÍCULO (MERTZ, 2015)	29
FIGURA 3.10. PERFILÓMETRO LÁSER (ACTIVA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN, 2015) ...	30
FIGURA 3.11. ESTACIÓN DE PEAJE SERPENTÍN-ANCÓN (FUENTE PROPIA, 2016).....	32
FIGURA 3.12. MODELO DE ENCUESTA DE CONFORTABILIDAD (FUENTE PROPIA, 2016)..	33
FIGURA 4.1. IRI HUELLA IZQUIERDA @ 100 METROS KM 4+500 – KM 10+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	36
FIGURA 4.2. IRI HUELLA DERECHA @ 100 METROS KM 4+500 – KM 10+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	36
FIGURA 4.3. IRI PROMEDIO @ 100 METROS KM 4+500 – KM 10+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	37
FIGURA 4.4. IRI MEDIA MÓVIL @ 100 METROS KM 4+500 – KM 10+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	37
FIGURA 4.5. IRI HUELLA IZQUIERDA @ 100 METROS KM 10+000 – KM 16+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	38
FIGURA 4.6. IRI HUELLA DERECHA @ 100 METROS KM 10+000 – KM 16+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	38
FIGURA 4.7. IRI PROMEDIO @ 100 METROS KM 10+000 – KM 16+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	39
FIGURA 4.8. IRI MEDIA MÓVIL @ 100 METROS KM 10+000 – KM 16+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	39
FIGURA 4.9. IRI HUELLA IZQUIERDA @ 100 METROS KM 16+000 – KM 22+250 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	40

FIGURA 4.10. IRI HUELLA DERECHA @ 100 METROS KM 16+000 – KM 22+250 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	40
FIGURA 4.11. IRI PROMEDIO @ 100 METROS KM 16+000 – KM 22+250 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	41
FIGURA 4.12. IRI MEDIA MÓVIL @ 100 METROS KM 16+000 – KM 22+250 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	41
FIGURA 4.13. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL IRI DE LA HUELLA IZQUIERDA, DERECHA, PROMEDIO Y MEDIA MÓVIL @100 METROS KM 4+500 – KM 10+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	42
FIGURA 4.14. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL IRI DE LA HUELLA IZQUIERDA, DERECHA, PROMEDIO Y MEDIA MÓVIL @100 METROS KM 10+000 – KM 16+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	42
FIGURA 4.15. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL IRI DE LA HUELLA IZQUIERDA, DERECHA, PROMEDIO Y MEDIA MÓVIL @100 METROS KM 16+000 – KM 22+250 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	43
FIGURA 4.16. IRI HUELLA IZQUIERDA @ 100 METROS KM 4+500 – KM 10+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	44
FIGURA 4.17. IRI HUELLA DERECHA @ 100 METROS KM 4+500 – KM 10+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	44
FIGURA 4.18. PROMEDIO @ 100 METROS KM 4+500 – KM 10+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	45
FIGURA 4.19. IRI MEDIA MÓVIL @ 100 METROS KM 4+500 – KM 10+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	45
FIGURA 4.20. IRI HUELLA IZQUIERDA @ 100 METROS KM 10+ 000 – KM 16+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	46
FIGURA 4.21. IRI HUELLA DERECHA @ 100 METROS KM 10+ 000 – KM 16+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	46
FIGURA 4.22. IRI PROMEDIO @ 100 METROS KM 10+ 000 – KM 16+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	47
FIGURA 4.23. IRI MEDIA MÓVIL @ 100 METROS KM 10+ 000 – KM 16+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	47

FIGURA 4.24. IRI HUELLA IZQUIERDA @ 100 METROS KM 16+000 – KM 22+250 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	48
FIGURA 4.25. IRI HUELLA DERECHA @ 100 METROS KM 16+000 – KM 22+250 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	48
FIGURA 4.26. IRI PROMEDIO @ 100 METROS KM 16+000 – KM 22+250 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	49
FIGURA 4.27. MEDIA MÓVIL @ 100 METROS KM 16+000 – KM 22+250 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	49
FIGURA 4.28. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL IRI DE LA HUELLA IZQUIERDA, DERECHA, PROMEDIO Y MEDIA MÓVIL @100 METROS KM 4+500 – KM 10+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	50
FIGURA 4.29. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL IRI DE LA HUELLA IZQUIERDA, DERECHA, PROMEDIO Y MEDIA MÓVIL @100 METROS KM 10+000 – KM 16+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	50
FIGURA 4.30. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL IRI DE LA HUELLA IZQUIERDA, DERECHA, PROMEDIO Y MEDIA MÓVIL @100 METROS KM 16+000– KM 22+250 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	51
FIGURA 4.31. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI HUELLA IZQUIERDA KM 4+500 - KM 10+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	52
FIGURA 4.32. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI HUELLA DERECHA KM 4+500 - KM 10+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	52
FIGURA 4.33. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI PROMEDIO KM 4+500 - KM 10+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	53
FIGURA 4.34. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI MEDIA MÓVIL KM 4+500 - KM 10+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	53
FIGURA 4.35. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI HUELLA IZQUIERDA KM 10+000 - KM 16+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	54
FIGURA 4.36. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI HUELLA DERECHA KM 10+000 - KM 16+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	54
FIGURA 4.37. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI PROMEDIO KM 10+000 - KM 16+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	54

FIGURA 4.38. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI MEDIA MÓVIL KM 10+000 - KM 16+000 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA).....	54
FIGURA 4.39. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI HUELLA IZQUIERDA KM 16+000 - KM 22+250 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA).....	55
FIGURA 4.40. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI HUELLA DERECHA KM 16+000 - KM 22+250 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA).....	55
FIGURA 4.41. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI MEDIA MÓVIL KM 16+000 - KM 22+250 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA).....	56
FIGURA 4.42. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI PROMEDIO KM 16+000 - KM 22+250 SUR-NORTE (FUENTE PROPIA).....	56
FIGURA 4.43. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI HUELLA IZQUIERDA KM 4+500 - KM 10+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA).....	57
FIGURA 4.44. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI HUELLA DERECHA KM 4+500 - KM 10+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA).....	57
FIGURA 4.45. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI MEDIA MÓVIL KM 4+500 - KM 10+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA).....	58
FIGURA 4.46. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI PROMEDIO KM 4+500 - KM 10+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA).....	58
FIGURA 4.47. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI HUELLA IZQUIERDA KM 10+000 - KM 16+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA).....	59
FIGURA 4.48. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI HUELLA DERECHA KM 10+000 - KM 16+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA).....	59
FIGURA 4.49. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI PROMEDIO KM 10+000 - KM 16+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA).....	59
FIGURA 4.50. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI PROMEDIO KM 10+000 - KM 16+000 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA).....	59
FIGURA 4.51. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI HUELLA IZQUIERDA KM 16+000 - KM 22+250 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA).....	61
FIGURA 4.52. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI HUELLA DERECHA KM 16+000 - KM 22+250 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA).....	61

FIGURA 4.53. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI PROMEDIO KM 16+000 - KM 22+250 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA).....	61
FIGURA 4.54. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS IRI MEDIA MÓVIL KM 16+000 - KM 22+250 NORTE-SUR (FUENTE PROPIA).....	61
FIGURA 4.55. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS RELATIVAS EN EL TRAMO SERPENTÍN PASAMAYO KM 4+500 – KM 22+250, CON SENTIDO NORTE-SUR (FUENTE PROPIA)	63
FIGURA 4.56. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS RELATIVAS EN EL TRAMO SERPENTÍN PASAMAYO KM 4+500 – KM 22+250, CON SENTIDO SUR-NORTE (FUENTE PROPIA)	63
FIGURA 4.57. GRÁFICO DE LA PERCEPCIÓN DEL USUARIO RESPECTO A LA CONDICIÓN DE LA CARRETERA (FUENTE PROPIA, 2016).....	64
FIGURA 4.58. VELOCIDAD ACORDE A LA CONDICIÓN DE LA CARRETERA (FUENTE PROPIA, 2016).....	65



LISTADO DE TABLAS

TABLA 2.1. FUNCIONES Y CARACTERÍSTICAS DEL PAVIMENTO POR TIPO DE EVALUACIÓN (CRESPO DEL RÍO, 1999).....	4
TABLA 2.2. MÉTODOS DE MEDICIÓN SEGÚN EL BANCO MUNDIAL	15
TABLA 2.3. ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL EN LA NORMATIVA ESPAÑOL (MINISTERIO DE FOMENTO, 2014)	17
TABLA 3.1. DISTANCIA DE MUESTREO DEL PERFIL LONGITUDINAL (NORMA INTERNACIONAL ASTM E950/950M-09, 2009).....	26
TABLA 3.2. RESOLUCIÓN DE LA MEDICIÓN VERTICAL (NORMA INTERNACIONAL ASTM E950/950M-09, 2009)	26
TABLA 4.1. SECTOR A – SUR-NORTE: KM 4+500 – KM 10+000.....	53
TABLA 4.2. SECTOR B – SUR-NORTE: KM 10+000 – KM 16+000.....	55
TABLA 4.3. SECTOR C – SUR-NORTE: KM 16+000 – KM 22+250.....	56
TABLA 4.4. SECTOR A – NORTE-SUR: KM 4+500– KM 10+000.....	58
TABLA 4.5. SECTOR B – NORTE-SUR: KM 10+000 – KM 16+000.....	60
TABLA 4.6. SECTOR C – NORTE-SUR: KM 16+000 – KM 22+250.....	62

LISTADO DE ECUACIONES

$PSI = 5,03 - 1,91 \log(1 + SV) - 1,38(RD)^2 - 0,01(C + P)^{0.5}$ [ECUACIÓN 2.1].....	7
$RSI = z'1 - z'2 $ [ECUACIÓN 2.2].....	11
$IRI = 1 = 1NRSI/N$ [ECUACIÓN 2.3].....	11
$\{Z\}_i = [ST]\{Z\}_i - 1 + Y_i \{PR\}$ [ECUACIÓN 2.4]	11
$z'L = z'2 = (Y_A - Y_1)/11$ [ECUACIÓN 2.5].....	12
$z''L = z''2 = 0$ [ECUACIÓN 2.6]	12



CAPÍTULO 1. Planteamiento del problema

1.1. Objetivo general

El objetivo general es determinar los valores de IRI (Índice de regularidad internacional) mediante el uso del perfilómetro láser ROMDAS para la mejor gestión del mantenimiento y conservación vial.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar el nivel de servicio del tramo Serpentín-Pasamayo de la Concesión vial N°5 en la panamericana norte; así como el confort brindado por el pavimento a los usuarios.
- Determinar el cumplimiento de las vías inspeccionadas con los estándares de las normas vigentes y términos de referencia de la concesión.
- Comparar los resultados del perfilómetro láser con las encuestas en el tramo de medición.

1.3. Hipótesis del proyecto

- Existe una relación directa entre la escala de IRI de los pavimentos y la confortabilidad del usuario en los mismos.
- El uso del perfilómetro láser ROMDAS será de beneficio para el desarrollo de la gestión del mantenimiento vial.

1.4. Alcance y limitaciones del proyecto

El presente proyecto de tesis comprende el uso del equipo perfilómetro láser ROMDAS como una mejor alternativa para el desarrollo de la gestión del mantenimiento vial. Se desarrollarán los procesos y metodologías de medición bajo la norma internacional para la medición de IRI en vías urbanas y carreteras nacionales. Los resultados se analizarán según las normas peruanas y similares vigentes.

El análisis por medio de equipos de alta precisión como es el perfilómetro láser, se restringe únicamente a vías pavimentadas mas no vías de alta rugosidad.

CAPÍTULO 2. Revisión de la literatura

2.1. Antecedentes

En la década de los setentas, el Banco mundial empieza a financiar proyectos para el desarrollo de los países mediante la mejora de la construcción y mantenimiento de las carreteras. Sin embargo, tanto los parámetros como equipos para la medición de la regularidad superficial eran diferentes para varios países incluso dentro de los mismos, haciendo imposible una comparación real de la regularidad. El principal motivo de la inconsistencia en la medición de datos se debía a la variabilidad de la dinámica de los motores de los vehículos. (Gillespie, 1992)

Con la finalidad de estandarizar parámetros de medición, en el año 1982, se realizó en Brasil el proyecto “International road roughness experiment” (IRRE), donde técnicos e investigadores establecieron un único parámetro de medición de la regularidad superficial. El proyecto IRRE fue fundado por varias agencias como el Instituto brasileño de pesquisas rodoviárias (IPR), el Banco mundial (IBRD), el Laboratorio británico de investigación de transportes y caminos (TRRL), el Laboratorio francés de puentes y pavimentos (LCPC). (Vargas, 2009)

Así, por medio del proyecto IRRE se definió como único valor el “Índice de regularidad internacional” (IRI), el cual se basa en la simulación tipo respuesta de un vehículo viajando a una velocidad de 80 km/h y se representa por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas, el cual expresa la razón entre el movimiento acumulado de la suspensión del vehículo y la distancia recorrida. (Sayers, Gillespie, & Queiroz, International road roughness experiment: Establishing correlation and a calibration standard for measurement, 1986)

Según el mismo autor, en el 1990, el TRRL desarrolla el equipo MERLIN (acrónimo del término inglés “Machine evaluating roughness using low-cost instrument”) con la finalidad de disponer un equipo económico que permita su uso extensivo para la medición de IRI en pavimentos. Sin embargo, a pesar de la alta precisión el equipo resultaba ser de bajo rendimiento. El uso del equipo MERLIN alcanzó gran difusión en países latinoamericanos por la sencillez, exactitud y economía de las mediciones; y principalmente debido a que las mediciones de regularidad en países latinoamericanos no eran continuas y no requerían equipos dinámicos de mayor coste.

Dentro del marco peruano, se incorpora el equipo MERLIN en el año 1993. Desde este punto, el desarrollo peruano en la medición de IRI inicia un largo recorrido por afianzar y adaptar la metodología del equipo MERLIN presentado por el TRRL a una metodología propia. El equipo MERLIN pertenece a la clase 3 de equipos para la medición de IRI; sin embargo, ha sido el equipo de mayor uso en el Perú durante finales del último siglo. Este es un equipo de alta precisión y bajo coste mas no de alto rendimiento. Tras haber adoptado una metodología propia y el avance en el desarrollo de la medición de más de 3000 km de carreteras nacionales, se hizo notoria la necesidad de equipos de mayor rendimiento. (Del Águila Rodríguez, 1999)

Con la necesidad de un mayor rendimiento en las mediciones de IRI, en los siguientes años se el Ministerio de Transportes adquiere un equipo tipo respuesta Bump Integrator. Este es un equipo clase 3 al igual que el Merlín; sin embargo, de mayor rendimiento. El problema recayó en la complicidad en mantener las condiciones del vehículo para asegurar la consistencia de la información recolectada. Debido a esto, durante los siguientes años se retoma a la metodología clásica por medio del uso del equipo MERLIN.

Actualmente, las solicitudes contractuales exigen el uso de perfilómetros láser mas no hay un uso intensificado de estos equipos de alta precisión, alto coste y alto rendimiento. Y más aún, no hay una posible supervisión por parte de entidades nacionales a empresas extranjeras que ya cuentan con un mercado desarrollo en el uso de perfilómetros.

2.2. Control de calidad de carreteras

Al igual que cualquier obra civil, las carreteras tienen un periodo vida útil, en el cual necesitan de una supervisión y control del estado en el que se encuentran. Este estado o calidad de un pavimento a través del tiempo se define por medio del nivel de servicio de una carretera; así el indicador que permite cuantificar de manera objetiva y subjetiva un pavimento es el Índice de serviciabilidad presente (PSI).

2.2.1. Nivel de servicio de carreteras

La calificación de un pavimento viene a ser dada por el nivel de servicio de las mismas. Es un indicador de la calidad de una carretera, que, si bien en cierto modo tiene cierto grado de subjetividad, debe ser minimizado con mediciones objetivas. Es

decir, el nivel de servicio debe reflejar la percepción del usuario sobre la carretera de manera objetiva. (Obando, 2010)

La calificación de un pavimento se mide por medio de la serviciabilidad o nivel de servicio que prestan durante el periodo de vida útil. El comportamiento de una carretera puede ser estimado desde dos aspectos: Estructural y funcional. El comportamiento estructural es la capacidad del pavimento para soportar las cargas estructurales que provienen del movimiento vehicular y resistir los efectos del medio ambiente. Por otro lado, el comportamiento funcional es interpretado por los usuarios como la percepción de la calidad de la superficie de la capa de rodadura. El comportamiento funcional comprende las características principales que afectan la seguridad, el confort y costes de los usuarios; siendo la regularidad superficial, textura y resistencia al deslizamiento las que definen el aspecto funcional. En la Tabla 2.1 se observa la evaluación funcional y sus respectivos indicadores. (Crespo del Río, 1999)

Tabla 2.1. Funciones y características del pavimento por tipo de evaluación (Crespo del Río, 1999)

Tipo de evaluación	Función del pavimento	Característica del pavimento	Indicador
Condición funcional	Serviciabilidad	Regularidad superficial	IRI
	Seguridad	Textura	Macrotextura
			Microtextura
		Resistencia al deslizamiento o fricción	Coefficiente de resistencia al deslizamiento

Se percibe que, en la función de seguridad del pavimento, los indicadores son la textura y la resistencia al deslizamiento o también denominado fricción. Sin embargo, la textura (principalmente la macrotextura), al igual que la regularidad superficial también brinda el nivel de servicio de confortabilidad y serviciabilidad al usuario. (Fundación CIDAUT Y Universidad politécnica de Catalunya, 2012)

2.2.2. Índice de serviciabilidad presente (PSI)

En los años sesenta, se desarrolló, el AASHO (American Association of State Highway Officials) Road Test, una pista de ensayo cuyos objetivos principales fueron: Establecer relaciones significativas entre los números de repeticiones de cargas por eje específicas de diferente disposición y magnitud y evaluar el comportamiento de diferentes estructuras de pavimentos asfálticos y rígidos, construidas sobre una subrasante de características uniformes. Antes del ensayo AASHO, no existía una definición universalmente aceptada de lo que se debía considerar como la calificación de un pavimento en condiciones de servicio. Dos ingenieros norteamericanos, Paul Irick y Bill Carey, idearon el término “Índice de servicio presente” (PSI por su sigla en inglés) y establecieron que la falla del pavimento correspondía al estado que éste presentaba en el instante en que sus condiciones daban lugar a un valor numérico del PSI considerado como inaceptable por los usuarios de la vía. Este concepto se basó en la suposición de que los usuarios le otorgaban mayor importancia a la calidad del rodamiento que prestaba el pavimento, que al tipo y a la magnitud de sus grietas y otros deterioros funcionales y estructurales. (Sánchez, 2014)

Sin embargo, para la calificar la calidad del servicio prestado por un pavimento se desarrolló un panel de encuestas de modo que los usuarios, según su criterio, opinaran sobre las condiciones de servicio del pavimento. En la figura 2.1 se puede observar el panel de encuestas o formulario realizado para obtener las opiniones de los usuarios.

Acceptable?

Yes

No

Undecided

5 — Very Good

4 — Good

3 — Fair

2 — Poor

1 — Very Poor

0 — Very Poor

Section Identification _____ Rating _____

Rater _____ Date _____ Time _____ Vehicle _____

Figura 2.1. Formulario de calificación de condiciones de servicio de un pavimento, PSR. (Sánchez, 2014)

En la figura 2.1, se puede observar que el formulario de opiniones de usuarios consta de una escala de 0 a 5 calificando desde muy pobre (pésimo estado) a muy buena (excelente estado).

La calificación y la opinión promedio de cada panel sobre cada una de las secciones fueron empleadas para definir un parámetro representativo de la condición de servicio de su pavimento en el instante de la evaluación, el cual recibió el nombre de

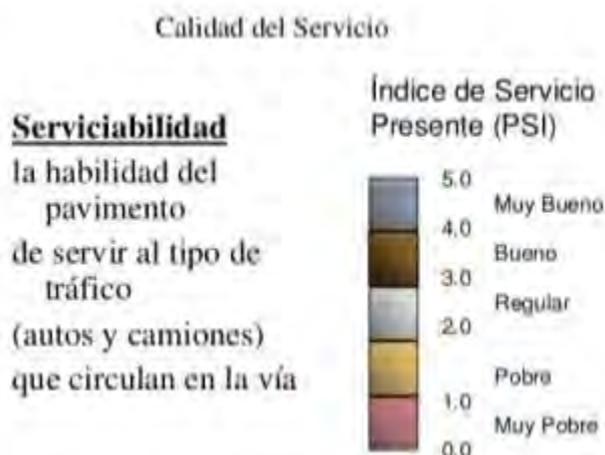


Figura 2.2. Calificación del PSI para pavimentos hidráulicos según clasificación AASHTO 1993 (*Instituto mexicano del Cemento y del Concreto, 2009*)

“Ratio de serviciabilidad presente” (PSR). Si bien el PSR es una calificación de las carreteras, se basa en la opinión de los usuarios, es decir, un valor subjetivo mas no objetivo. A partir de estos resultados, se realizaron mediciones objetivas tales como irregularidades del perfil longitudinal y transversal, ahuellamientos, magnitudes de grietas y fisuras. A partir de esta información se obtuvo un valor más “real” de la condición de la carretera, creándose así el Índice de serviciabilidad presente (PSI, por sus siglas en inglés). La escala de valores en los que fluctúa el valor de PSI se muestra en la figura 2.2. (Sánchez, 2014)

Como se observa en la figura 2.2, el PSI varía en una escala que se desarrolla entre 0 (pavimento con condición superficial muy pobre) y 5 (pavimento con condición superficial “perfecta”). Esta escala es muy similar a la propuesta en el formulario para la obtención del PSR; sin embargo, la diferencia radica en que el PSI es un valor objetivo obtenido por medio de mediciones y ecuaciones; mientras que el PSR es un valor subjetivo obtenido por medio de encuestas y formularios.

El PSI es un indicador de gran utilidad, ya que dentro de esquemas de gerencia de pavimentos permite la definición de prioridades y programas de mantenimiento a nivel nacional. Razón por la cual el mismo fue incorporado por la AASHTO en los

años ochenta en los procedimientos de diseño de nuevos pavimentos y de la rehabilitación de los mismos, mediante la incorporación de la variable ΔPSI con la cual es posible considerar la variación de la serviciabilidad de un pavimento desde el inicio de su vida de servicio hasta el nivel que el proyectista considera de falla (o inaceptable) dependiendo de la importancia de la vía. (Corros, Urbáez, & Corredor, 2009)

En la figura 2.3, se puede observar como el índice de nivel de servicio va decreciendo con ya sea el tiempo (periodo de vida útil) o de la misma manera con la cantidad de ejes equivalentes.

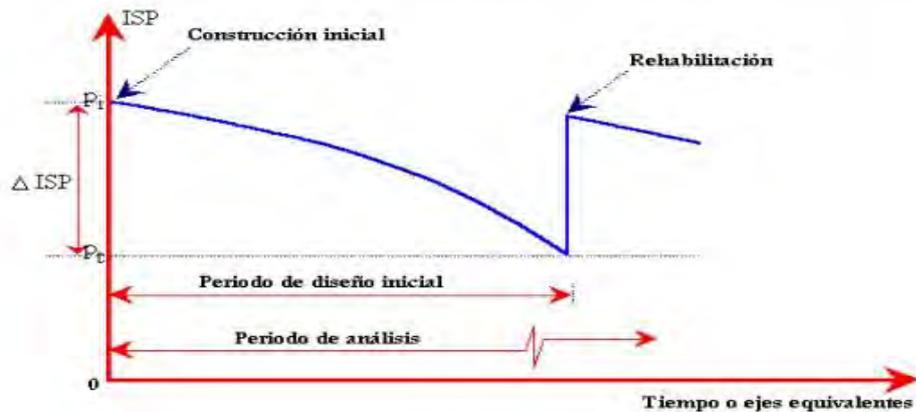


Figura 2.3. Curva de deterioro del pavimento (Crespo del Río, 1999)

Según el AASHO Road test, el cálculo del PSI de un pavimento flexible se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{PSI} = 5,03 - 1,91\text{Log}(1 + \text{SV}) - 1,38(\text{RD})^2 - 0,01(\text{C} + \text{P})^{0.5} \text{ [Ecuación 2.1]}$$

Donde:

SV: Varianza de la pendiente longitudinal, representada por la regularidad superficial

C: Superficie agrietada, representada por el área que contempla las fisuras y grietas presentes en el pavimento

P: Área bachada, representada por el área que incluye zonas específicas de hundimiento parcial en el pavimento

RD: Ahuellamiento, representado por la depresión a lo largo de la franja de recorrido de los neumáticos.

Según autores como Vargas, Crespo del Río, Townsend, entre otros; entre los parámetros mencionados, resalta por la repercusión directa la regularidad superficial. Matemáticamente, podemos observar que el factor SV, regularidad superficial, repercute en un mayor porcentaje en la ecuación del PSI. Adicionalmente, de manera subjetiva el usuario califica el estado del pavimento de manera directa, de modo que la regularidad es el primer factor que es notorio. Adicionalmente, es el factor que define principalmente el costo-beneficio de las carreteras.

2.3. IRI como indicador del nivel de servicio de las carreteras

2.3.1. Definición

La regularidad superficial se define normalmente por un índice que se refiere a una determinada longitud de carretera. Los índices se obtienen midiendo el perfil longitudinal y aplicando un modelo matemático de análisis para reducir el perfil a un índice estadístico.

En ingeniería de carreteras la calidad del pavimento se analiza determinando la regularidad superficial, característica del pavimento que analiza la diferencia entre las cotas teóricas y las cotas reales del perfil longitudinal. Las diferencias (o irregularidades) se deben a dos causas: El proceso constructivo y el uso de la carretera. En ocasiones son una combinación de ambas. Así, por ejemplo, los rellenos de la superficie de estructuras curvas o convexas suelen producir irregularidades por asentamientos de la parte más flexible (el relleno detrás del estribo) que aparecen con el uso, pero son debidas a un deficiente proceso constructivo. (Crespo del Río, 1999)

El término rugosidad es comúnmente usado en vez de regularidad guiándose únicamente de la traducción del término en inglés "Roughness". Sin embargo, la correcta definición es la de regularidad ya que se asocia mejor a la definición propuesta en la norma internacional ASTM 867-06 "Standard Terminology Relating to Vehicle Pavement Systems", la que define el concepto de "Roughness" 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, perfil transversal." (Vargas, 2009)

El IRI es el primer índice de perfil extensamente usado, en el cual el método de análisis está dirigido a trabajar con diferentes tipos de perfilómetros. Está definido como la propiedad del perfil real, y por lo tanto puede ser medido con cualquier perfilómetro válido. Las ecuaciones de análisis fueron desarrolladas y probadas para minimizar los efectos de los parámetros de medida de algunos perfilómetros como los intervalos de muestra. El Banco mundial ha publicado ejemplos de programas por computadora que han sido usados por fabricantes de perfilómetros para probar nuevos programas y algoritmos que calculen el IRI. (Pérez, 2005)

Los valores de IRI se expresan como la variación acumulada del movimiento por unidad de longitud, es decir en m/km (metros por kilómetro) o pulg/mi (pulgada por milla). Las unidades de IRI en m/km son comúnmente usadas en países de Latinoamérica y en el lado oeste de Europa; por otro lado, las unidades pulg/milla son usadas comúnmente por el estado americano y países al este de Europa; así como los países asiáticos. La figura 2.4 muestra los valores típicos de IRI para distintos tipos de estructuras de pavimento, según las experiencias del Banco Mundial en diversos países.

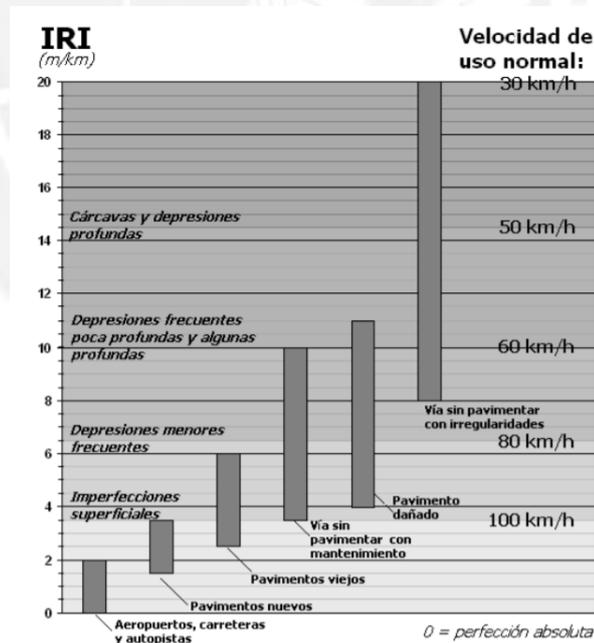


Figura 2.4. Escala de valores de IRI y las características del pavimento (Sayers, Gillespie, & Queiroz, 1986)

En la figura 2.4, se puede observar que el rango de la escala de IRI para un camino pavimentado es de 0 a 20 m/km, donde 0 es una superficie perfectamente uniforme y 20 un camino inestable. Es decir, a menor valor de IRI la superficie será más lisa, mientras que a un mayor valor de IRI la superficie más rugosa. Asimismo, valores de

IRI más bajos permitirán una velocidad mayor de circulación, mientras que valores de IRI más altos obstaculizarán el flujo de velocidad vehicular demandando un mayor coste. Los umbrales para determinar que tan rugosa o lisa pueda ser la superficie de un pavimento están demarcados por las normas nacionales propias de cada país. Para una superficie con pendiente constante sin deformaciones (plano inclinado perfecto), el IRI es igual a cero. Por lo que la pendiente, como tal, no influye en el valor de IRI, no así los cambios de pendiente. (Martínez & Tobón, 2012)

2.3.2. Modelo del cuarto coche

El modelo matemático para la medición del IRI se basa en el Modelo del Cuarto Coche o Carro. El modelo simula la cuarta parte de un auto “ideal” con ciertos parámetros fijados para la medición (Figura 2.5). El auto “ideal” consta de la masa suspendida (representado por la masa del vehículo, M_s), la masa no suspendida (representado por la masa de la rueda, M_r), el resorte primario (representado por la rueda, K_r), el resorte secundario (representado por la suspensión del vehículo, K_s) y el amortiguador (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

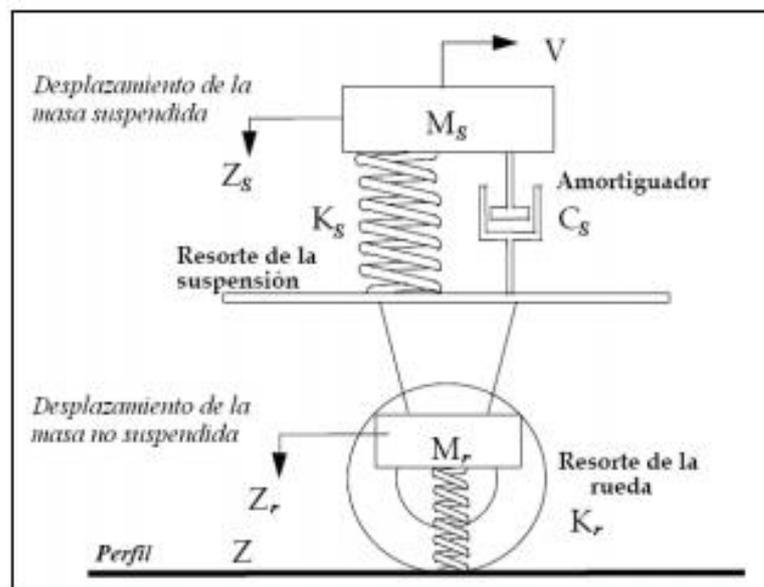


Figura 2.5. Modelo Matemático del Cuarto Coche (Vargas, 2009)

A partir de este punto los conceptos para la definición matemática del modelo del cuarto coche están basados en “El IRI: un indicador de la regularidad superficial” (Sánchez & De Solminihac, 1989)

El IRI en un punto de una carretera se define como la razón del movimiento relativo acumulado por la suspensión del vehículo tipo, dividido por la distancia recorrida por

dicho vehículo. El modelo matemático de vehículo que se utiliza es el representado en la Figura 2.5. Si se conoce el perfil longitudinal de la carretera, $y(x)$, y la velocidad a la que circula el automóvil, V , se puede calcular en cada punto el movimiento, z_1 y z_2 , de cada una de las masas, m_1 y m_2 , que componen el modelo.

A su vez se puede definir la respuesta del vehículo en términos de la pendiente rectificada, RS (Rectified Slope), en cada uno de los puntos en que se discretiza el perfil longitudinal.

$$RS_i = |z'_1 - z'_2|_i \quad [\text{Ecuación 2.2}]$$

Donde, z_1 y z_2 representan las pendientes de las masas del vehículo en las distintas posiciones, i , a lo largo del camino de la rueda.

Finalmente, el IRI se obtiene como la media aritmética de la pendiente rectificada a lo largo del camino recorrido. Por lo tanto,

$$IRI = \left[\sum_{i=1}^n RS_i \right] / n \quad [\text{Ecuación 2.3}]$$

Donde n es el número de puntos contabilizados.

Es notorio que la respuesta dinámica de un vehículo al circular por una carretera y por tanto el coeficiente IRI, dependen fuertemente de la velocidad de operación del vehículo. Para resolver esta ambigüedad, y después de sopesar las distintas alternativas, los participantes en el IRRE (International road roughness experiment) decidieron elegir 80 km/h como la velocidad de referencia para definir el IRI. Esta velocidad fue elegida por considerarse que los coeficientes IRI, que con ella se obtendrían, serían representativos de las sensaciones de seguridad y confort que experimentan los usuarios. Además se estimó que esta velocidad era adecuada para la medición con sistemas de tipo respuesta.

Para el cálculo del IRI es necesario conocer en cada punto de un tramo las pendientes z'_1 y z'_2 de las masas del vehículo tipo. Estas pendientes se obtienen de un modo recursivo, basándose en los valores obtenidos en el punto anterior. De esta forma si se conoce el movimiento del vehículo en un punto $i-1$, la respuesta en el punto siguiente puede calcularse por medio de la ecuación:

$$\{Z\}_i = [ST]\{Z\}_{i-1} + y'_i \{PR\} \quad [\text{Ecuación 2.4}]$$

Donde $\{Z\} = [z'2, z''2, z'1, z''1]^T$, con las primas representando derivadas espaciales, $y'j = (y_i - y_{i-1})/dx$, y representa la distancia entre muestras, es constante en cada intervalo, dx , y $[ST]$ y (PR) son matrices de 4×4 y 4×1 , respectivamente, cuyos coeficientes dependen del intervalo de muestra, dx .

El sistema de ecuaciones [3] puede resolverse para cualquier punto de la carretera, excepto para el primer punto del primer tramo en el que se desconocen los valores de $z'i, z'2, z''1$ y $z''2$ en el punto anterior.

Para inicializar el proceso de cálculo se adopta como valores iniciales del movimiento del vehículo los siguientes:

$$z'1 = z'2 = (y_a - y_1)/11 \quad [\text{Ecuación 2.5}]$$

$$z''1 = z''2 = 0 \quad [\text{Ecuación 2.6}]$$

Donde y_1 e y_a son las elevaciones del primer y a-ésimo puntos correspondientes a distancias de cero y 11 m., respectivamente. $z'1$ y $z'2$ representan, por lo tanto, la pendiente media del perfil de carretera en el primer tramo de 11 m. (0.5 seg a 80 km/h).

El procedimiento anterior para el cálculo del IRI es válido para intervalos entre medidas, dx , comprendidos entre 0.25 y 0.6 m. Para intervalos más pequeños se recomienda suavizar el perfil longitudinal, para así representar mejor la forma en que la rueda de un vehículo cubre el recorrido del tramo. Con este fin, o bien se halla el perfil equivalente cada 0.25 m. (olvidándose de puntos intermedios), o bien se obtiene una media corrida en cada punto con un intervalo de suavización de 0.25 m. En el primer caso, el cálculo del IRI se hace con intervalos de 0.25 m y en el segundo, con el intervalo original, pero con el perfil suavizado.

2.3.3. Métodos de medición de IRI

Para la medición del IRI, según el boletín técnico presentado por el Banco mundial en el año 1986, existen 4 métodos de medición:

Clase 1:

Son los más exactos para la medición del IRI. Los métodos de la clase 1 establecen la rugosidad a través de la determinación muy exacta del perfil longitudinal de un pavimento, con medidas espaciadas cada 0.25 m y cotas con una precisión de 0.5 mm para pavimentos lisos, pudiendo aumentar en pavimentos más rugosos. A esta clase pertenecen los métodos basados en la medición del perfil del pavimento con el perfilómetro modelo Viga TRRL y con mira y nivel de precisión (figura 2.6). Por su bajo rendimiento y excesiva exactitud, comparada con la incertidumbre de la trayectoria recorrida, no se aconseja como adecuados para grandes auscultaciones. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)



Figura 2.6. Nivel y mira para medición de IRI (Nava, 2007)

En la figura 2.6, se puede apreciar el uso del nivel y mira para mediciones de regularidad superficial. Es el método más conocido para la medición del perfil longitudinal. Consta de una mira de precisión graduada con unidades de elevación y un nivel topográfico para establecer el nivel horizontal. La especificación E1364 de la ASTM "Test method for measuring road roughness by static level method" presenta una guía para la medición el perfil de las vías con este equipo. El parámetro más importante para la toma de datos por este método es que la resolución del nivel cumpla con los requerimientos dados por la ASTM. En esta línea, sería posible determinar el IRI a partir de equipamiento tan sencillo como una mira y un nivel. El nivel establece la horizontal, y con la mira obtenemos los puntos del perfil longitudinal. (Vargas, 2009)

Clase 2:

Esta clase incluye todos los otros métodos en el que el perfil es medido directamente por un programa para la obtención de IRI, y no cumplen con la precisión y exactitud de la Clase 1. Entre los perfilómetros de alta velocidad se tienen, el APL Tráiler (figura 2.7) y GMRtype Inertial Profilometer. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)

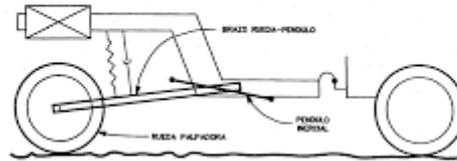


Figura 2.7. Perfilómetro inercial APL (Sánchez & De Solminihac, 1989)

En la figura 2.7, se observa el perfilómetro inercial APL el cual consiste en un remolque especial acoplado a un vehículo, que tiene una rueda tipo motocicleta, un chasis y un péndulo inercial de baja frecuencia que se considera como referencia fija.

Clase 3:

En esta clase están los métodos que recurren al uso de una ecuación de correlación para la estimación del IRI. Estos métodos, también denominados “tipo respuesta” (Response-type road roughness measuring system, o simplemente, RTRRMS), establecen la regularidad basados en la detección del movimiento relativo que



Figura 2.8. Equipo Mays meter (Stevenson, 2015)

experimenta el sistema de suspensión de un vehículo de pasajeros o de un tráiler remolcado, al transitar sobre el pavimento. Las propiedades dinámicas son únicas para cada equipo y varía con el tiempo. Los métodos Clase 3 emplean diversos tipos de equipos, tales como el Mays meter, (norteamericano- figura 2.8). (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)

El equipo Mays meter es un dispositivo de combinación eléctrica y mecánica con la capacidad de medir los movimientos verticales que experimenta el vehículo relativos al eje de suspensión.

Clase 4:

El IRI se obtiene a partir de una evaluación subjetiva (experiencia y evaluación visual) o mediciones no calibradas (figura 2.9). Aplica para casos en donde no se exija mucha exactitud en el resultado del IRI. (Gutiérrez & Arce, 2004)

La inspección visual, siempre ha sido un método de evaluación inmediata, dependiendo del operador y/o especialista la evaluación puede ser acertada. Sin embargo, para casos de mayor exigencia en la precisión se debe recurrir a las metodologías anteriores.



Figura 2.9. Evaluación subjetiva del pavimento (*Activa Ingeniería y Construcción, 2015*)

2.3.4. Resumen de métodos medición de IRI

Los equipos que permiten medir la regularidad superficial son muy variados. Según el Banco mundial, se clasifican en 4 clases o tipos. Los equipos varían según el nivel de precisión, siendo la clase 1 la más precisa; mientras que la clase 4 es la de menor precisión ya que es una evaluación visual. En la tabla 2.2, podemos observar los 4 métodos de precisión y sus equipos.

Tabla 2.2. Métodos de medición según el Banco mundial

Clase	Descripción	Equipos	Precisión
Clase 1	Son los más exactos, estableciendo la regularidad superficial a través de la determinación exacta del perfil longitudinal	Nivel y mira topográfica	Muy alta
		Perfilómetros láser	Alta

Clase 2	Incluyen todos los métodos medidos directamente del perfil longitudinal, sin cumplir el grado de precisión de la clase 1	Otros perfilómetros de menor precisión	Alta
Clase 3	Conocidos como RTRRMS, miden la respuesta (rebote) del vehículo a la regularidad del pavimento, siendo una medida relativa de la regularidad, por lo que necesitan de calibración	Mays meter	Medio
		Bump integrator	Medio
Clase 4	Evaluación realizada en campo cuando no se requiera de gran precisión	Evaluación visual	Bajo

2.4. Norma peruana – MTC Manual de inventarios viales 2014

Dentro de la norma peruana, se encuentra el Manual de inventarios viales. El cual nos indica en la “Parte III: Inventario vial calificado”, en el “Capítulo 1: Equipamiento y procedimiento de medición”, en el acápite, “1.2.4. Perfilómetro láser”, los principales componentes del equipo, así como las condiciones y requerimientos para la medición del IRI basado en la norma internacional ASTM 950.

Sin embargo, para los valores máximos y umbrales la norma peruana que rige el control y supervisión es la Norma E.010 Pavimentos urbanos. En el “Capítulo 3: técnicas de investigación de campo, ensayos de laboratorio, requisitos de los materiales y pruebas de control”, en el acápite, “3.5.4. En la carpeta asfáltica terminada” se detalla lo siguiente, con respecto a la regularidad superficial:

- En el caso de vías expresas y donde lo indique el Proyectista se medirá la Regularidad Superficial de la superficie de rodadura en unidades IRI. La rugosidad tendrá un valor máximo de 2.50 m/km. En el caso de no satisfacer este requerimiento, deberá revisarse los equipos y procedimientos de esparcido y compactación, a fin de tomar las medidas correctivas que conduzcan a un mejoramiento del acabado de la superficie de rodadura.
- Para la determinación de la rugosidad podrá utilizarse cinta métrica y nivel, rugosímetros, perfilómetros o cualquier otro método técnicamente aceptable y aprobado por la Supervisión

- La medición de la rugosidad sobre la superficie de rodadura terminada, deberá efectuarse en toda su longitud y debe involucrar ambas huellas vehiculares, registrando mediciones parciales por cada kilómetro.

Como se menciona en la presente norma nacional, la exigencia para la supervisión solo es para vía expresas mas no para las restantes. Esto se debe a que el control de vías urbanas no necesita una condición mayor para la condición funcional que brinda.

2.5. Normas Internacionales:

2.5.1. Norma española

El Ministerio de fomento es el encargado del desarrollo de las especificaciones técnicas para obras de carreteras y puentes en territorio español. El Ministerio de fomento emite la Orden circular 20/2014 sobre recepción de obras y carreteras que incluyan firmes y pavimentos, en la cual se incluye el Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)

La norma española que rige el procedimiento mencionado en el PG-3 para el cálculo de IRI es la NLT-330/98 “Cálculo del índice de regularidad internacional (IRI) en pavimentos de carreteras”

Esta norma define el procedimiento que debe seguirse para el cálculo del IRI en un tramo de carreteras del perfil longitudinal conocido. En la tabla, se muestra los umbrales permitidos para pavimentos de nueva construcción:

Tabla 2.3. Índice de regularidad internacional en la normativa español (*Ministerio de Fomento, 2014*)

Porcentaje de kilómetros		Tipo de capa		
		Rodadura e Intermedia		Otras capas asfálticas
		Tipo de vía		
		Calzada de autopistas y autovías	Resto de vías	
50		< 1,5	< 1,5	< 2,0
80		< 1,8	< 2,0	< 2,5
100		< 2,0	< 2,5	< 3,0
Equivalencia con una valor IRI medio y un valor de desviación típica	IRI medio	1,69	1,85	2,35
	Desviación típica	0,2022	0,3905	0,3905

Como se observa en la tabla 2.3, los valores límite para la recepción de obra es de un valor IRI medio de 1.69 para calzada de autopistas y de autovías; mientras que para el resto de vías se tiene menor exigencia, con un valor de IRI medio de 1.85. Por último, en otro tipo de capas asfálticas el valor exigido de IRI medio es de 2.35

2.5.2. Norma chilena

La norma chilena para la medición de IRI se encuentra especificada en el Manual de carreteras, volumen N°8 Especificaciones y métodos de muestreo, ensayo y control; acápite 8.502.8. Auscultaciones y prospecciones: Método para determinar la rugosidad de los pavimentos mediante la perfilometría longitudinal.

El manual describe el procedimiento para determinar la rugosidad superficial (irregularidades de la superficie) de pavimentos asfálticos, de hormigón, tratamientos superficiales y eventualmente, de otros tipos de capas de rodadura, expresada mediante el indicador IRI (International roughness index).

La forma de procesamiento según el manual es en sentido del tránsito, cada pista separadamente, en tramos de 200 metros o fracción, en caso de que un tramo determinado al inicio o al término de un sector homogéneo no alcance los 200 metros. El kilómetro inicial debe ajustarse al primer múltiplo de 200 metros, según contrato. Si la longitud del primer tramo es inferior a 100 metros, no se considerará en evaluación; si es igual o superior se considera como tramo independiente. Ello también es válido en los sectores finales del tramo. El IRI se registra en m/km, aproximando a un decimal.

En sectores homogéneos se evaluará el IRI por medias fijas, tomando los valores de cinco tramos consecutivos. Se entenderá que el pavimento tiene una rugosidad aceptable si todas las medias aritméticas fijas de cinco valores consecutivos de IRI son iguales o inferiores al valor indicado en las especificaciones técnicas del contrato. Si no es posible disponer de cinco valores consecutivos para formar una media fija, se determinará el promedio aritmético de los valores con los que se cuente, hasta un mínimo de dos.

Como umbrales para valores de IRI se considera los siguientes límites:

- IRI individual: ≤ 2.8 m/km
- IRI media fija: ≤ 2.0 m/km

2.6. Concesiones y contratos en el Perú

Hace 15 años la conservación vial estaba íntegramente a cargo del estado; sin embargo, no se medía la gestión o administración por niveles de servicio; como si se realiza en la actualidad.

Las concesiones son los contratos en el que los pagos por la gestión y mantenimiento de los activos viales están estrechamente asociados al cumplimiento por parte del contratista de unos indicadores mínimos de niveles de servicio claramente definidos. (Obando, 2010)

En la figura 2.10 se observa el esquema gráfico del sistema de concesiones de los proyectos de carretera a nivel nacional.



Figura 2.10. Enfoque actual del sistema de concesiones viales a nivel nacional desde PROVIAS Nacional. (Obando, 2010)

El actual enfoque del sistema de concesiones se basa en otorgar los proyectos a las concesionarias a través del ente directo del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), la cual cuenta con autonomía técnica, administrativa y financiera; está encargado de la ejecución de proyectos de construcción, mejoramiento, rehabilitación y mantenimiento de la Red Vial Nacional, con el fin de brindar a los usuarios un medio de transporte eficiente y seguro, que contribuya a la integración económica y social del país. (Obando, 2010)

Por otro lado, PROVIAS Nacional deriva la función de supervisión al ente OSITRAN OSITRAN, el cual es el Organismo supervisor de la inversión en infraestructura de transporte de uso público. Es un organismo regulador técnico que existe para garantizar el funcionamiento eficiente de los mercados que ofrecen servicios de infraestructura de transporte de uso público, mediante la regulación y supervisión de

las entidades prestadoras, en beneficio de los usuarios, estado y empresas concesionarias. (OSITRAN, 2006)

La normativa actual de las concesiones para definir un umbral de nivel de servicio respecto a la regularidad superficial es similar, observándose, que el valor máximo permitido 3.5 m/km durante el periodo de mantenimiento de las redes viales concesionadas (figura 2.11.). Además, se exige que las evaluaciones deberán ser ejecutadas con el empleo de alto rendimiento, teniendo como referencia actual el Rugosímetro tipo láser perfilómetro.

Durante el periodo de Explotación y Mantenimiento de las Redes Viales concesionadas, deberán garantizarse los siguientes límites admisibles en los parámetros indicadores de la condición de los pavimentos:

- Rugosidad:	No mayor a 3.5 m/km, según la escala del Índice Internacional de Rugosidad – IRI
- Peladura:	Menor a 10% del área
- Baches:	0% del área
- Ahuellamiento:	Menor a 12 mm. de flecha (con regla de 1.20m)
- Fisuras no tratadas:	Menor al 15% del área
- Grietas:	No mayor a 0.1% del área
- Coeficiente de Fricción:	No menor a 0.40
- Índice de Serviciabilidad Presente – PSI:	No menor a 2.8
- Deflexión característica	* Ver tabla de Deflexiones límites superiores (en 1/100 mm)
- Tiempo máximo de espera en estaciones de peaje	Se exigirá a la SOCIEDAD CONCESIONARIA mantener un tiempo de atención a los usuarios inferior a 3 minutos por vehículo, inclusive en las horas de mayor demanda.

Figura 2.11. Parámetros de condición y serviciabilidad exigibles en concesiones viales. (OSITRAN-NORVIAL, 2015)

Como se puede observar en la figura 2.11, el parámetro de rugosidad (o regularidad superficial) no debe superar el valor de 3.5 m/km. Además, las especificaciones no solo indican un valor sobre la regularidad superficial sino también sobre todos los parámetros que rigen el comportamiento funcional (rugosidad, peladura, baches, ahuellamiento, entre otros) y estructural (deflexión característica).

CAPÍTULO 3. Procedimiento de operación en campo

3.1. Metodología de trabajo

La presente investigación se desarrollará en dos etapas que permitan analizar la condición funcional del pavimento de manera objetiva y subjetiva; siendo la medición de IRI en campo y el estudio de confortabilidad a usuarios, respectivamente.

3.1.1. Tipo de estudio

El presente estudio será Descriptivo-Prolectivo-Transversal. Será descriptivo, porque se medirán dos variables en estudio: IRI y el confort de los usuarios. Será prolectivo, en medida que se trabajará con información a recolectar y para fines específicos. Será transversal, ya que las mediciones se realizarán una sola vez y se evalúa sin pretender analizar la evolución en el tiempo.

3.1.2. Localización de las mediciones

La ubicación de la carretera se encuentra entre el km 44 y 75 de la Panamericana Norte específicamente, en el tramo de serpentín Pasamayo, desde el km 4+000 Peaje Serpentín hasta el km 22+250 Óvalo de Chacra y mar. (Figura 3.1.)

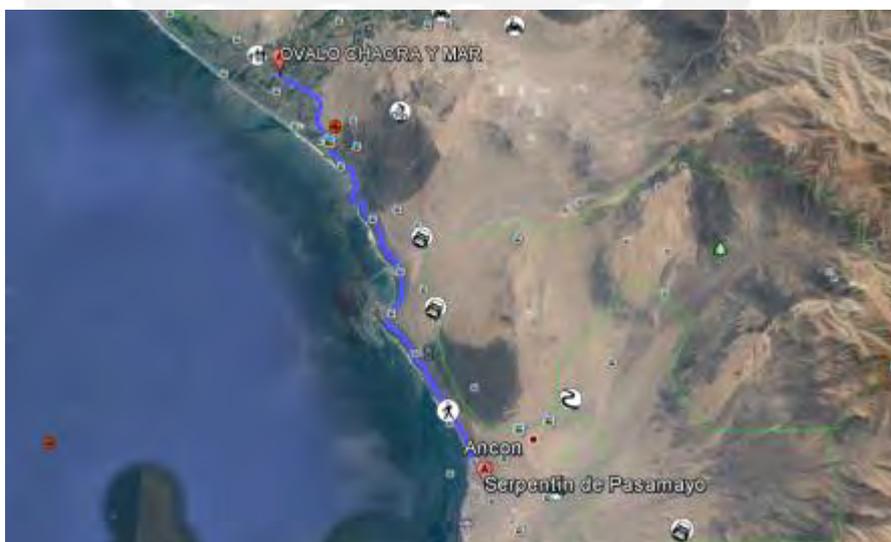


Figura 3.1. Tramo Serpentín-Pasamayo Red vial N°5 Ancón-Huachopativilca (Google Earth, 2016)

En la figura 3.1. se puede observar el tramo recorrido para la medición de IRI. Para la georeferenciación del recorrido, se usó un GPS de alta precisión y la exportación

de datos a través de Google Earth. Como se observa, el tramo inicia desde el Peaje Serpentin – km 4+500 hasta el Óvalo Chacra y Mar km 22+250.

En la figura 3.2, se puede observar el Óvalo el Ángel ubicado en el km 18+400 del tramo Serpentin – Pasamayo. La imagen fue obtenida de la página de OSITRAN - Red Vial N°5. Si bien la vista no es la actual, la imagen es de suma importancia para la comparación con la perspectiva actual.



Figura 3.2. Tramo Serpentin-Pasamayo Red vial N°5 Ancón-Huacho-Pativilca (OSITRAN, 2006)

3.1.3. Población y muestra

a) Medición de IRI

La población está compuesta por todas las vías pavimentadas del territorio nacional, de las cuales se seleccionará una muestra no representativa para la calificación del IRI de las vías en mención.

La elección de la vía pavimentada será mediante los siguientes factores: tipos de vías según la clasificación dada por la Norma E.010 Pavimentos urbanos; estado actual del pavimento y disponibilidad de desarrollo de operación. Se escogió como muestra el tramo Serpentin-Pasamayo km 4+500 – 22+250 de la concesión de la Red vial N°5 Ancón-Huacho-Pativilca de la panamericana norte (figura3.1.), teniendo como referencia los parámetros mencionados:

- Clasificación por la norma E.010 Pavimentos urbanos:

Si bien la norma califica solamente a vías urbanas, la panamericana norte es considerada como una vía expresa o carretera por lo que la calificación del nivel de servicio será la más exigente.

- Estado actual de la carretera:

La red vial N°5 es administrada por la Concesión NORVIAL S.A., desde el año 2003 por un periodo de 25 años. En la actualidad, en el tramo a analizar Serpentin Pasamayo se viene realizando obras de mantenimiento periódicas lo cual permitirá reflejar la mejora de la condición del pavimento.

- Disponibilidad de desarrollo de operación:

El equipo perfilómetro láser se encuentra en adecuado estado, es decir, correctamente calibrado para iniciar operación.

b) Confortabilidad de los usuarios

La población está compuesta por los usuarios del servicio vial de las vías seleccionadas para la medición del IRI. La muestra será la selección representativa del grupo humano para categorizar la calificación subjetiva de las vías seleccionadas. La muestra consistirá en el grupo de conductores que hayan realizado como mínimo un recorrido en el tramo Serpentin Pasamayo.

3.2. Medición de IRI en campo

Las mediciones de IRI se realizaron en el tramo Serpentin-Pasamayo km 4+500 – 22+250 de la concesión de la Red vial N°5 Ancón-Huacho-Pativilca. La recolección de información se realizó mediante el uso del perfilómetro láser y software ROMDAS. El procesamiento de información se explicará a detalle en el anexo C: Manual propuesto para el uso del software ROMDAS

3.2.1. Descripción de equipos

a) Perfilómetro láser

Según la clasificación del Banco mundial, el perfilómetro láser pertenece a la categoría clase 1 para la medición del Índice de regularidad internacional (IRI). A este tipo de equipo se le conoce también como perfilómetro inercial porque la referencia

que utilizan es inercial, asumiendo una elevación promedio de los últimos metros recorridos para cuantificar las deformaciones que existen en el perfil. (Kohler, 2016)

El perfilómetro láser debido a la eficiencia a la que puede trabajar, necesita acoplarse a un vehículo que se desplace en sentido de la calzada. En la figura 3.3, podemos observar el equipo perfilómetro láser ubicado en la parte trasera del vehículo, apoyada sobre una barra de aluminio que sostiene el equipo al vehículo.



Figura 3.3. Perfilómetro láser (*Activa Ingeniería y Construcción, 2015*)

El perfilómetro láser está compuesto por dos dispositivos propios que permiten analizar el perfil longitudinal del pavimento. El primero es el láser propiamente dicho, unidad láser. La unidad láser permite medir la distancia entre la posición en la que se encuentra y el nivel superficial del pavimento (rasante). El funcionamiento de la unidad láser se muestra en la figura 3.4

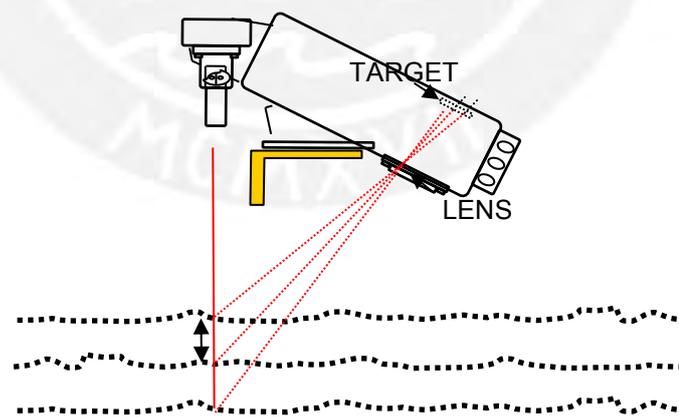


Figura 3.4. Funcionamiento unidad láser (*ROMDAS, 2015*)

En la figura 3.4, se puede observar que la unidad láser emite un haz de luz que se emite con dirección al pavimento, de manera que, al refractarse el haz, este sea recibido por las lentes (lens) ubicadas en la unidad. Así, la unidad láser mide la distancia que hay entre el nivel de referencia (altura de la parte inferior de la unidad láser) hasta el nivel de la superficie del pavimento.

Los equipos clase 3 presentan mayor variabilidad en los resultados debido a que dependen de ciertos factores propios de cada vehículo de medición, siendo estos: el peso del vehículo de medición y personas dentro del mismo, el procedimiento de calibración necesario para equipos de menor categoría y la suspensión o amortiguación del vehículo. Dentro de todas estas variables propias del vehículo, la amortiguación es el principal factor. Sin embargo, el perfilómetro láser elimina todas estas variables mediante el segundo dispositivo del perfilómetro láser: el acelerómetro. Este dispositivo cuenta con 3 ejes de medición para medir la aceleración y la velocidad angular (X, Y y Z), permitiendo eliminar las variables propias del vehículo, principalmente la amortiguación. Este último dispositivo permite realizar cualquier medición sin depender del tipo del vehículo.

Por medio de ambos dispositivos, el perfilómetro láser permite obtener el perfil longitudinal relativo de la superficie del pavimento. La unidad láser brinda el perfil longitudinal estático desde el nivel de referencia (parte inferior de la unidad láser) hacia el nivel de la superficie del pavimento, mientras que el acelerómetro obtiene el perfil longitudinal debido al movimiento vertical originado por el vehículo y su propia amortiguación obtenido por medio de integraciones a las aceleraciones medidas. (Figura 3.5)

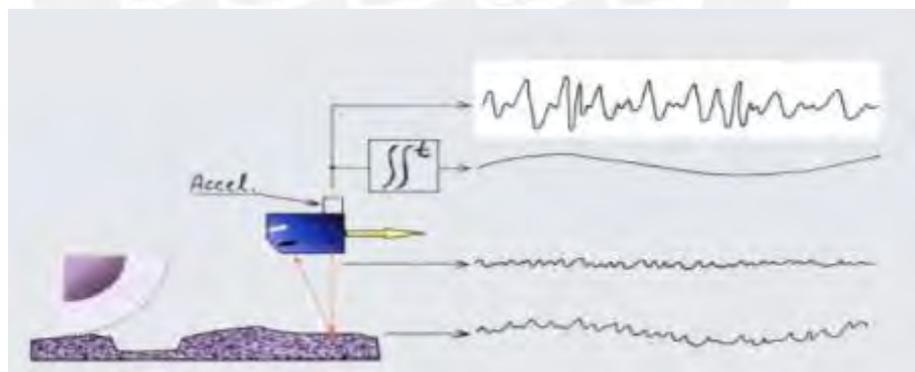


Figura 3.5. Perfil longitudinal obtenido de la unidad láser y el acelerómetro (Kohler, 2016)

Sin embargo, estos valores obtenidos de los dispositivos siguen las exigencias según la clasificación brindada por el Banco mundial, y expresada en la norma internacional ASTM E950/950M “Standard test method for measuring the longitudinal profile of traveled surfaces with an accelerometer established inertial profiling”.

Según la norma, se exige para los equipos clase 1, que la resolución en la distancia de muestreo del equipo sea compatible con la Tabla 3.1 y Tabla 3.2.

Tabla 3.1. Distancia de muestreo del perfil longitudinal (Norma internacional ASTM E950/950M-09, 2009)

Class 1	Less than or equal to 25 mm (1 in.)
Class 2	Greater than 25 mm (1in.) to 150 mm (6 in.)
Class 3	Greater than 150 mm (6 in.) to 300 mm (12 in.)
Class 4	Greater tan 300 mm (12 in.)

En la tabla 3.1, se denota que para los perfilómetros láser (clase 1) se exige una longitud de muestreo menor o igual a 25 mm (1 pulgada) mientras que para los equipos clase 2, la longitud de muestreo permitida es 6 veces más. Esto muestra una gran diferencia entre la resolución de un equipo clase 1 y 2.

Tabla 3.2. Resolución de la medición vertical (Norma internacional ASTM E950/950M-09, 2009)

Class 1	Less than or equal to 0.1 mm (0.005 in.)
Class 2	Greater than 0.1 mm (0.005 in.) to 0.2 mm (0.010 in.)
Class 3	Greater than 0.2 mm (0.010 in.) to 0.5 mm (0.020 in.)
Class 4	Greater than 0.5 mm (0.020 in.)

En la tabla 3.2, se denota que para los perfilómetros láser (clase 1) se exige una resolución vertical menor o igual a 0.1 mm (1 pulgada) mientras que para los equipos clase 2, la resolución vertical permitida es el doble.

A continuación, en la figura 3.6 se muestran las especificaciones técnicas del perfilómetro proporcionadas por el fabricante.

Technical Specifications	
Scan Rate	70 kHz
Laser Class	Class 3B
PC Interface	Ethernet
Configuration	Laser elevation with integrated Accelerometer Inertial Reference
Standoff	245 mm
Range	500 mm (+/- 250 mm)
Resolution	0.01% of full scale
Resolution IRI	+/- 0.01 m/km
Environment	IP65 (MEMA4)
Power	12 V DC 1 A
Weight	3 kg (excluding mounting beam)
Dimensions	170 mm x 120 mm x106 mm (main enclosure, ex. Mounting beams)
Outputs	International Roughness Index (IRI) & Raw longitudinal profile
Output Format	MS Access .MDB (exportable to excel and most other 3rd party programs), .ERD files (viewable in ProVal for further profile analysis)

Figura 3.7. Especificaciones técnicas del fabricante (ROMDAS, 2015)

En la figura 3.7, se observa características técnicas que se exigen en el Manual de inventarios viales actualizado. Como se mencionó este manual sirve como referencia/guía para todo tipo de medición; sin embargo, dependiendo del tipo de equipo a usar se pueden tener consideraciones respecto a la normativa. Los valores más importantes que se observan en la figura 3.5, son la frecuencia (scan rate), configuración (configuration), Resolución (resolution) y Resolución IRI (resolution IRI).

Descripción	Especificación	Equipo
Velocidad de medida	Variable entre 30 y 120 km/h	
Intervalo de medida	10 mm o superior	
Principio de medida	Triangulación con láser desde un plano de referencia definido por giroscopios ópticos y acelerómetros	
Frecuencia de muestreo	Para los láseres de perfil 32 kHz Para el láser de macrotextura 64 kHz	
Frecuencia de respuesta	Plana (± 3 dB) desde 0.2 Hz hasta 2 kHz	
Ancho de banda	Longitud de onda desde 0.01 m hasta 100 m, a 72 km/h	
Resolución	Vertical 0.05 mm, horizontal 3 mm, independientemente de la velocidad	
Parámetros de salida	Perfil longitudinal, índice de rugosidad, macrotextura (ETD, RMS, MPD, etc), ahuecamiento	

(*) De preferencia se optara por la tecnología mas reciente

Figura 3.6. Exigencias para el perfilómetro láser (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014)

Según lo mostrado en las figuras 3.6 y 3.7. se puede concluir que:

La frecuencia especificada es de 70 de kHz; este valor se encuentra por encima del mínimo exigido tanto en el manual de inventarios viales del Perú (32kHz) así como los manuales internacionales, por lo que la mayoría de perfilómetros láser cumplen con esta exigencia.

La configuración incluye una unidad láser y un acelerómetro de referencia inercial, con lo que cumple la exigencia de equipo clase 1 según el banco mundial.

La resolución es de 0.01 % de la escala total (range – 500 mm), la cual resulta ser 0.05mm. Este valor es acorde a la resolución exigida en la norma internacional ASTM E950/E950M (Tabla3.2) y en el Manual de inventarios viales (0.05mm).

La resolución IRI es ± 0.01 m/km, el cual es similar al valor estipulado en el Manual de inventarios viales 2014 (± 0.01 m/km).

b) Odómetro

El odómetro es un dispositivo que mide el desplazamiento lineal del recorrido, es decir, la progresiva. El odómetro a usar es un equipo de alta resolución y permite medir distancia correlacionando un contador de pulsos del equipo con la posición lineal recorrida por el vehículo, posición lineal previamente calibrada, sobre una distancia patrón.

En la figura 3.8, se observa el odómetro acoplado al neumático trasero izquierdo del vehículo. El uso del odómetro permite ubicar secciones homogéneas (IRI similar) o



Figura 3.8. Odómetro acoplado al neumático trasero izquierdo del vehículo. (*Activa Ingeniería y Construcción, 2015*)

puntos críticos donde el valor de IRI supere el valor permitido según el contrato, siendo este valor igual a 3.5 m/km.

c) Videocámara panorámica

La videocámara permite obtener el registro videográfico del recorrido en el tramo Serpentin-Pasamayo. El registro panorámico si bien no influye en la medición de valores de IRI, si influye indirectamente en el análisis de datos post-medición. Esto se explicará a más detalle en la *sección 3.3. Procesamiento de datos*.

d) Sistema computarizado

El sistema computarizado permite interconectar la información registrada proveniente del perfilómetro láser, el odómetro y la videocámara panorámica. De manera que los valores estén posicionados en todo el recorrido y presente una imagen gráfica según su respectiva ubicación.

En la figura 3.9, se observa que el sistema computarizado se encuentra ubicado en la parte interior del vehículo. Dependiendo del tipo de vehículo, ya sea una minivan o una camioneta el sistema computarizado puede estar en la parte trasera o en la parte delantera respectivamente. La posición procede más a la comodidad del operario durante la medición.



Figura 3.9. Sistema computarizado en la parte interior de un vehículo (Mertz, 2015)

3.2.2. Instalación

El perfilómetro láser no requiere de un vehículo especializado para realizar las mediciones; sin embargo, es necesario que en el interior sea espacioso para la ubicación del sistema computarizado que permite la integración de todos los dispositivos. Se recomienda camionetas todo terreno o minivans debido a la potencia de los mismos y el amplio espacio de trabajo que brindan.

El perfilómetro láser puede ser instalado tanto en la parte delantera como en la trasera del vehículo. La ubicación va a depender del propio vehículo, es decir, se buscará la mejor posición de manera que el soporte y el ángulo de inclinación sean los adecuados.

Por medio de barras de aluminio y pernos, en este caso, el equipo es montado en la parte delantera como se muestra en la figura 3.10.



Figura 3.10. Perfilómetro láser (*Activa Ingeniería y Construcción, 2015*)

La figura 3.10, muestra que la ubicación del perfilómetro láser es perpendicular a la superficie del pavimento. Debido a esto, es que el equipo cuenta con un nivel esférico ojo de pollo en la parte superior que permite nivelar el dispositivo verticalmente. Esto es necesario ya que las mediciones por parte de la unidad láser y el acelerómetro deben ser realizadas perpendicularmente a la superficie de la carretera para la correcta medición.

El odómetro se ubica en el plato del neumático de la llanta trasera izquierda. La posición del dispositivo se debe a que la tracción del vehículo, se encuentra en la parte trasera. Además, se coloca en el lado izquierdo del vehículo debido a que el conductor se ubica en el eje permitiendo que los giros a realizar permitan realizar una medición real de la carretera.

La videocámara panorámica se ubica en la parte superior del vehículo de manera que la vista que se obtenga sea sobre todo el derecho de la vía. En este caso el tramo de medición es de una calzada y un carril de ida y de vuelta. En caso haya presencia de mayor cantidad de carriles por calzada, se requeriría una cámara adicional para poder cubrir el derecho de vía, y así poder cumplir con la exigencia que se indica en el Manual de inventarios viales (2014).

3.2.3. Calibración/ Validación de equipos

Toda medición que requiera uso de equipos electrónicos, necesita de un certificado de calibración o procedimiento de calibración en campo periódico, de manera que los datos obtenidos sean confiables y consistentes en el tiempo.

Sin embargo, debido al nivel de precisión de requerido para la medición del perfil longitudinal del pavimento, se recomienda que los equipos sean calibrados periódicamente según indicación del fabricante (Norma internacional ASTM E950/950M-09, 2009). De manera que los procesos de calibración que pueda realizar un usuario no serán los mismos que pueda realizar la propia empresa fabricante; por lo que, se recomienda realizar un proceso de VALIDACIÓN. Esto quiere decir que los equipos no se calibran debido a la complejidad de los componentes que requieren la alta precisión de equipos clase 1; sino los equipos se validan de manera que se corrobora que los valores que se obtienen son congruentes y confiables.

Para los equipos en mención, se realiza procesos de validación para 2 equipos: el perfilómetro láser y el odómetro. Los procesos de validación de ambos dispositivos se encuentran detallados en el Anexo C. Manual propuesto para el uso del software ROMDAS

3.2.4. Procedimiento de medición

Después de haber calibrado los dispositivos, se procede a realizar las configuraciones de los dispositivos de manera que las mediciones sean acordes a lo estipulado en el Manual de inventarios viales (2014). La configuración de los dispositivos se detalla en el Anexo C, Manual propuesto para el uso del software ROMDAS.

El pavimento de este sector es exclusivamente para tráfico pesado, de una calzada con 2 carriles, uno de sentido Sur-Norte y el otro viceversa. El sector comprende desde el desvío Ancón Km 0+000, pasando entre el Km 4+100 y 4+500, sector del peaje Serpentín-Pasamayo; sin embargo, para cuestiones prácticas, las mediciones se realizaron a partir del peaje. En el mismo peaje no se consideran las mediciones, por considerarse como una singularidad, y siguiendo la ruta paralela al litoral del Océano Pacífico hasta el Km 22+250, zona Chacra y Mar (cruce con la Variante Pasamayo). Es a lo largo del tramo que se han realizado las mediciones de la regularidad superficial.

Durante todo el largo del recorrido se registró un video de serie de imágenes obtenidas cada 20 metros (exigido en el Manual de inventarios viales, 2014).

3.3. Encuestas de confortabilidad

El proceso de las encuestas de confortabilidad se realizó en los tramos de inicio y fin de la vía seleccionada, km 4+500 y km 22+250 km, respectivamente. De esta manera, se tuvieron dos puntos clave para ubicar la mayor cantidad de usuarios con disponibilidad. El primer punto fue el peaje Serpentin-Ancón (km 4+500) como se puedes observar en la figura 3.11, en este punto se lograba interceptar a los usuarios cuando realizaban detenciones antes y después del peaje.



Figura 3.11. Estación de peaje Serpentin-Ancón (Fuente propia, 2016)

Por otro lado, el segundo punto fue el óvalo Chacra y Mar, ubicado en el km 22+250 del tramo Serpentin-Pasamayo. Este punto fue estratégico debido a que el óvalo era un punto de concurrencia para los usuarios tanto como para descansar de su rutina de trabajo o para alimentarse.

Para la construcción de la encuesta, se tomó en cuenta el modelo asumido para la determinación del Ratio de serviciabilidad presente (PSR). El modelo permite calificar subjetivamente una carretera en cinco categorías siendo 1 el nivel de servicio más bajo (peor condición) y 5 el nivel de servicio en mejor estado. Sin embargo, se añadió una pregunta más a la encuesta. Esta consistía en determinar la velocidad que le permite la condición de la pista realizar un recorrido seguro y veloz.

En la figura 3.12, se puede observar que el modelo de encuesta adoptado es similar al modelo para la evaluación del PSR, añadiéndose el factor velocidad en la encuesta. Este factor permitió calificar a las carreteras según la figura 2.4, de modo que se obtuvo una calificación en base a la percepción directa de la condición del pavimento (escala de 1 al 5) y una percepción indirecta (a través de la velocidad permitida).

ENCUESTA DE CONFORTABILIDAD:

Nombre: _____

Edad: _____ Fecha: _____

Sector: _____

1. En una escala de 1 al 5, ¿Cómo calificaría la carretera y/o recorrido en condiciones de confort y seguridad?

- 1 Muy malo
- 2 Malo
- 3 Intermedio
- 4 Bueno
- 5 Muy bueno

2. ¿A qué velocidad normalmente recorre la carretera?

Figura 3.12. Modelo de encuesta de confortabilidad
(Fuente propia, 2016)

Es importante indicar que la encuesta tiene que ser rápida y confiable porque la mayoría de conductores están enfocados en manejar y no retrasarse en sus tiempos de viaje. Por este motivo y la elección de ambos parámetros (escala y velocidad) la encuesta permitirá reflejar la condición actual de la carretera en correlación con la medición objetiva del IRI (perfilómetro láser)

3.4. Relevamiento de información en gabinete

Después de haber realizado los trabajos en campo, como son las mediciones de IRI mediante el perfilómetro láser y las encuestas de confortabilidad; se procede a elevar la información recolectada. El proceso de relevamiento consta de tres procedimientos: procesamiento de información, análisis de singularidades y presentación de resultados.

3.4.1. Procesamiento de información

Consiste en convertir la información recogida por medio del software ROMDAS a un formato que permita ser modificado para su posterior análisis. El formato original de

trabajo en el software ROMDAS es el archivo de extensión rbf. Mediante el procesamiento de información, el cual se detalla en el Anexo C. Manual propuesto para el uso del software ROMDAS, se obtiene los resultados en formato mdb. (Access). El cual es fácilmente exportado al archivo de extensión xlsx. (Excel)

3.4.2. Análisis de datos /singularidades

Las singularidades son estructuras que afectan la medición de IRI debido a que generan un cambio drástico en el perfil longitudinal de la carretera. De este modo, los valores de IRI en tramos con presencia de singularidades ocasionarán valores atípicos de IRI.

Las singularidades presentes en el recorrido han sido: baches, gibas, resonadores, puentes, pontones, semáforos y tratamiento superficiales. Estas singularidades provocan la variación del perfil por lo que el procesamiento de datos genera un resultado diferente a los valores promedio.

Adicionalmente a estas singularidades, debido al tipo de carretera, el flujo o detenimiento de vehículos pesados impedía el avance continuo de medición. La velocidad mínima de medición de IRI es de 20 km/h; por lo que debido a la congestión de vehículos en ciertos tramos las mediciones no alcanzaban en el valor mínimo de medición. Para compensar estos errores, se procedía a realizar la medición del mismo tramo las veces que sea necesario hasta que la velocidad esté por encima de los 20 km/h exigidos.

3.4.3. Presentación de resultados

Los resultados obtenidos de la recolección se han medido cada 100 metros (Anexo C), de manera que se obtendrá valores de IRI promedio en 100 metros tomando como promedio 10 valores separados cada 10 metros a una distancia de 100 metros. De manera que el primer dato será en la posición 4+600 (siendo la progresiva de inicio 4+500 + 100 metros de separación), el segundo 4+700, y así. Sin embargo, en la progresiva de fin 22+250, solamente se promediarán los últimos 5 datos para la progresiva 22+250.

El IRI promedio obtenido es un valor estadístico comúnmente usado para la presentación de datos. Sin embargo, según los términos de referencia del contrato de la Concesión de la red vial N°5, la presentación de datos será el valor de IRI media deslizante o media móvil.

CAPITULO 4. Resultados

Los resultados obtenidos se dividieron en dos grandes secciones: La primera sección incluye la medición realizada en todo el tramo con sentido sur – norte, es decir, teniendo como punto de inicio el km 4+500 y como fin, el km 22+250; mientras que la segunda sección incluye la medición realizada en sentido viceversa, norte -sur, es decir, como punto de inicio el km 22+250 y el punto de fin, km 4+500

4.1. Resultados de IRI en el tramo Serpentín Pasamayo - Sentido Sur - Norte:

El tramo analizado inicia en el km 4+500 hasta el km 22+250 del tramo Serpentín – Pasamayo de la concesión vial N°5 Ancón Huacho Pativilca. Para el desarrollo de un mejor análisis, se dividirá el tramo en 3 sectores homogéneos:

- Sector A: km 4+500 – km 10+000
- Sector B: km 10+000 – km 16+000
- Sector C: km 16+000 – km 22+250

Los resultados tabulados del tramo Serpentín-Pasamayo se encuentran en el *Anexo A. Valores de IRI en el tramo Serpentín Pasamayo Km 4+500 – 22+500 – Sentido sur-norte*

4.1.1. Sector A: km 4+500 – km 10+000

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Huella izquierda @ 100m. En la figura 4.1, se puede observar los resultados de los valores individuales de la huella izquierda versus progresiva desde el km 4+500 hasta el km 10+000. Se obtuvo como valor promedio 2.27. El valor máximo es 5.46, el cual sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 0.91, mientras que la desviación estándar es 0.87. Existen 5 valores que sobrepasan el umbral permitido.

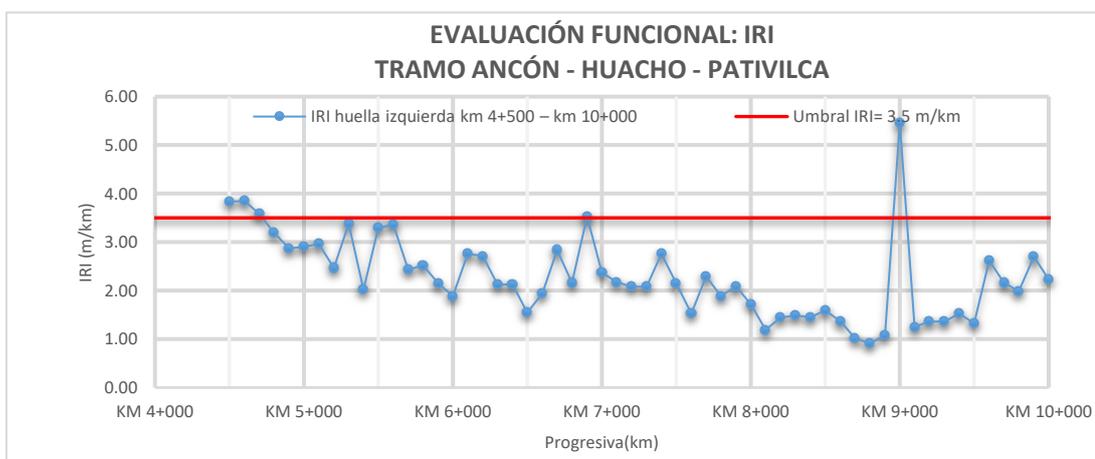


Figura 4.1. IRI Huella izquierda @ 100 metros km 4+500 – km 10+000 Sur-norte (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Huella derecha @ 100m. En la figura 4.2, se puede observar los resultados de los valores individuales de la huella derecha versus progresiva desde el km 4+500 hasta el km 10+000. Se obtuvo como valor promedio 1.95. El valor máximo es 3.09, el cual no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 0.94, mientras que la desviación estándar es 0.63.

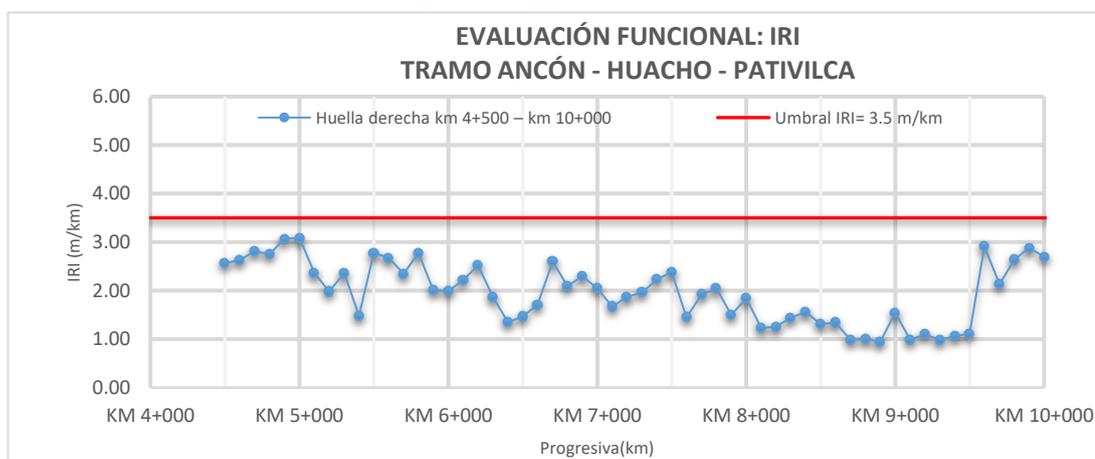


Figura 4.2. IRI Huella derecha @ 100 metros km 4+500 – km 10+000 Sur-norte (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentin Pasamayo: IRI Promedio @ 100m. En la figura 4.3, se puede observar los resultados de los valores individuales del promedio de huellas versus progresiva desde el km 4+500 hasta el km 10+000. Se obtuvo como valor promedio 2.11. El valor máximo es 3.50 que sobrepasa el umbral límite establecido de 3.5 m/km. Siendo este último, el único valor que sobrepasa el umbral permitido. El valor mínimo obtenido en el tramo es 0.91, mientras que la desviación estándar es 0.69.

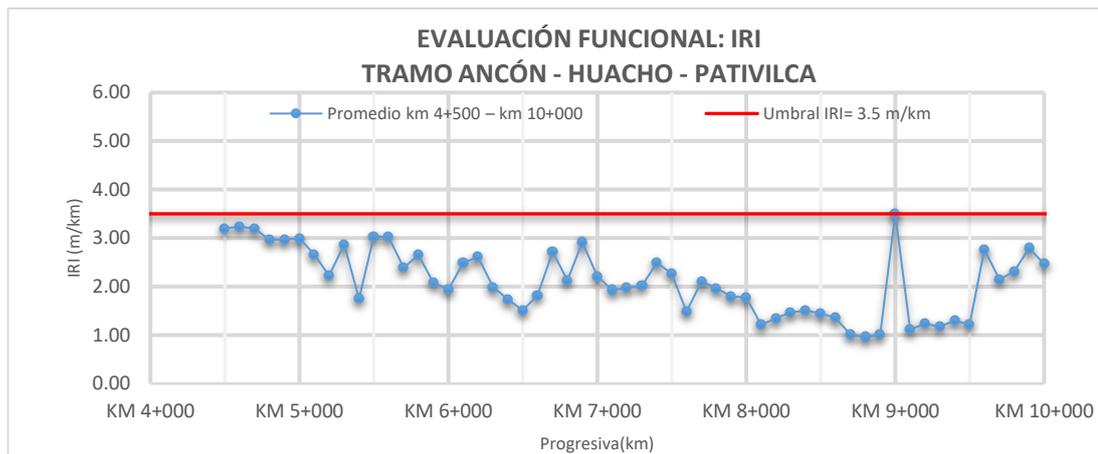


Figura 4.3. IRI Promedio @ 100 metros km 4+500 – km 10+000 Sur-norte (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentin Pasamayo: IRI Media móvil @ 100m. En la figura 4.4, se puede observar los resultados de los valores de media móvil versus progresiva desde el km 4+500 hasta el km 10+000. Se obtuvo como valor promedio 2.20. El valor máximo es 3.22 y no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 1.31, mientras que la desviación estándar es 0.56.

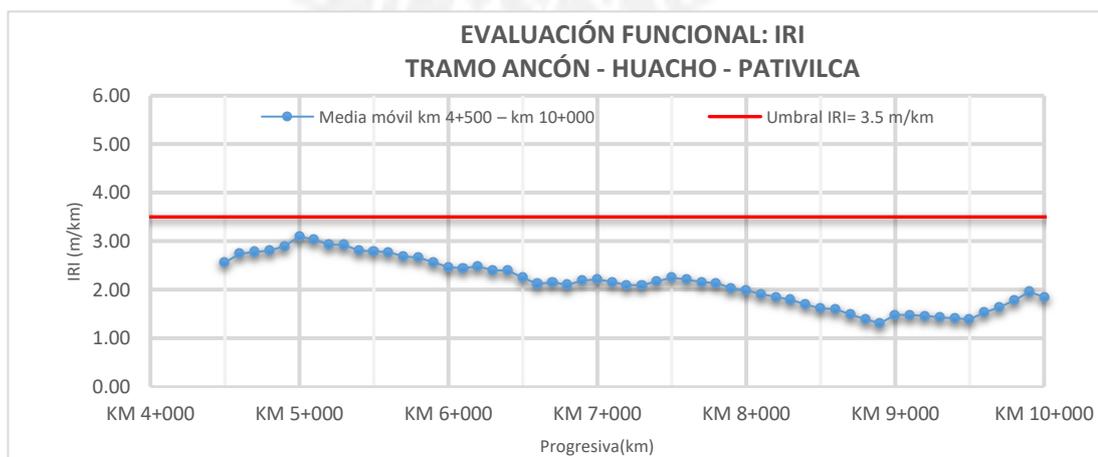


Figura 4.4. IRI Media móvil @ 100 metros km 4+500 – km 10+000 Sur-norte (Fuente propia)

4.1.2. Sector B: km 10+000 – km 16+000

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Huella izquierda @ 100m. En la figura 4.5, se puede observar los resultados de los valores individuales de la huella izquierda versus progresiva desde el km 10+000 hasta el km 16+000. Se obtuvo como valor promedio 1.65. El valor máximo es 3.13, y no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 1.00, mientras que la desviación estándar es 0.55.

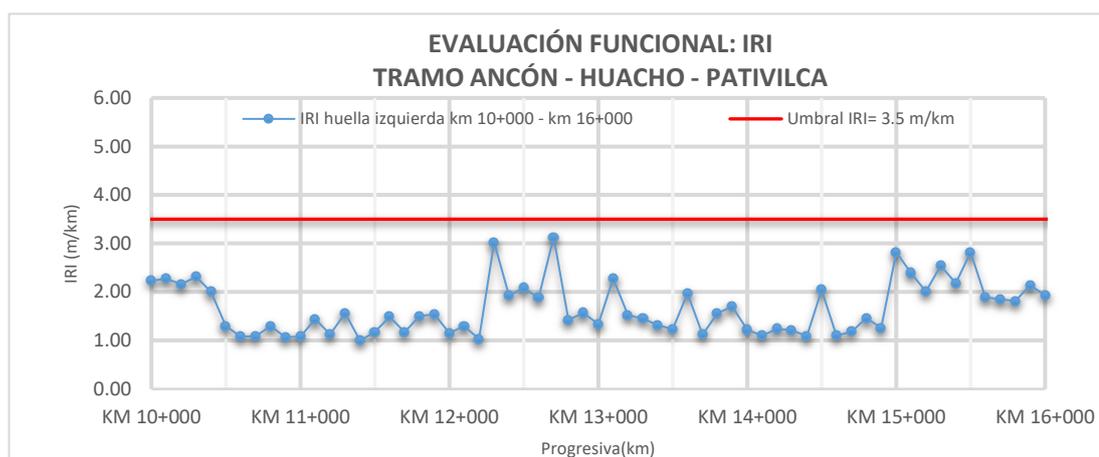


Figura 4.5. IRI Huella izquierda @ 100 metros km 10+000 – km 16+000 Sur-norte (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Huella derecha @ 100m. En la figura 4.6, se puede observar los resultados de los valores individuales de la huella derecha versus progresiva desde el km 10+000 hasta el km 16+000. Se obtuvo como valor promedio 1.56. El valor máximo es 3.20, y no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 0.85, mientras que la desviación estándar es 0.53.

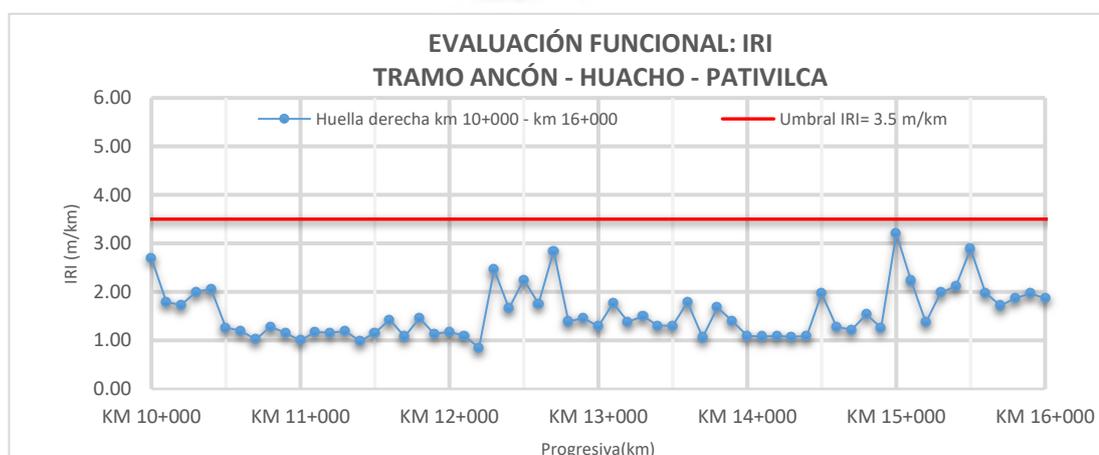


Figura 4.6. IRI Huella derecha @ 100 metros km 10+000 – km 16+000 Sur-norte (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentin Pasamayo: IRI Promedio @ 100m. En la figura 4.7, se puede observar los resultados de los valores individuales del promedio de huellas versus progresiva desde el km 10+000 hasta el km 16+000. Se obtuvo como valor promedio 1.61. El valor máximo es 3.01, el cual no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 0.94, mientras que la desviación estándar es 0.53.

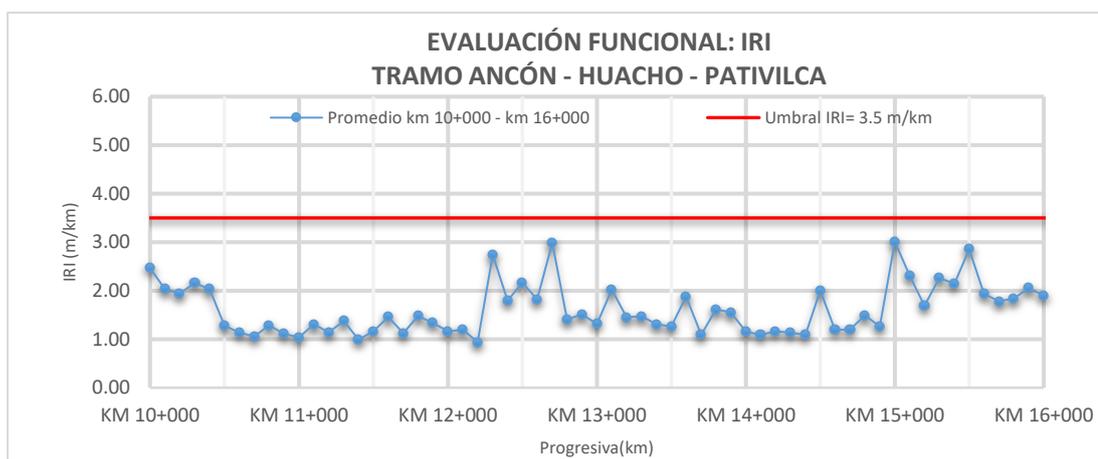


Figura 4.7. IRI Promedio @ 100 metros km 10+000 – km 16+000 Sur-norte (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentin Pasamayo: IRI media móvil @ 100m. En la figura 4.8, se puede observar los resultados de los valores de media móvil versus progresiva desde el km 10+000 hasta el km 16+000. Se obtuvo como valor promedio 1.61. El valor máximo es 2.19, el cual no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 1.16, mientras que la desviación estándar es 0.53.

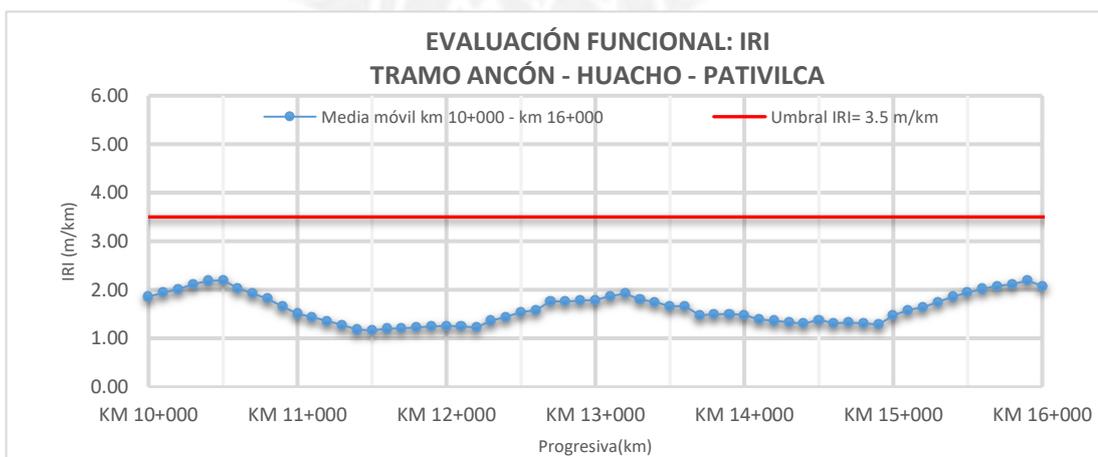


Figura 4.8. IRI Media móvil @ 100 metros km 10+000 – km 16+000 Sur-norte (Fuente propia)

4.1.3. Sector C: km 16+000 – km 22+250

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Huella izquierda @ 100m. En la figura 4.9, se puede observar los resultados de los valores individuales de la huella izquierda versus progresiva desde el km 16+000 hasta el km 22+250. Se obtuvo como valor promedio 2.51. El valor máximo es 4.39, y sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 1.12, mientras que la desviación estándar es 0.90.

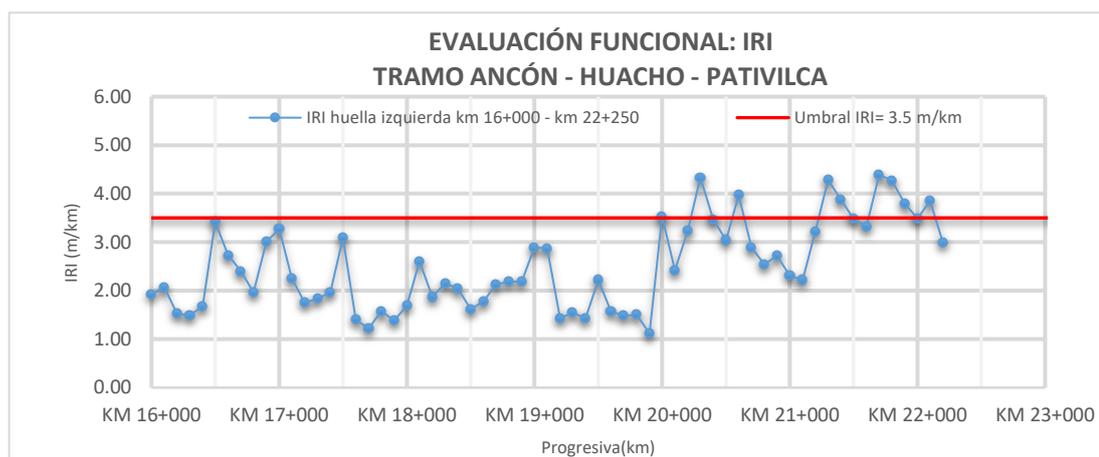


Figura 4.9. IRI Huella izquierda @ 100 metros km 16+000 – km 22+250 Sur-norte (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Huella derecha @ 100m. En la figura 4.10, se puede observar los resultados de los valores individuales de la huella derecha versus progresiva desde el km 16+000 hasta el km 22+250. Se obtuvo como valor promedio 2.02. El valor máximo es 3.44, el cual no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 0.66, mientras que la desviación estándar es 0.78.

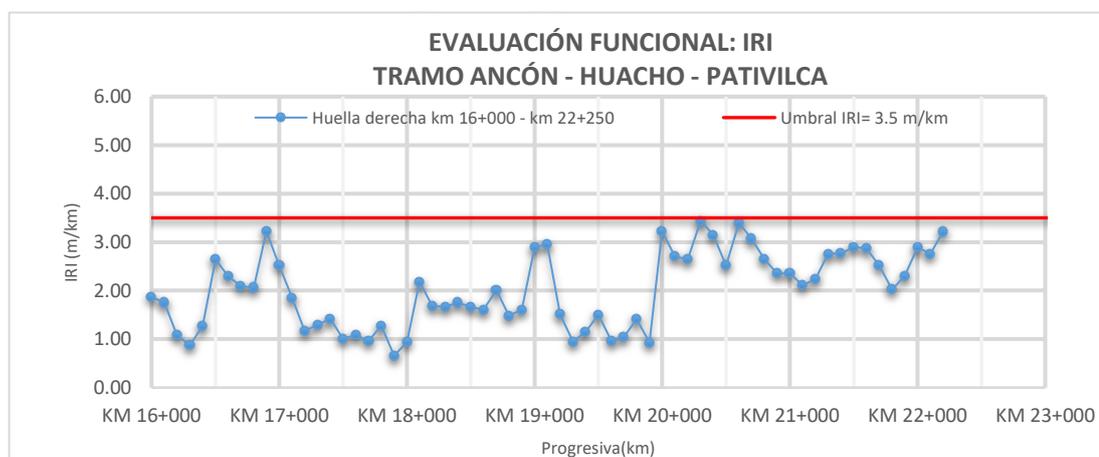


Figura 4.10. IRI Huella derecha @ 100 metros km 16+000 – km 22+250 Sur-norte (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentin Pasamayo: IRI Promedio @ 100m. En la figura 4.11, se puede observar los resultados de los valores individuales del promedio de huellas versus progresiva desde el km 16+000 hasta el km 22+250. Se obtuvo como valor promedio 2.26. El valor máximo es 3.88, el cual sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 1.02, mientras que la desviación estándar es 0.80. Existen 3 valores que sobrepasan el umbral permitido.

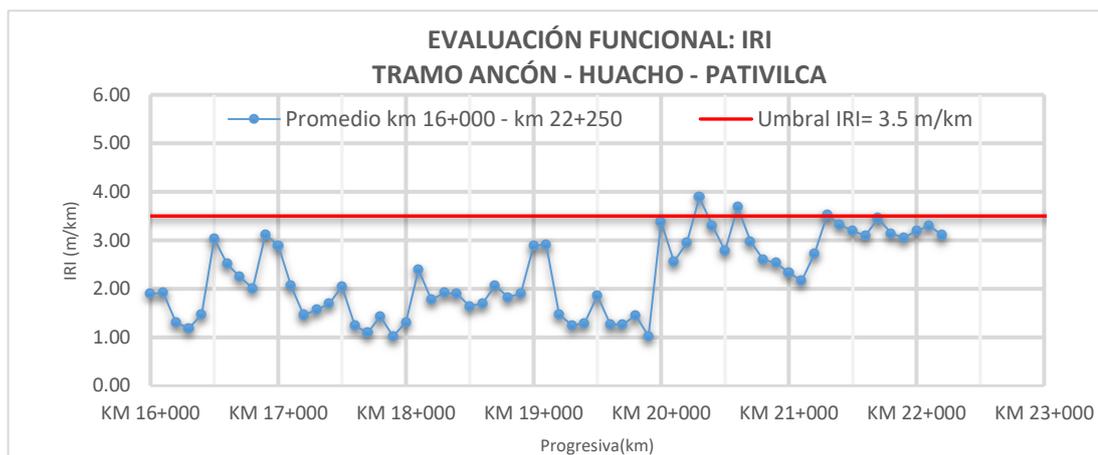


Figura 4.11. IRI Promedio @ 100 metros km 16+000 – km 22+250 Sur-norte (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentin Pasamayo: IRI media móvil @ 100m. En la figura 4.12, se puede observar los resultados de los valores de media móvil versus progresiva desde el km 16+000 hasta el km 22+250. Se obtuvo como valor promedio 2.18. El valor máximo es 3.24, el cual no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 1.49, mientras que la desviación estándar es 0.51.

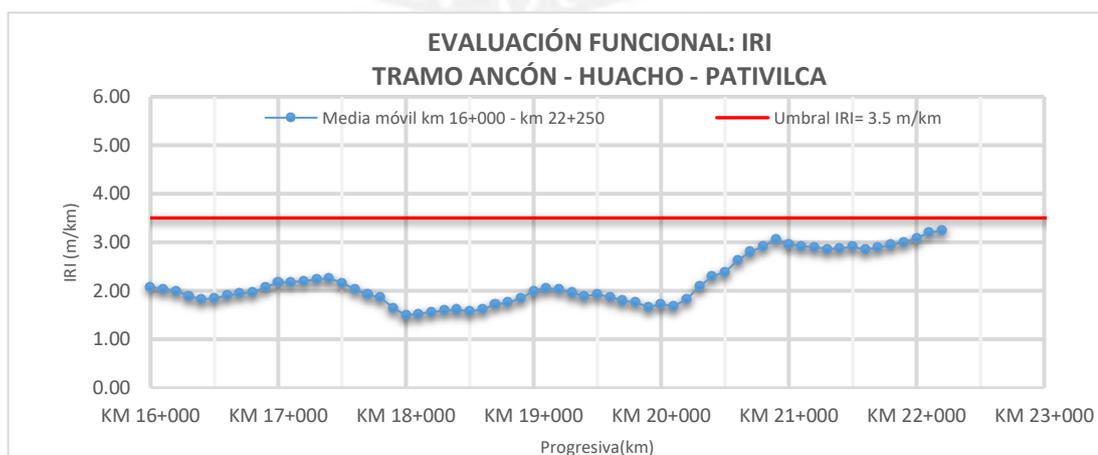


Figura 4.12. IRI Media móvil @ 100 metros km 16+000 – km 22+250 Sur-norte (Fuente propia)

Resultados comparativos de IRI en el tramo Serpentin Pasamayo - Sentido Sur - Norte:

Comparación de IRI en huella izquierda, huella derecha, promedio de huellas y media móvil @ 100m.

En la figura 4.13, se observa un gráfico comparativo entre el valor de IRI obtenido de la huella izquierda, huella derecha, promedio y media móvil desde el km 4+500 hasta el km 10+000 del carril con sentido sur-norte.

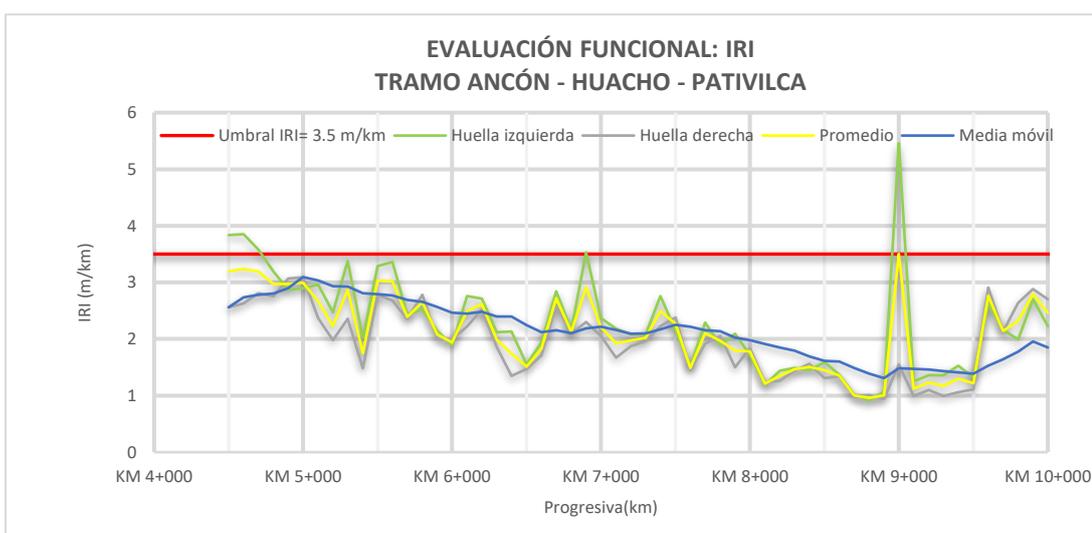


Figura 4.13. Gráfico comparativo entre el IRI de la huella izquierda, derecha, promedio y media móvil @100 metros km 4+500 – km 10+000 Sur-norte (Fuente propia)

En la figura 4.14, se observa un gráfico comparativo entre el valor de IRI obtenido de la huella izquierda, huella derecha, promedio y media móvil desde el km 10+000 hasta el km 16+000 del carril con sentido sur-norte.

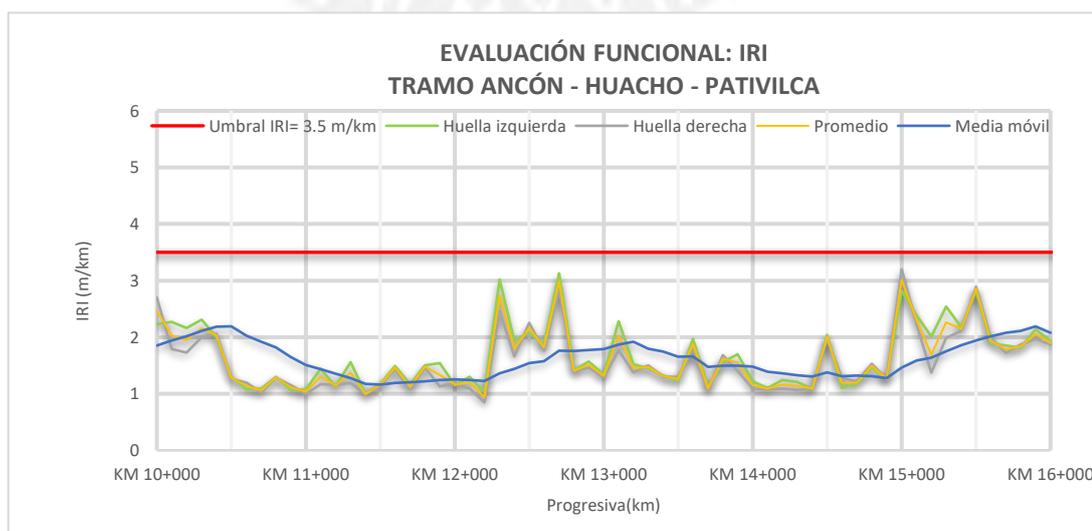


Figura 4.14. Gráfico comparativo entre el IRI de la huella izquierda, derecha, promedio y media móvil @100 metros km 10+000 – km 16+000 Sur-norte (Fuente propia)

En la figura 4.15, se observa un gráfico comparativo entre el valor de IRI obtenido de la huella izquierda, huella derecha, promedio y media móvil desde el km 16+000 hasta el km 22+250 del carril con sentido sur-norte.

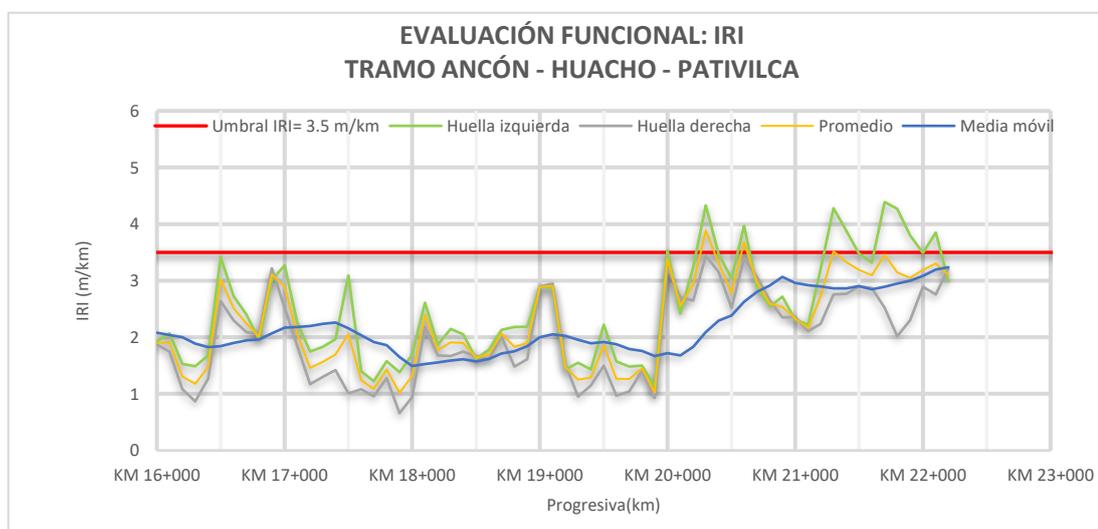


Figura 4.15. Gráfico comparativo entre el IRI de la huella izquierda, derecha, promedio y media móvil @100 metros km 16+000 – km 22+250 Sur-norte (Fuente propia)

4.2. Resultados de IRI en el tramo Serpentin Pasamayo - Sentido Norte - Sur:

El tramo analizado inicia en el km 22+250 hasta el km 4+500 del tramo Serpentin – Pasamayo de la concesión vial N°5 Ancón Huacho Pativilca. Para el desarrollo de un mejor análisis, se dividirá el tramo en 3 sectores homogéneos:

- Sector A: km 4+500 – km 10+000
- Sector B: km 10+000 – km 16+000
- Sector C: km 16+000 – km 22+250

Al igual que se realizó la sectorización del tramo en el sentido sur-norte, se realiza la sectorización para el sentido norte-sur. Los resultados deberían estar mostrados en forma descendente, debido al sentido norte-sur de la medición; sin embargo, para un mejor análisis y comparación con el tramo en sentido sur-norte, se decide mostrar los resultados en sentido ascendente, es decir, el mismo sentido propuesto en el sector sur-norte.

Los resultados tabulados del tramo Serpentin-Pasamayo se encuentran en el *Anexo B. Valores de IRI en el tramo Serpentin Pasamayo Km 4+500 – 22+250 - Sentido norte-sur.*

4.2.1. Sector A: km 4+500 – km 10+000

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Huella izquierda @ 100m. En la figura 4.16, se puede observar los resultados de los valores individuales de la huella izquierda versus progresiva desde el km 4+500 hasta el km 10+000. Se obtuvo como valor promedio 2.32. El valor máximo es 4.67, el cual sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 1.22, mientras que la desviación estándar es 0.83.



Figura 4.16. IRI Huella izquierda @ 100 metros km 4+500 – km 10+000 Norte-sur (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Huella derecha @ 100m. En la figura 4.17, se puede observar los resultados de los valores individuales de la huella derecha versus progresiva desde el km 4+500 hasta el km 10+000. Se obtuvo como valor promedio 2.02. El valor máximo es 4.10, el cual sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 1.02, mientras que la desviación estándar es 0.70. Existen 2 valores que sobrepasan el umbral permitido.

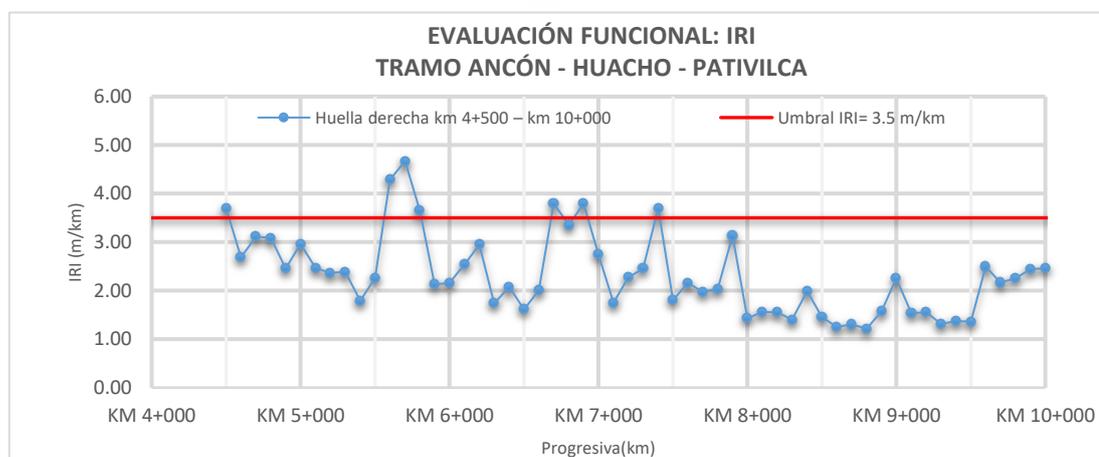


Figura 4.17. IRI Huella derecha @ 100 metros km 4+500 – km 10+000 Norte-sur (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Promedio @ 100m. En la figura 4.18, se puede observar los resultados de los valores individuales del promedio de huellas versus progresiva desde el km 4+500 hasta el km 10+000. Se obtuvo como valor promedio 2.17. El valor máximo es 3.94, el cual sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 1.16, mientras que la desviación estándar es 0.74. Existen 3 valores que sobrepasan el umbral permitido.

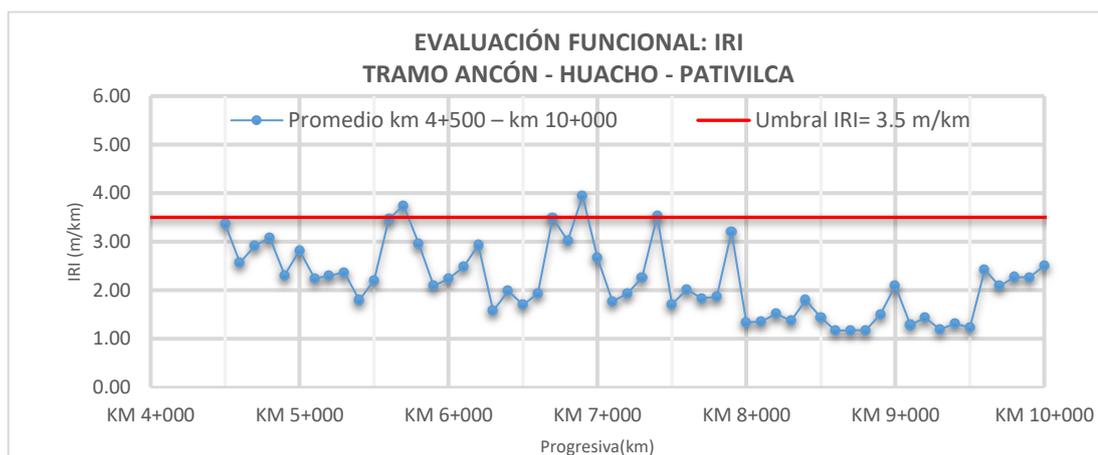


Figura 4.18. Promedio @ 100 metros km 4+500 – km 10+000 Norte-sur (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI media móvil @ 100m. En la figura 4.19, se puede observar los resultados de los valores de media móvil versus progresiva desde el km 4+500 hasta el km 10+000. Se obtuvo como valor promedio 2.26. El valor máximo es 3.36, el cual no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 1.35, mientras que la desviación estándar es 0.52.

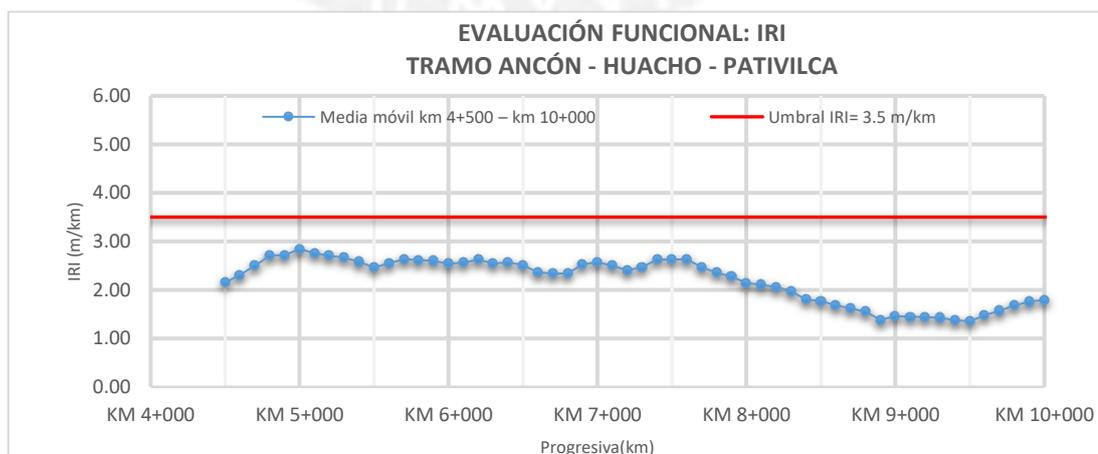


Figura 4.19. IRI Media móvil @ 100 metros km 4+500 – km 10+000 Norte-sur (Fuente propia)

4.2.2. Sector B: km 10+000 – km 16+000

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Huella izquierda @ 100m. En la figura 4.20, se puede observar los resultados de los valores individuales de la huella izquierda versus progresiva desde el km 10+000 hasta el km 16+000. Se obtuvo como valor promedio 1.76. El valor máximo es 3.10, el cual no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 0.97, mientras que la desviación estándar es 0.57.

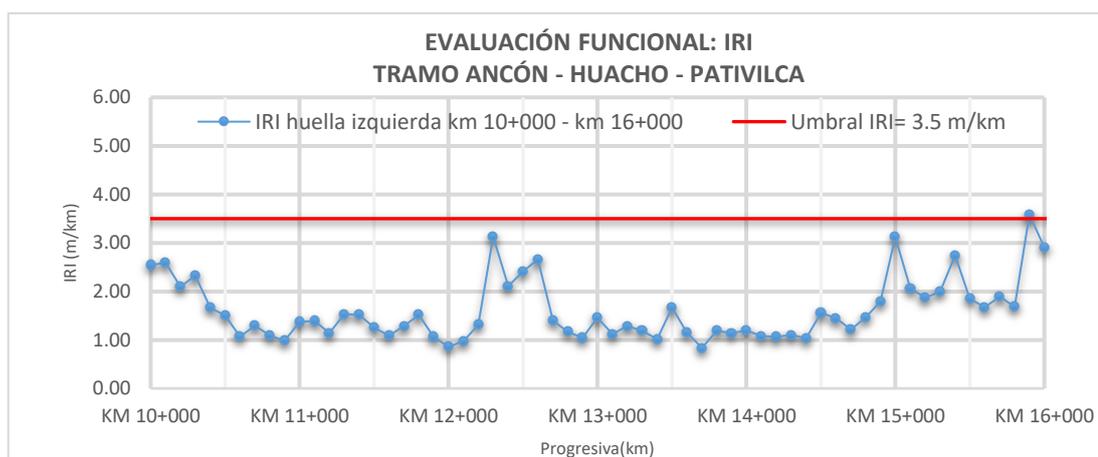


Figura 4.20. IRI Huella izquierda @ 100 metros km 10+ 000 – km 16+000 Norte-sur (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Huella derecha @ 100m. En la figura 4.21, se puede observar los resultados de los valores individuales de la huella derecha versus progresiva desde el km 10+000 hasta el km 16+000. Se obtuvo como valor promedio 1.58. El valor máximo es 3.59, el cual sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. Sin embargo, en el tramo es el único que sobrepasa el umbral permitido. El valor mínimo obtenido en el tramo es 0.84, mientras que la desviación estándar es 0.62.

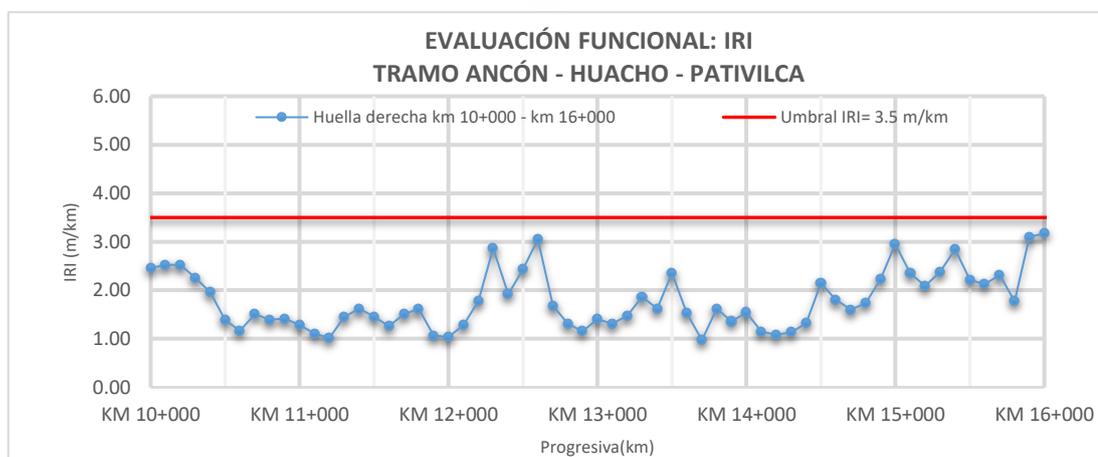


Figura 4.21. IRI Huella derecha @ 100 metros km 10+ 000 – km 16+000 Norte-sur (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Promedio @ 100m. En la figura 4.22, se puede observar los resultados de los valores individuales del promedio de huellas versus progresiva desde el km 10+000 hasta el km 16+000. Se obtuvo como valor promedio 1.67. El valor máximo es 3.34, el cual no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 0.90 mientras que la desviación estándar es 0.58.

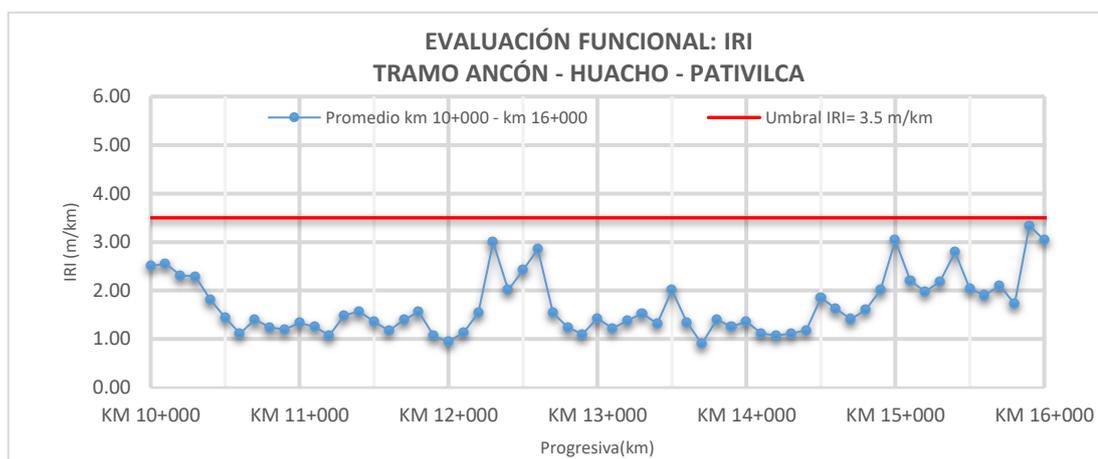


Figura 4.22. IRI Promedio @ 100 metros km 10+ 000 – km 16+000 Norte-sur (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI media móvil @ 100m. En la figura 4.23, se puede observar los resultados de los valores de media móvil versus progresiva desde el km 10+000 hasta el km 16+000. Se obtuvo como valor promedio 1.64. El valor máximo es 2.33, el cual no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 1.26, mientras que la desviación estándar es 0.32.

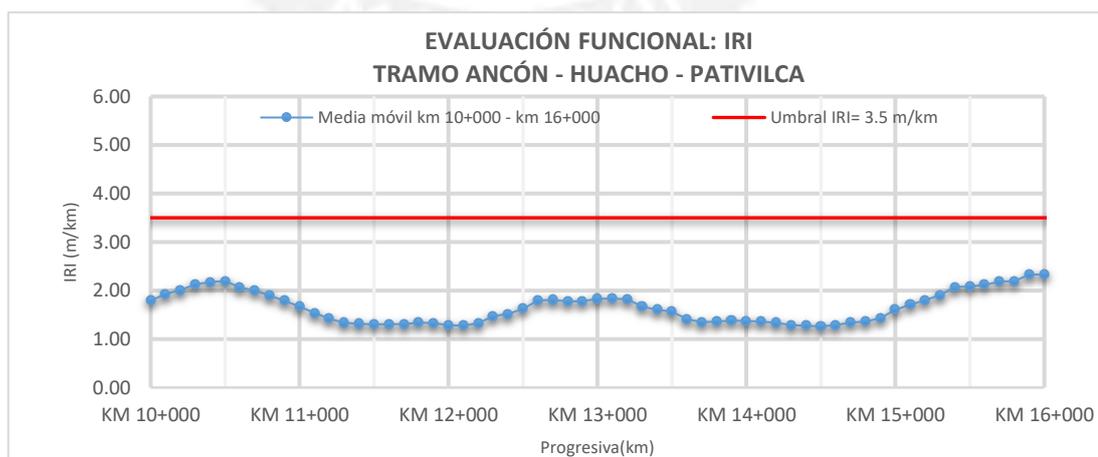


Figura 4.23. IRI Media móvil @ 100 metros km 10+ 000 – km 16+000 Norte-sur (Fuente propia)

4.2.3. Sector C: km 16+000 – km 22+250

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Huella izquierda @ 100m. En la figura 4.24, se puede observar los resultados de los valores individuales de la huella izquierda versus progresiva desde el km 16+000 hasta el km 22+250. Se obtuvo como valor promedio 2.25. El valor máximo es 4.31, el cual sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 0.96, mientras que la desviación estándar es 0.82.

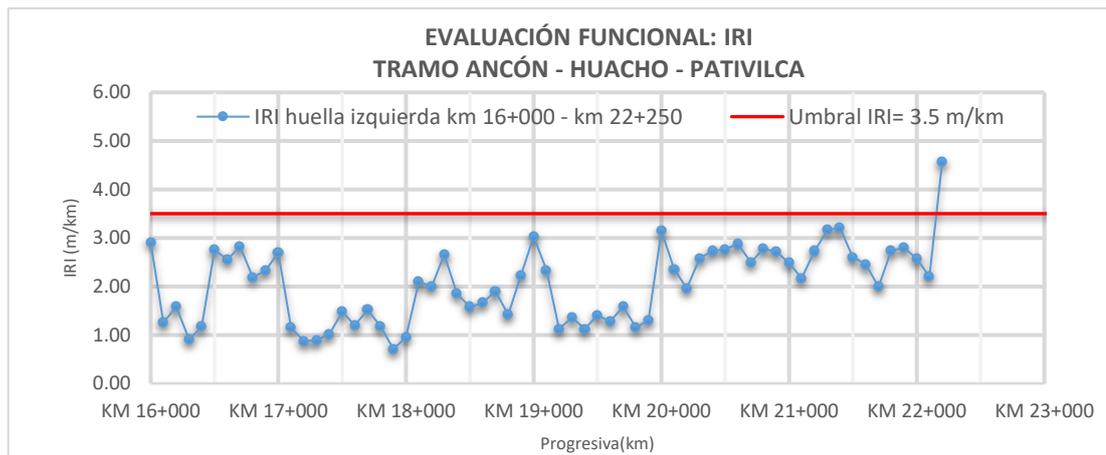


Figura 4.24. IRI Huella izquierda @ 100 metros km 16+000 – km 22+250 Norte-sur (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentín Pasamayo: IRI Huella derecha @ 100m. En la figura 4.25, se puede observar los resultados de los valores individuales de la huella derecha versus progresiva desde el km 16+000 hasta el km 22+250. Se obtuvo como valor promedio 2.25. El valor máximo es 4.31, el cual sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. Existen 3 valores que sobrepasan el umbral permitido. El valor mínimo obtenido en el tramo es 0.71, mientras que la desviación estándar es 0.78.

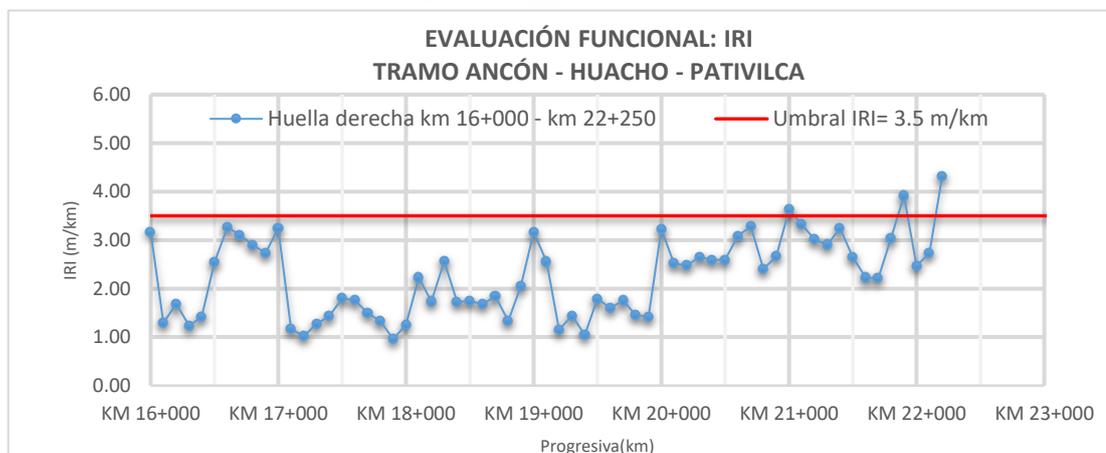


Figura 4.25. IRI Huella derecha @ 100 metros km 16+000 – km 22+250 Norte-sur (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentin Pasamayo: IRI Promedio @ 100m. En la figura 4.26, se puede observar los resultados de los valores individuales del promedio de huellas versus progresiva desde el km 16+000 hasta el km 22+250. Se obtuvo como valor promedio 2.15. El valor máximo es 4.44 el cual sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. Sin embargo, en el tramo es el único que sobrepasa el umbral permitido. El valor mínimo obtenido en el tramo es 0.83, mientras que la desviación estándar es 0.78.

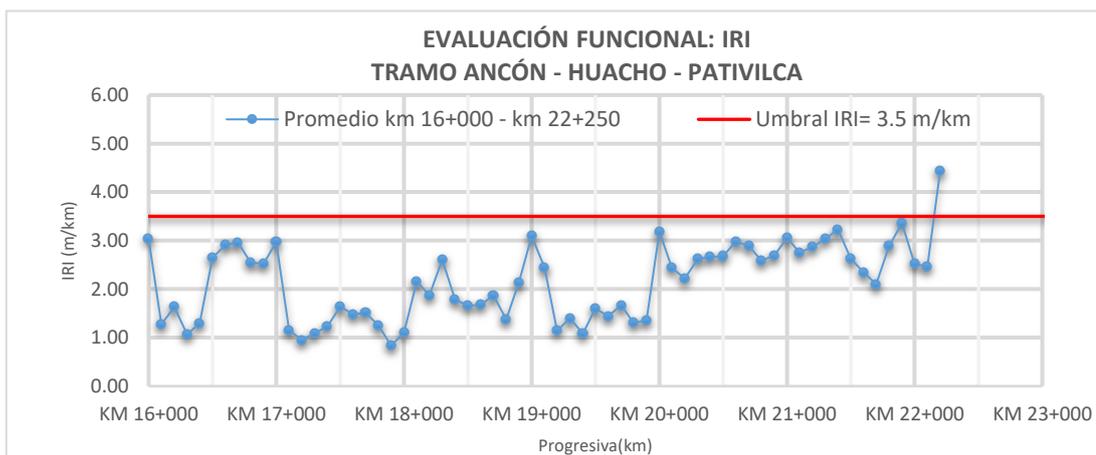


Figura 4.26. IRI Promedio @ 100 metros km 16+000 – km 22+250 Norte-sur (Fuente propia)

Medición de IRI cada 100 metros en el tramo Serpentin Pasamayo: IRI media móvil @ 100m. En la figura 4.27, se puede observar los resultados de los valores de media móvil versus progresiva desde el km 16+000 hasta el km 22+250. Se obtuvo como valor promedio 2.10. El valor máximo es 2.90, el cual no sobrepasa el umbral límite establecido que es 3.5 m/km. El valor mínimo obtenido en el tramo es 1.22, mientras que la desviación estándar es 0.45.

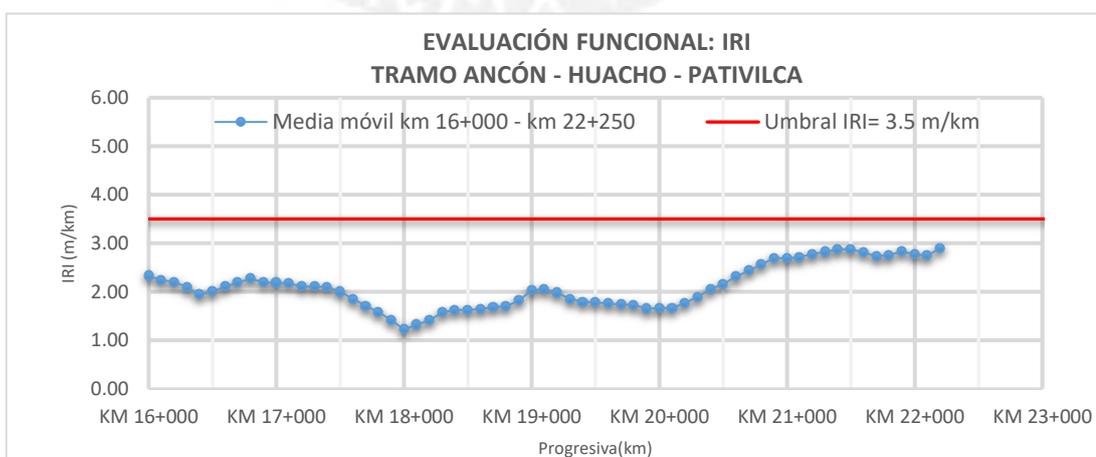


Figura 4.27. Media móvil @ 100 metros km 16+000 – km 22+250 Norte-sur (Fuente propia)

Resultados comparativos de IRI en el tramo Serpentin Pasamayo - Sentido norte-sur:

Comparación de IRI en huella izquierda, huella derecha, promedio de huellas y media móvil @ 100m

En la figura 4.28, se observa un gráfico comparativo entre el valor de IRI obtenido de la huella izquierda, huella derecha, promedio y media móvil desde el km 4+500 hasta el km 10+000 del carril con sentido norte-sur.

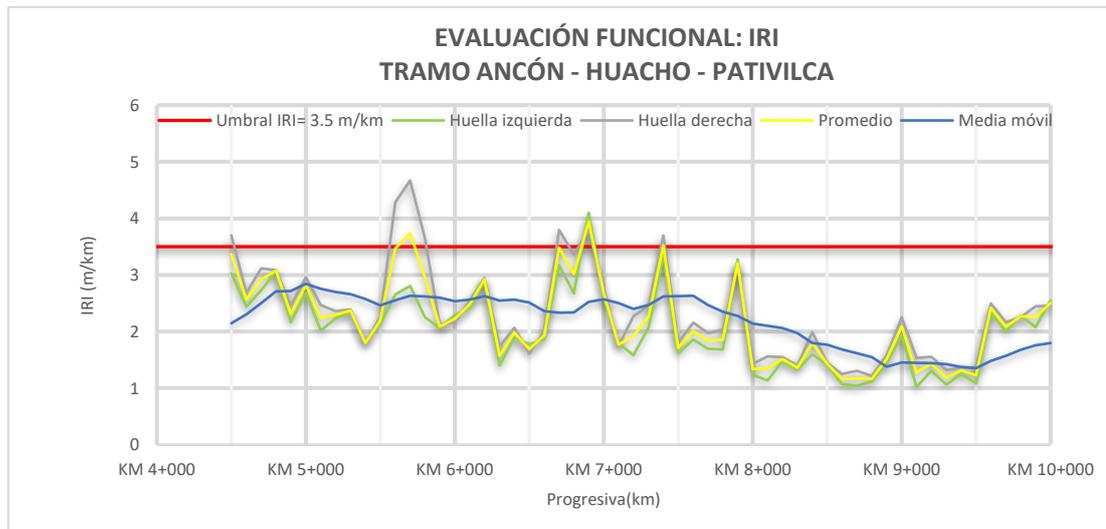


Figura 4.28. Gráfico comparativo entre el IRI de la huella izquierda, derecha, promedio y media móvil @100 metros km 4+500 – km 10+000 Norte-sur (Fuente propia)

En la figura 4.29, se observa un gráfico comparativo entre el valor de IRI obtenido de la huella izquierda, huella derecha, promedio y media móvil desde el km 10+000 hasta el km 16+000 del carril con sentido norte-sur.

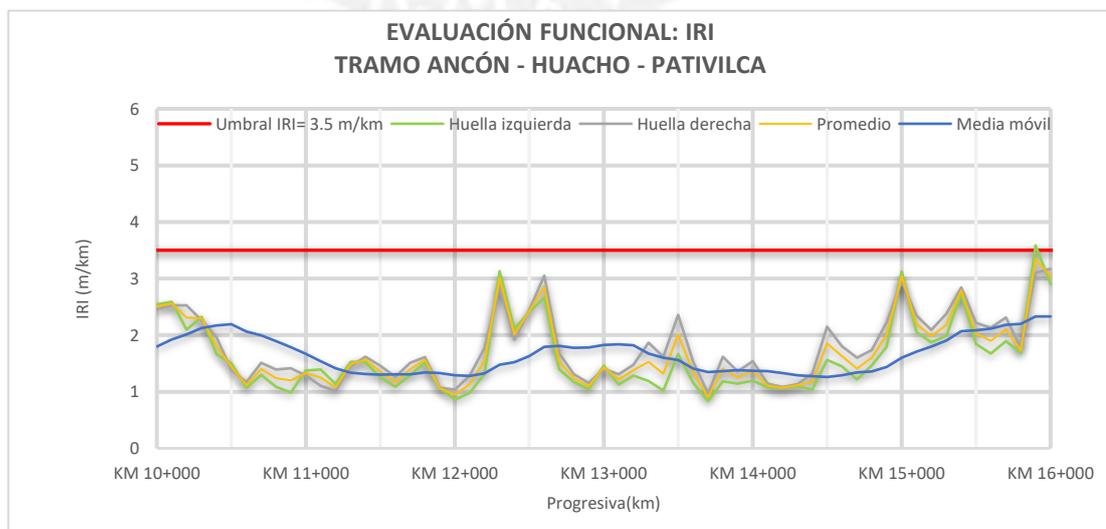


Figura 4.29. Gráfico comparativo entre el IRI de la huella izquierda, derecha, promedio y media móvil @100 metros km 10+000 – km 16+000 Norte-sur (Fuente propia)

En la figura 4.30, se observa un gráfico comparativo entre el valor de IRI obtenido de la huella izquierda, huella derecha, promedio y media móvil desde el km 16+000 hasta el km 22+250 del carril con sentido norte-sur.

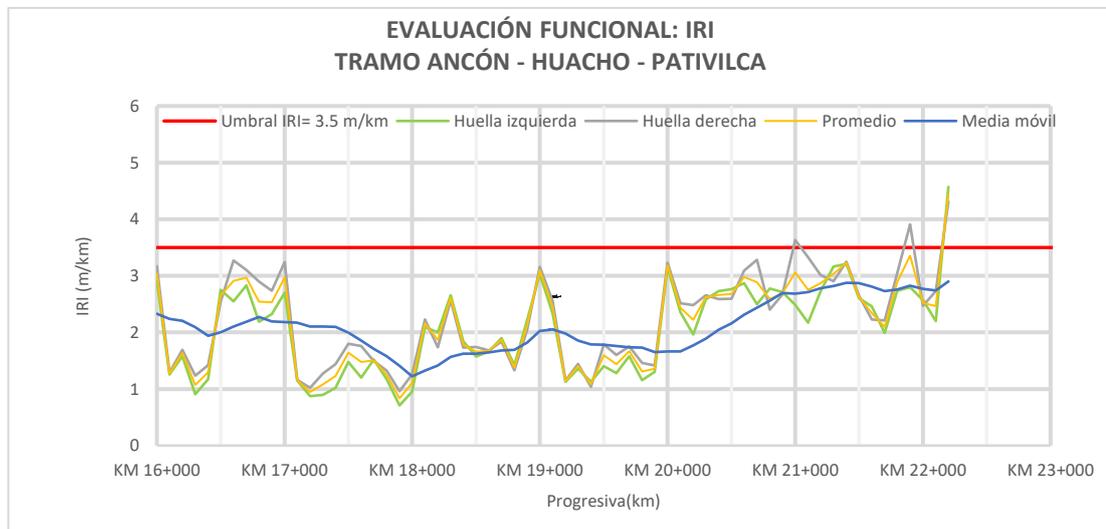


Figura 4.30. Gráfico comparativo entre el IRI de la huella izquierda, derecha, promedio y media móvil @100 metros km 16+000– km 22+250 Norte-sur (Fuente propia)



4.3. Análisis estadístico:

Resultados obtenidos a partir del análisis estadística a través de tablas de frecuencias relativas aplicadas a cada valor de IRI de huella (izquierda y derecha), promedio de huellas y media móvil, en cada sector (A, B y C) de ambas calzadas (sentido sur-norte y norte-sur).

4.3.1. Tramo Serpentin Pasamayo – Sentido sur-norte:

Sector A: km 4+500 – km 10+000

En la figura 4.31, se puede observar que la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 2.00 a 2.50 m/km con aproximadamente la cuarta parte del total de datos registrados, mientras que los valores límites mayores al umbral 3.50 m/km no superan el 0.1% del registro.

En la figura 4.32, se puede observar que la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 1.00 a 1.50 m/km con aproximadamente la cuarta parte del total de datos registrados, sin embargo, el porcentaje es similar en el rango de 1.00 a 3.00 m/km. Por otro lado, no hay presencia de valores mayores al umbral de 3.50 m/km.

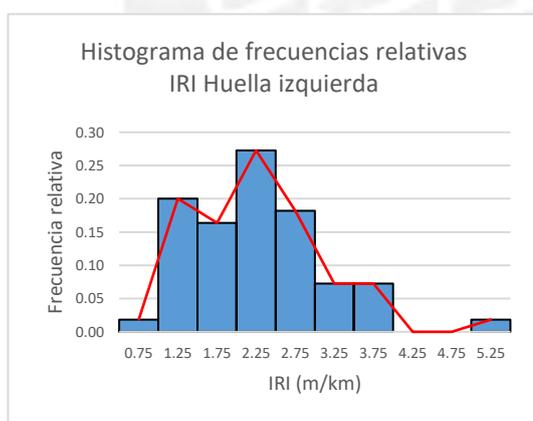


Figura 4.31. Histograma de frecuencias IRI Huella izquierda km 4+500 - km 10+000 Sur-norte (Fuente propia)

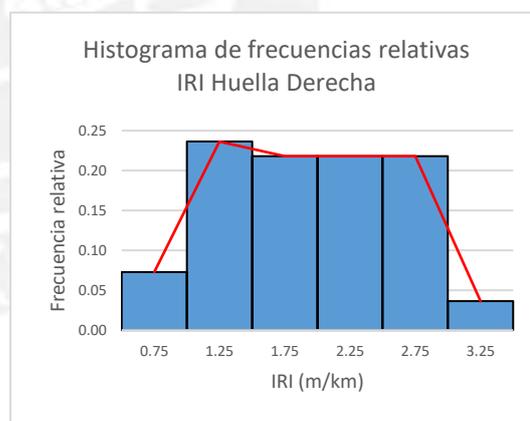


Figura 4.32. Histograma de frecuencias IRI Huella derecha km 4+500 - km 10+000 Sur-norte (Fuente propia)

En la figura 4.33, se puede observar que en el gráfico promedio la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 1.00 a 1.50 m/km con aproximadamente la cuarta parte del total de datos registrados. Sin embargo, se ve un porcentaje muy similar en el rango de 1.00 a 3.00 m/k. Por otro lado, no hay presencia de valores mayores al umbral de 3.50 a m/km.

En la figura 4.34, se puede observar una mayor concurrencia en la media del valor de IRI media móvil siendo el rango en el que se encuentra de 2.0 0 a 2.50 m/km.

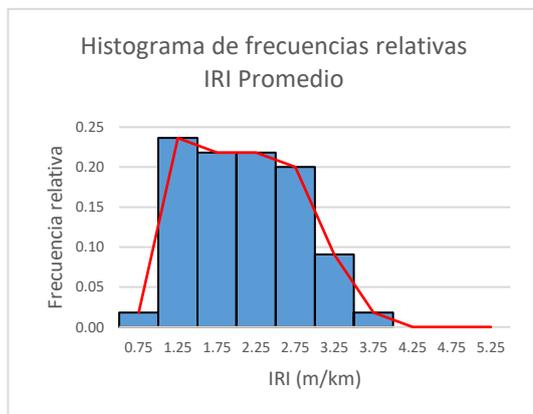


Figura 4.33. Histograma de frecuencias IRI Promedio km 4+500 - km 10+000 Sur-norte (Fuente propia)

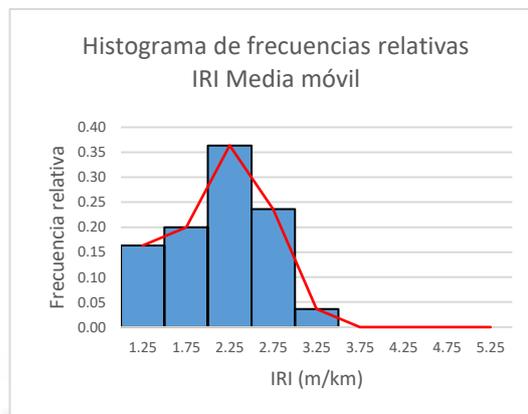


Figura 4.34. Histograma de frecuencias IRI Media móvil km 4+500 - km 10+000 Sur-norte (Fuente propia)

En tabla 4.1, se muestra un cuadro resumen con los valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar para la huella izquierda, huella derecha, promedio de huellas y media móvil desde el km 4+500 hasta el km 10+000 con sentido sur – norte. El valor más importante es el valor promedio de media móvil, el cual no debe superar el valor límite de 3.5 m/km; siendo el obtenido en este tramo de 2.20 m/km.

Tabla 4.1. Sector A – Sur-norte: km 4+500 – km 10+000

	Huella izquierda	Huella derecha	Promedio	Media móvil
Valor mínimo	0,91	0,94	0,96	1,31
Valor máximo	5,46	3,09	3,50	3,22
Promedio	2,27	1,95	2,11	2,20
Desviación estándar	0,87	0,63	0,69	0,56

Sector B: km 10+000 – km 16+000

En la figura 4.35, se puede observar que la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 1.00 a 1.50 m/km con aproximadamente la mitad del total de datos registrados, mientras que la presencia de valores mayores al umbral es nula.

En la figura 4.36, se puede observar que al igual que la sección anterior la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 1.00 a 1.50 m/km con más de la mitad

del total de datos registrados; mientras que la presencia de valores mayores al umbral permitido sigue siendo nula.

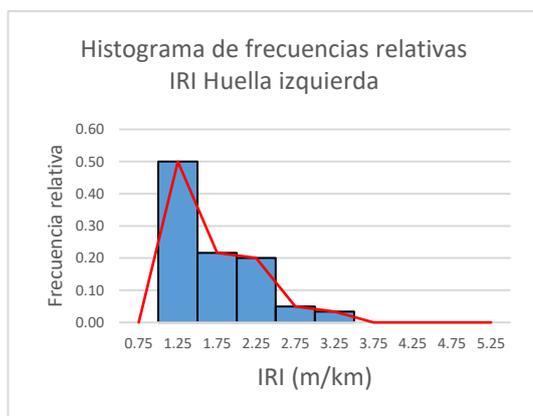


Figura 4.35. Histograma de frecuencias IRI Huella izquierda km 10+000 - km 16+000 Sur-norte (Fuente propia)

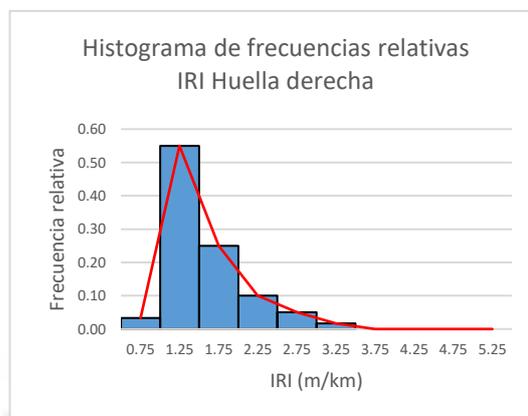


Figura 4.36. Histograma de frecuencias IRI Huella derecha km 10+000 - km 16+000 Sur-norte (Fuente propia)

En la figura 4.37, como se esperaba, en el gráfico promedio la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 1.00 a 1.50 m/km con aproximadamente la mitad del total de datos registrados. Por otro lado, en el rango de 1.00 a 2.50 m/km hay un 40 % del total de datos. Además, no hay presencia de valores mayores al umbral de 3.50 a m/km.

En la figura 4.38, se puede observar una mayor concurrencia en la media del valor de IRI media móvil, siendo el rango en el que se encuentra de 1.00 a 1.50 m/km.

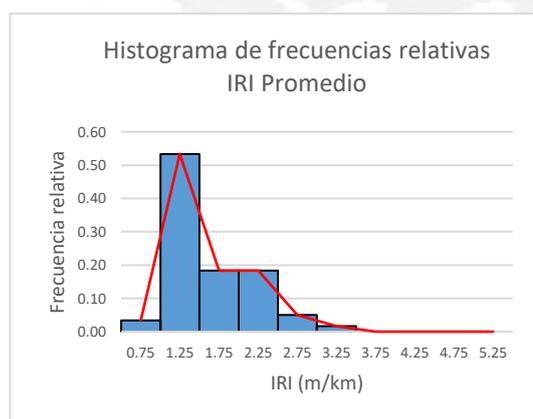


Figura 4.37. Histograma de frecuencias IRI promedio km 10+000 - km 16+000 Sur-norte (Fuente propia)

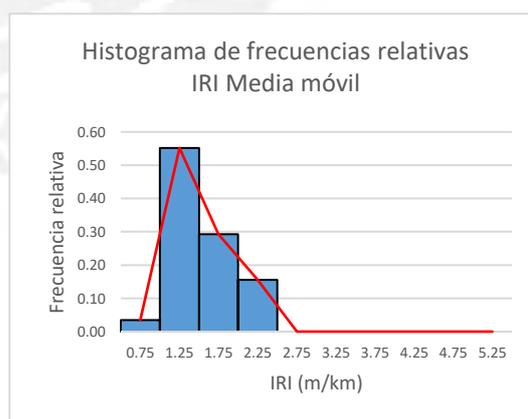


Figura 4.38. Histograma de frecuencias IRI Media móvil km 10+000 - km 16+000 Sur-norte (Fuente propia)

En tabla 4.2, se muestra un cuadro resumen con los valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar para la huella izquierda, huella derecha, promedio de huellas y media móvil desde el km 10+000 hasta km 16+000 con sentido sur –

norte. El valor más importante es el valor promedio de media móvil, el cual no debe superar el valor límite de 3.5 m/km; siendo el obtenido en este tramo de 1.61 m/km.

Tabla 4.2. Sector B – Sur-norte: km 10+000 – km 16+000

	Huella izquierda	Huella derecha	Promedio	Media móvil
Valor mínimo	1,00	0,85	0,94	1,16
Valor máximo	3,13	3,20	3,01	2,19
Promedio	1,65	1,56	1,61	1,61
Desviación estándar	0,55	0,53	0,53	0,31

Sector B: km 16+000 – km 22+250

En la figura 4.39, se puede observar que la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 1.00 a 1.50 m/km con aproximadamente la cuarta parte del total de datos registrados, mientras que la presencia de valores mayores al umbral es considerablemente mayor que en anteriores casos, llegando hasta un 1% de los datos registrados.

En la figura 4.40, se puede observar que al igual que la sección anterior la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 2.50 a 3.00 m/km con casi la cuarta parte del total de datos registrados; mientras que la presencia de valores mayores al umbral permitido es nula.

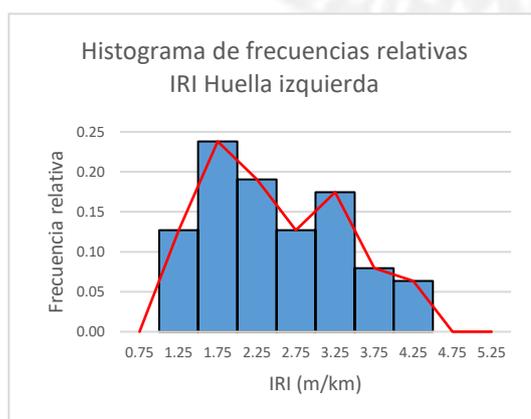


Figura 4.39. Histograma de frecuencias IRI Huella izquierda km 16+000 - km 22+250 Sur-norte (Fuente propia)

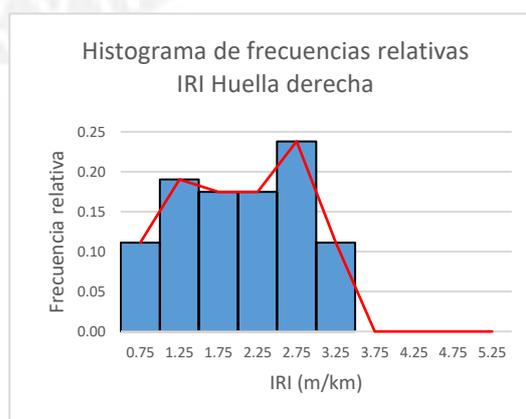


Figura 4.40. Histograma de frecuencias IRI Huella derecha km 16+000 - km 22+250 Sur-norte (Fuente propia)

En la figura 4.41, la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 1.00 a 1.50 m/km con aproximadamente la cuarta parte del total de datos registrados. Sin embargo, el valor comprendido en el rango de 3.00 a 3.50 es considerablemente cercano llegando a un 20 % del total. La homogeneidad en cantidad de datos y un valor promedio mayor a los datos anteriores muestra que este sector es el de mayor regularidad.

En la figura 4.42, se puede observar una mayor concurrencia en la media del valor de IRI media móvil, siendo el rango en el que se encuentra de 1.50 a 2.50 m/km. Sin embargo, si bien no se sobrepasa el valor umbral en la media móvil, el punto más alto, 3.24, se encuentra muy cercano al límite.

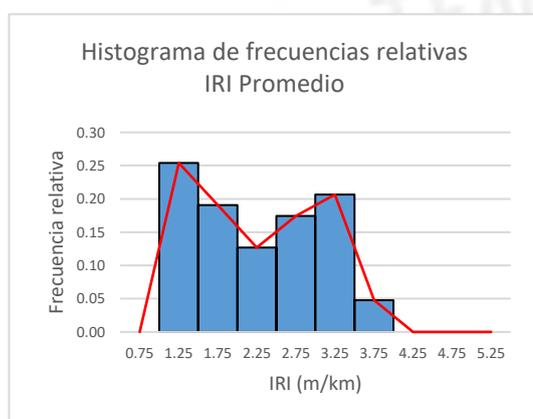


Figura 4.42. Histograma de frecuencias IRI Promedio km 16+000 - km 22+250 Sur-norte (Fuente propia)

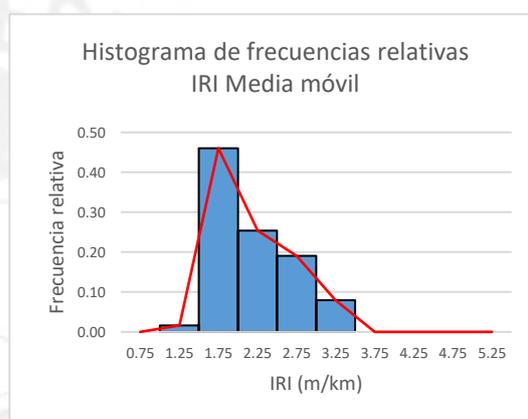


Figura 4.41. Histograma de frecuencias IRI Media móvil km 16+000 - km 22+250 Sur-norte (Fuente propia)

En tabla 4.3. Se muestra un cuadro resumen con los valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar para la huella izquierda, huella derecha, promedio de huellas y media móvil desde el km 16+000 hasta km 22+250 con sentido sur – norte. El valor más importante es el valor promedio de media móvil, el cual no debe superar el valor límite de 3.5 m/km; siendo el obtenido en este tramo de 2.18 m/km.

Tabla 4.3. Sector C – Sur-norte: km 16+000 – km 22+250

	Huella izquierda	Huella derecha	Promedio	Media móvil
Valor mínimo	1,12	0,66	1,02	1,49
Valor máximo	4,39	3,44	3,88	3,24
Promedio	2,51	2,02	2,26	2,18
Desviación estándar	0,90	0,78	0,80	0,51

4.3.2. Tramo Serpentin Pasamayo – Sentido norte-sur:

Sector A: km 4+500 – km 10+000

En la figura 4.43, se puede observar que la mayor concurrencia de datos se da en dos rangos, el primero de 1.00 a 1.50 m/km y el segundo de 2.00 a 2.50 m/km; ambos con un 27 % del total de datos registrados. En general, los datos son muy homogéneos, sin embargo, hay presencia de valores mayores al umbral mas no llegan a un valor a considerar (menor 0.05%)

En la figura 4.44, se puede observar que al igual que la sección anterior la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 2.00 a 2.50 m/km con más de la tercera parte total de datos registrados; mientras que la presencia de valores mayores al umbral permitido alcanza aproximadamente el 1% de datos registrados.

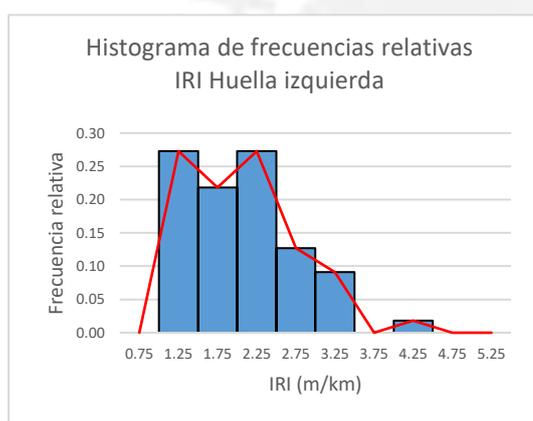


Figura 4.43. Histograma de frecuencias IRI Huella izquierda km 4+500 - km 10+000 Norte-sur (Fuente propia)

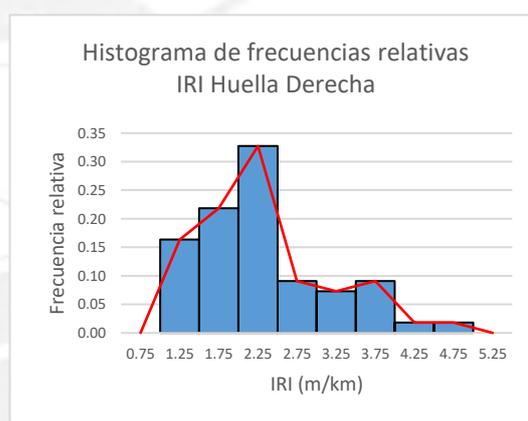


Figura 4.44. Histograma de frecuencias IRI Huella derecha km 4+500 - km 10+000 Norte-sur (Fuente propia)

En la figura 4.45, la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 2.00 a 2.50 m/km con aproximadamente la cuarta parte del total de datos registrados. Sin embargo, el valor comprendido en el rango de 1.00 a 2.50 m/km es considerablemente el de mayor concurrencia llegando a un 65 % del total.

En la figura 4.46, se puede observar una mayor concurrencia en la media del valor de IRI media móvil, siendo el rango en el que se encuentra de 2.50 a 3.00 m/km. Si bien no se sobrepasa el valor umbral en la media móvil, la concurrencia de la media móvil en este tramo es de suma consideración ya que es el tramo con mayor porcentaje de valores de IRI más cercanos al umbral.

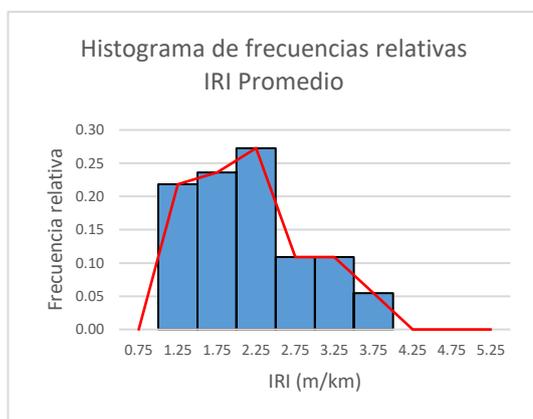


Figura 4.46. Histograma de frecuencias IRI Promedio km 4+500 - km 10+000 Norte-sur (Fuente propia)

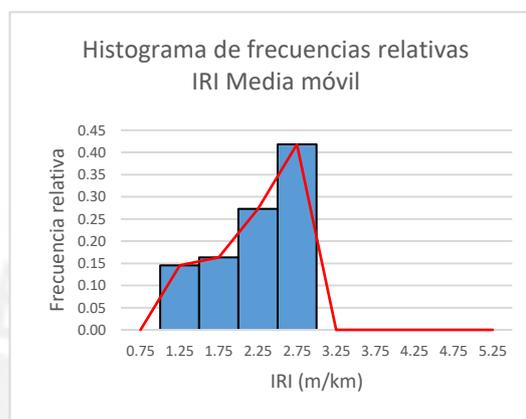


Figura 4.45. Histograma de frecuencias IRI Media móvil km 4+500 - km 10+000 Norte-sur (Fuente propia)

En tabla 4.4. Se muestra un cuadro resumen con los valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar para la huella izquierda, huella derecha, promedio de huellas y media móvil desde el km 4+500 hasta km 10+000 con sentido norte-sur. El valor más importante es el valor promedio de media móvil, el cual no debe superar el valor límite de 3.5 m/km; siendo el obtenido en este tramo de 2.26 m/km.

Tabla 4.4. Sector A – Norte-sur: km 4+500– km 10+000

	Huella izquierda	Huella derecha	Promedio	Media móvil
Valor mínimo	1,22	1,02	1,16	1,35
Valor máximo	4,67	4,10	3,94	3,36
Promedio	2,32	2,03	2,17	2,26
Desviación estándar	0,83	0,70	0,74	0,52

Sector B: km 10+000 – km 16+000

En la figura 4.47, se puede observar que la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 1.00 a 1.50 m/km con una clara mayoría en porcentaje (más del 50% de los

datos registrados). Se ve claramente que este tramo es uno de los que mejor nivel de regularidad presenta.

En la figura 4.48, se puede observar que al igual que la sección anterior la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 1.00 a 1.50 m/km con gran amplitud marcando un 40% del total de datos registrados; mientras que la presencia de valores mayores al umbral permitido es nula.

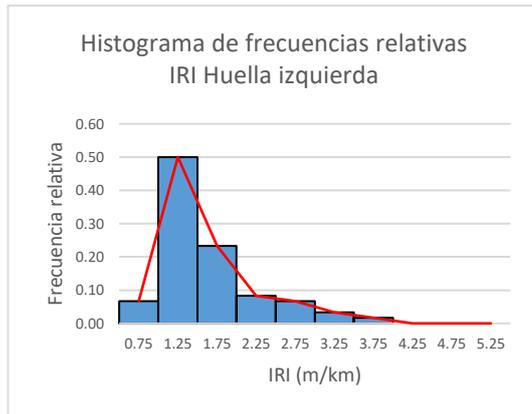


Figura 4.47. Histograma de frecuencias IRI Huella izquierda km 10+000 - km 16+000 Norte-sur (Fuente propia)

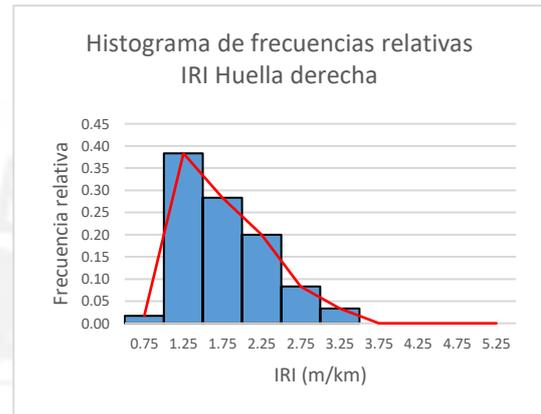


Figura 4.48. Histograma de frecuencias IRI Huella derecha km 10+000 - km 16+000 Norte-sur (Fuente propia)

En la figura 4.49, la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 1.00 a 1.50 m/km con casi la mitad de los datos. Este valor es el de mayor influencia tanto en las huellas izquierdas y derechas; así como en el promedio.

En la figura 4.50, como se puede esperar la mayor concurrencia en la media del valor de IRI media móvil, siendo el rango en el que se encuentra de 1.00 a 1.50 m/km. El valor obtenido es el de mejor calidad obtenida en todo el recorrido.

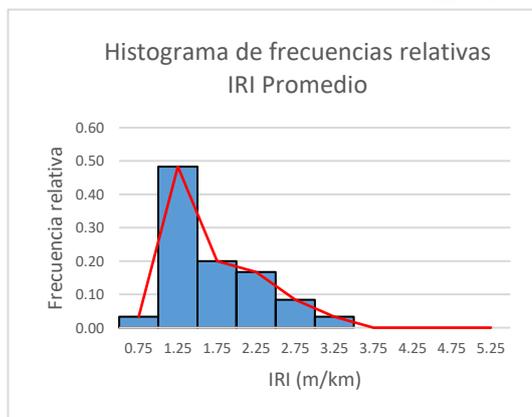


Figura 4.49. Histograma de frecuencias IRI Promedio km 10+000 - km 16+000 Norte-sur (Fuente propia)

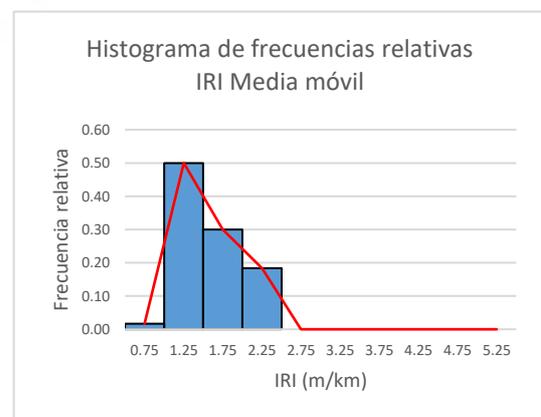


Figura 4.50. Histograma de frecuencias IRI Promedio km 10+000 - km 16+000 Norte-sur (Fuente propia)

En tabla 4.5, se muestra un cuadro resumen con los valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar para la huella izquierda, huella derecha, promedio de huellas y media móvil desde el km 10+000 hasta km 16+000 con sentido norte-sur. El valor más importante es el valor promedio de media móvil, el cual no debe superar el valor límite de 3.5 m/km; siendo el obtenido en este tramo de 1.64 m/km.

Tabla 4.5. Sector B – Norte-sur: km 10+000 – km 16+000

	Huella izquierda	Huella derecha	Promedio	Media móvil
Valor mínimo	0,97	0,84	0,90	1,26
Valor máximo	3,10	3,59	3,34	2,33
Promedio	1,76	1,58	1,67	1,64
Desviación estándar	0,57	0,62	0,58	0,32

Sector B: km 16+000 – km 22+250:

En la figura 4.51, se puede observar que la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 2.50 a 3.00 m/km con una clara mayoría en porcentaje (más del 30% de los datos registrados). Sin embargo, el rango entre 1.00 a 1.50 m/km está aproximadamente igual a 25%, lo cual muestra resultados homogéneos en toda la sección.

En la figura 4.52, se puede observar que la mayor concurrencia de datos se da en el rango de 1.00 a 1.50 m/km con gran amplitud marcando un 25% del total de datos registrados, muy similar a lo presentado en la sección anterior. Por otro lado, la presencia de valores mayores al umbral es mínima.

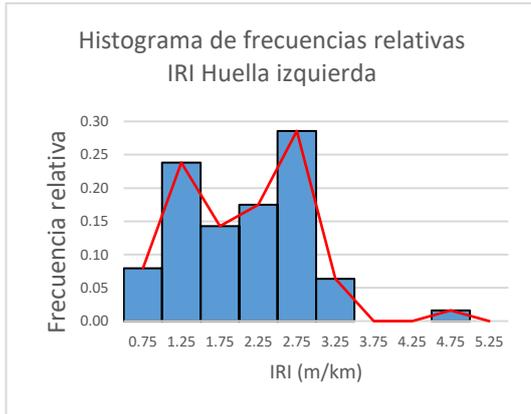


Figura 4.51. Histograma de frecuencias IRI Huella izquierda km 16+000 - km 22+250 Norte-sur (Fuente propia)

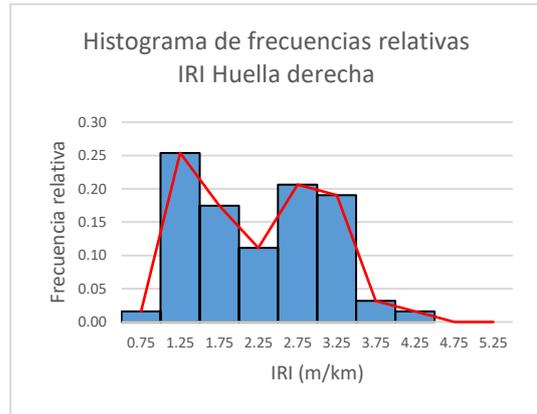


Figura 4.52. Histograma de frecuencias IRI Huella derecha km 16+000 - km 22+250 Norte-sur (Fuente propia)

En la figura 4.53, la mayor concurrencia de datos se reparte en dos rangos muy similares. El primero está entre 1.00 a 1.50 m/km y el segundo entre 2.50 a 3.00 m/km abarcando cada uno más del 30% de datos registrados. Cabe resaltar la ausencia de valores límites mayores al umbral permitido.

En la figura 4.54, como se puede esperar el mayor porcentaje de frecuencia se encuentra en el rango 1.50 a 2.50 m/km obteniéndose un aproximado del 75% de los datos registrados; mientras que la presencia de valores mayores al permitido sigue siendo nula.

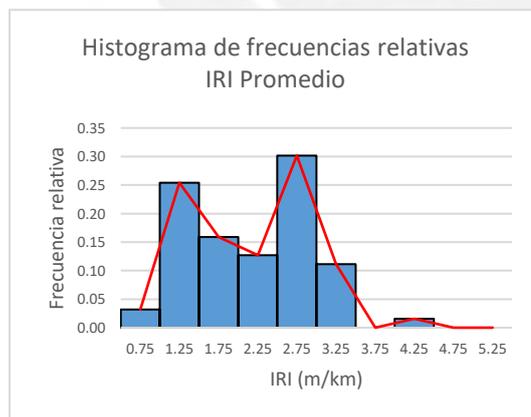


Figura 4.53. Histograma de frecuencias IRI Promedio km 16+000 - km 22+250 Norte-sur (Fuente propia)

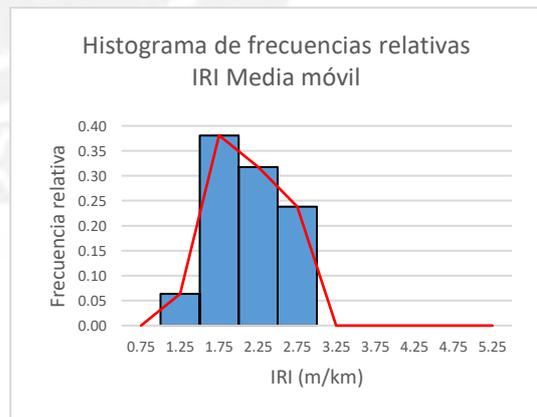


Figura 4.54. Histograma de frecuencias IRI Media móvil km 16+000 - km 22+250 Norte-sur (Fuente propia)

En tabla 4.6, se muestra un cuadro resumen con los valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar para la huella izquierda, huella derecha, promedio de huellas y media móvil desde el km 16+000 hasta km 22+250 con sentido norte-

sur. El valor más importante es el valor promedio de media móvil, el cual no debe superar el valor límite de 3.5 m/km; siendo el obtenido en este tramo de 2.18 m/km.

Tabla 4.6. Sector C – Norte-sur: km 16+000 – km 22+250

	Huella izquierda	Huella derecha	Promedio	Media móvil
Valor mínimo	0.71	0.96	0.83	1.22
Valor máximo	4.57	4.31	4.44	2.90
Promedio	2.05	2.25	2.15	2.10
Desviación estándar	0.78	0.82	0.78	0.45

Si bien el desarrollo estadístico se ha realizado por sectores, es necesario realizar un análisis en todo el tramo realizado, para poder tener la idea global de cómo es que se comporta la carretera en función a la variable IRI media móvil.

En la figura 4.55, se presenta, un histograma de frecuencias en todo el recorrido del tramo Serpentin Pasamayo con sentido sur – norte. Podemos observar que la mayor concurrencia de datos se encuentra en el rango de 1.50 a 2.00 m/km, abarcando un aproximado del 35% del total de datos. De esta manera, los resultados son acorde al promedio del tramo 2.00 m/km. Por otro lado, los valores máximos (mayores a 3.50) como se esperaba, presentan nula influencia en ningún parte del tramo Serpentin Pasamayo sentido sur-norte. Estos resultados nos muestran un claro alto índice de servicio en todo el recorrido, lo cual es beneficioso para el adecuado transporte de los usuarios.

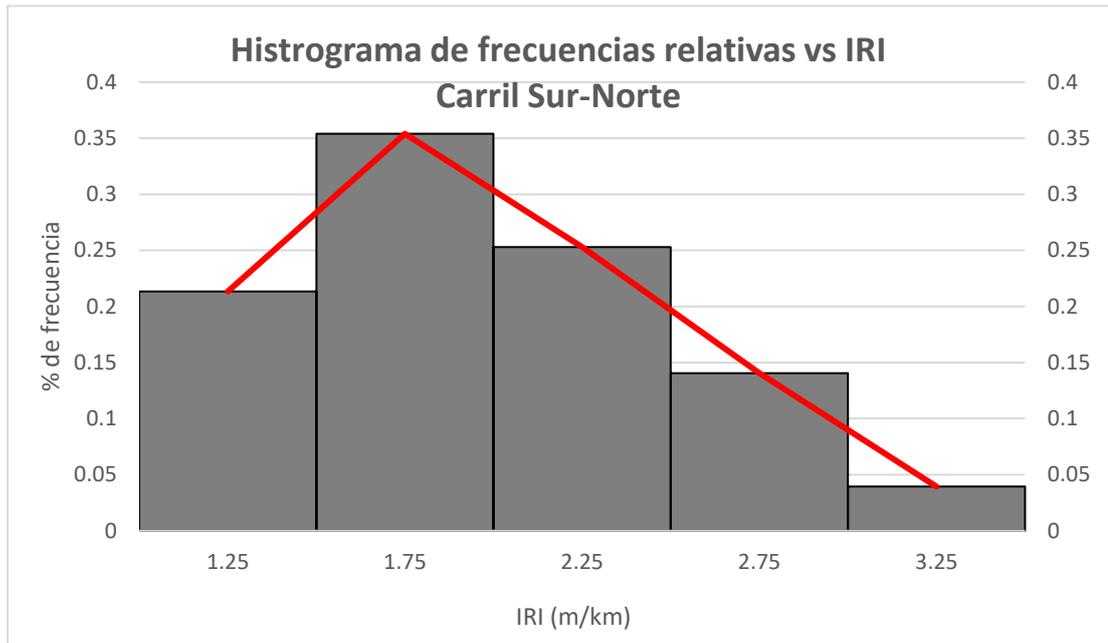


Figura 4.55. Histograma de frecuencias relativas en el tramo Serpentín Pasamayo km 4+500 – km 22+250, con sentido sur-norte (Fuente propia)

En la figura 4.56, se presenta el histograma de frecuencias en todo el recorrido del tramo Serpentín Pasamayo con sentido norte-sur. Podemos observar que la mayor concurrencia de datos se encuentra repartida equitativamente desde los valores de 1.00 hasta 3.00 m/km, cubriendo el 100% de los datos. Sin embargo, el valor pico se encuentra en el rango de 1.50 a 2.00 m/km con un 32% del total de datos. Por otro lado, los valores máximos (mayores a 3.50) como se esperaba, presentan nula influencia en ningún parte del tramo Serpentín Pasamayo sentido sur-norte.

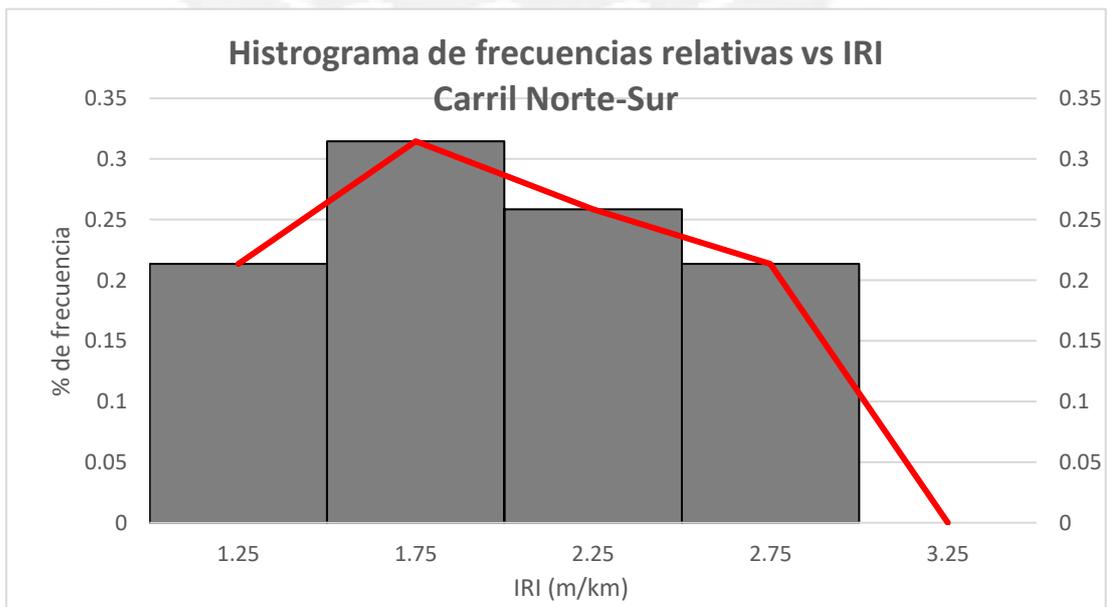


Figura 4.56. Histograma de frecuencias relativas en el tramo Serpentín Pasamayo km 4+500 – km 22+250, con sentido norte-sur (Fuente propia)

Esto nos muestra una homogeneidad en el tramo norte-sur mucho mayor que en el tramo sur-norte; sin embargo, el valor promedio obtenido en el primer caso es menor al presente.

4.4. Resultados de las encuestas de confortabilidad

Los resultados obtenidos de las encuestas de confortabilidad se muestran a continuación en gráficos que ejemplifican mejor la percepción del usuario respecto al tramo Serpentín-Pasamayo de la concesión de la red vial N°5.

En la figura 4.57, se puede observar que la mayoría de personas (46%) piensan que el nivel de seguridad y confort que brinda el pavimento en este tramo es intermedio mientras que un 27% califica el estado de la vía como bueno. Por otro lado, la percepción mala es calificada solamente por un 15% de los usuarios; sin embargo, es un valor considerable en cuanto a la opinión.

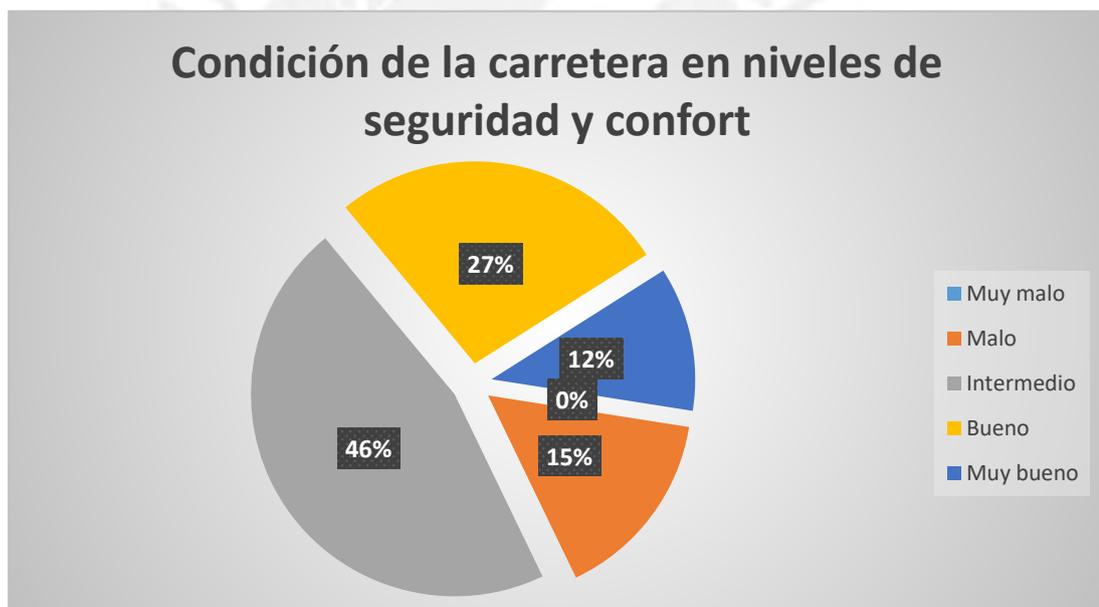


Figura 4.55. Gráfico de la percepción del usuario respecto a la condición de la carretera (Fuente propia, 2016)

En la figura 4.58, se puede observar que el gran porcentaje de los usuarios (65%) consideran que el flujo vehicular de tránsito pesado debe realizarse a una velocidad de 60 km/h; mientras que solo un 8% considera que se permite viajar a la velocidad de 80km/h. Por otro lado, solo una minoría del 4% considera un perfil más seguro viajando a una velocidad de 40 km/h.

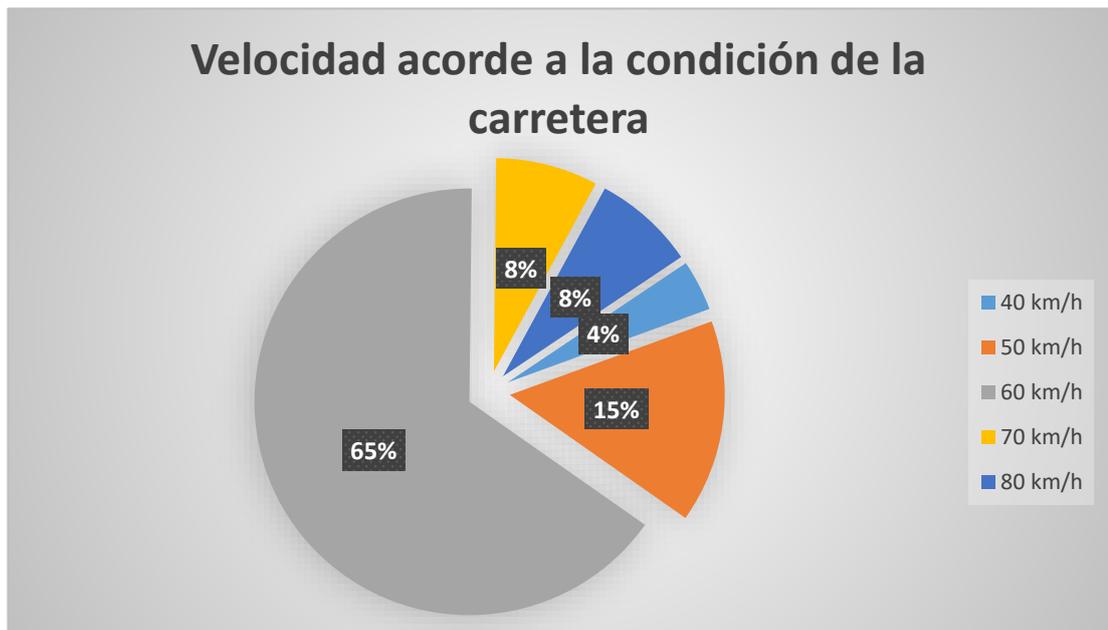


Figura 4.56. Velocidad acorde a la condición de la carretera (Fuente propia, 2016)



CAPITULO 5. Conclusiones y observaciones

Se esperaba que los valores de las huellas izquierda y derecha sean relativamente similares, después de observar los resultados obtenidos en el capítulo 4, se concluye la similitud esperada en ambas huellas. (Gráficos 4.13, 4.14, 4.15, 4.28, 4.29 y 4.30.) Sin embargo, existen tramos con cierta diferencia. Esta diferencia es válida especialmente en tramos curvos, debido a la posible variación de la progresiva y que, en estas secciones, el recorrido de todos los vehículos tiende a ser muy variable.

En el tramo Serpentin Pasamayo - Sentido sur – norte, los valores de IRI media móvil obtenidos en este tramo, se encuentran por debajo del umbral de 3.5 m/km en su totalidad. Sin embargo, es importante resaltar que hay valores individuales tanto de la huella izquierda como de la huella derecha que si sobrepasan el límite de 3.5 m/km. Como se mencionó en el capítulo 2.6, los valores que rigen en los términos de referencia del contrato son los valores de media móvil.

Estos valores críticos, se concluye que pueden ser originados debido a las consideraciones propias del perfilómetro láser. Al inicio del tramo se esperaban valores más altos de lo normal debido a que al iniciar las mediciones la velocidad del vehículo no alcanza la velocidad mínima de medición (20 km/h), por lo que los valores individuales en este tramo, tienden a ser mayores al de media móvil.

Como se observó en cada sector (A, B y C), los promedios de IRI media móviles correspondientes son: 2.20, 1,61 y 2,26 respectivamente. Este resultado nos muestra un mejor índice de servicio en el tramo central, mientras que los tramos iniciales y finales se encuentra ligeramente menor.

Asimismo, podemos observar que la desviación estándar para cada sector (A, B y C), son: 0.56, 0.31 y 0.51. Podemos concluir que el tramo central presenta menor variabilidad de datos, lo que conlleva a un sector más homogéneo en todo su recorrido.

Según el análisis estadístico expuesto en el capítulo 4.3, se concluye que la mayor concurrencia de datos se encuentra en el rango de 1.00 a 1.50 m/km lo que demuestra valores muy por lo bajo del umbral exigido en norma y contrato, que es 3.50 m/km.

En el tramo Serpentin Pasamayo - Sentido norte-sur, los valores de IRI media móvil obtenidos en este tramo, se encuentran por debajo del umbral de 3.5 m/km en su

totalidad, al igual que el tramo en sentido sur-norte. Sin embargo, en inicio del tramo, es importante resaltar que hay valores individuales tanto de la huella izquierda como de la huella derecha que si sobrepasan el límite de 3.5 m/km.

Se tiene como promedio de toda la sección desde el km 4+500 hasta el km 22+250, un valor de 2.00 m/km y una desviación estándar de 0.5 en valores de IRI media móvil. Como se observó en cada sector (A, B y C), los promedios de IRI media móviles correspondientes son: 2.26, 1.64 y 2.10 respectivamente. Este resultado nos muestra un mejor índice de servicio en el tramo central, mientras que los tramos iniciales y finales se encuentra ligeramente menor. Asimismo, podemos observar que la desviación estándar para cada sector (A, B y C), son: 0.52, 0.32 y 0.45. Podemos concluir que el tramo central presenta menor variabilidad de datos, lo que conlleva a un sector más homogéneo en todo su recorrido.

Los resultados obtenidos de la estadística nos permite concluir que la sección intermedia (B) es la que se encuentra en mejor estado (IRI=1.64 sentido norte-sur e IRI=1.61 sentido sur.-norte). Este valor es un índice muy alto incluso para la carretera en la que únicamente circulan vehículos de carga pesada. Según el Manual de transportes y el contrato, y normas internacionales como la americana y española; valores por debajo de 2.00 m/km indican un nivel de servicio muy alto.

Si bien se ha obtenido una calificación objetiva de la condición de la carretera, es necesario realizar otras evaluaciones que permitan identificar otros parámetros de medición como lo son el ahuellamiento, fallas en el pavimento, retroreflectividad, fricción. Así, se pueda medir el nivel de servicio de una carretera que nos indique si es necesario realizar un mantenimiento inmediato a la carretera. Por lo que se recomienda realizar las mediciones mencionadas y corroborar los sectores críticos. Se recomienda realizar una nueva medición dentro de 6 meses para corroborar el estado de la carretera, e inspeccionar los sectores críticos obtenidos de los gráficos IRI vs Punto kilométrico.

Se esperaba que la percepción objetiva fuera similar a la percepción subjetiva obtenida a través de las encuestas; sin embargo, hay ciertas opiniones que consideran la calidad de la carretera en mal estado. Cabe mencionar que durante la medición varios usuarios no podían separar la idea de condición de pavimento con factores externos que no determinan la regularidad superficial. Además, las encuestas, reflejaron que la velocidad que primaba para el seguro desplazamiento

en la carretera era de 60 km/h, abarcando un 65% de la cantidad muestreada. Esto se puede reflejar en términos de regularidad superficial por medio de la figura 2.4.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Norma Técnica Española. (1998). NLT-330/98: Cálculo del Índice de regularidad internacional (IRI) en pavimentos de carreteras. España.

Activa Ingeniería y Construcción. (2015). <http://activaic.pe/galeria-audiovisual/#1496953967168-40fae5d5-a95f>. Obtenido de <http://activaic.pe/galeria-audiovisual/#1496953967168-40fae5d5-a95f>

Corros, M., Urbáez, E., & Corredor, G. (2009). Manual de evaluación de pavimentos. Empresa MAYER 97 Ingenieros Asociados, C.A.

Crespo del Río, R. (1999). Calidad ante la rodadura. Carreteras, Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera.

Del Águila Rodríguez, P. (1999). Experiencias y resultados obtenidos en la evaluación de la rugosidad de más de 3000km de pavimentos en el Perú y otros países. Ponencia presentada al X Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto,(págs. 1-2): España.

Dirección de Vialidad, M. d. (2015). Manual de carreteras. Chile: Volumen N°8: Especificaciones y Métodos de muestreo, ensayo y control.

Gillespie, T. D. (1992). Everything you always wanted to know about the IRI, but were afraid to ask. The University of Michigan Transportation Research Institute: Nebraska.

Google Earth. (2016). Tramos Serpetín-Pasamayo Red Vial N°5 Ancón-Huachopativilca. Lima.

Gutiérrez, T., & Arce, M. (2004). Índice de regularidad internacional. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales: Costa Rica.

Instituto mexicano del Cemento y del Concreto. (2009). Pavimentos de concreto hidraúlico. México.

Kohler, E. (2016). Medición de Irregularidad Superficial en Pavimentos de Aeropuertos, Viales y Ciclovías. Ingeniería de Transporte. Ingeniería de Transportes.

Martínez, S., & Tobón, J. (2012). Análisis de la problemática actual para el cumplimiento de la regularidad superficial en proyectos viales. L'esprit Ingénieur.

Mertz, W. R. (2015). Perfilómetro inercial láser basado en LabVIEW y PXI para la caracterización de pavimentos en Infraestructura vial. Lima: HOB Innova Control de calidad y gestión de pavimentos.

Ministerio de Fomento, D. G. (2014). Pliego de Prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). España.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). Manual de Inventarios viales. [http://www.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manual es/Manual%20de%20Inventarios%20Viales_Aprobado_Version%20Digital%20del%20Original.pdf](http://www.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manual%20de%20Inventarios%20Viales_Aprobado_Version%20Digital%20del%20Original.pdf).

Nava, I. (2007). Diseño e integración de un sistema de adquisición de datos . Tesis (Magister) Universidad Nacional Autónoma de México: México.

Norma internacional ASTM E950/950M-09. (2009). ASTM E950/950M-09: Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference. [astm.org](http://www.astm.org). ASTM International.

Obando, W. (2010). Experiencia en ejecución de contratos por resultados. II Seminario Internacional " Conservación vial por resultados y nuevas tecnologías": Lima.

OSITRAN. (2006). Organismo Supervisor de la Inversión e Infraestructura de Transporte de Uso Público. <http://www.ositran.gob.pe/joomlatools-files/docman-files//RepositorioAPS/0/0/par/TUO-NORVIAL/TUO-NORVIAL.pdf>.

OSITRAN-NORVIAL. (2015). Contrato de concesión. https://www.ositran.gob.pe/joomlatools-files/docman-files/RepositorioAPS/0/0/par/000001-TEMP/CARRETERAS/Texto%20actualizado%20Contrato%20RV5_23DIC2015.pdf.

Pérez, K. G. (2005). Uso del perfilómetro inercial con sensores láser para la determinación del IRI y sus aplicaciones en la Ingeniería vial. Tesis (Pregrado) Universidad de San Carlos de Guatemala: Guatemala.

RNE, R. N. (2010). "Norma CE.010 Pavimentos Urbanos". <https://www.sencico.gob.pe/descargar.php?idFile=182>.

ROMDAS. (2015). Perfilómetro láser. <https://romdas.com/modules/laser>.

Sánchez, F. (2014). Sobre el Índice de estado en los contratos de la tercera generación de concesión de carreteras nacionales. Cámara Colombiana de la Infraestructura: Bogotá.

Sánchez, I., & De Solminihac, H. (1989). El IRI: Un indicador de la regularidad superficial. Revista de Ingeniería de Construcción N°6.

Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Paterson, W. D. (1986). Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements. World Bank Technical Paper No. 46: United States of America.

Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Queiroz, C. A. (1986). International road roughness experiment: Establishing correlation and a calibration standard for measurement. World Bank Technical Paper No. 45: United States of America.

Stevenson, D. (2015). Street Bump: The birth of Android road roughness applications. X-Flow Engine Components Limited.

Vargas, G. (2009). Determinación de la regularidad superficial, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Aspectos y consideraciones importantes.