

ANÁLISIS DE LA COMODIDAD AL ROLAMIENTO DEL PAVIMENTO DE CARRETERAS MEDIANTE DATOS RECOGIDOS POR SMARTPHONE Y VALORES DE SERVICIO

Lucas de Almeida ^{1*}, Francisco Heber ²

¹ Centro Universitário Christus, Brasil

² Universidade Federal do Ceará, Brasil

*Autor para correspondencia:

lucascavalcante@det.ufc.br

RESUMEN

Los métodos de evaluación del estado del servicio en las carreteras brasileñas, representados, entre otros, por el *Present Serviceability Index* (PSI), tienen un alto grado de subjetividad en comparación con los métodos más modernos en desarrollo. Estos métodos, entre los que destacan las aplicaciones para smartphones, permiten obtener datos, comúnmente expresados por el *International Roughness Index* (IRI), de forma más rápida. En este sentido, este artículo tiene como objetivo realizar una comparativa entre el PSI y el IRI obtenido por una aplicación de smartphone, en el mismo tramo de carretera. Los resultados muestran, cuantitativa y cualitativamente, que existe una correlación satisfactoria entre los parámetros estudiados.

Palabras clave PSI, IRI, Smartphone

ABSTRACT

The methods of surveying the condition of service on Brazilian highways, represented, among others, by the Present Serviceability Index (PSI), has a high degree of subjectivity when compared to the more modern methods in development. These methods, among which smartphone applications stand out, enable data acquisition, commonly expressed by the International Roughness Index (IRI), to be faster. In this sense, this paper aims to make a comparison between the PSI and IRI obtained by a smartphone application, in the same segment of road. The results show, quantitatively and qualitatively, that there is a satisfactory correlation between the studied parameters.

Keywords PSI, IRI, Smartphone

1. INTRODUCCIÓN

Según Hudson et al. (1979), el Sistema de Gestión de Pavimentos (PMS) tiene como objetivo brindar estrategias viables a los tomadores de decisiones para que puedan intervenir de manera oportuna y garantizar la vida útil de los pavimentos. Esto se debe a que la infraestructura, por motivos climáticos, de tránsito o de materiales constituyentes, puede presentar defectos que, a su vez, afecten la utilidad y la capacidad funcional y estructural del pavimento. Uno de los parámetros que aporta valiosos beneficios es el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), especialmente cuando se trata del estado funcional del pavimento.

Mediante este índice se puede inferir sobre la irregularidad longitudinal, que además de afectar la seguridad y comodidad de los usuarios, compromete también la vida útil del pavimento. La adquisición de datos sobre las condiciones del pavimento es una actividad importante y necesaria para PMS. En este sentido, se puede afirmar que la obtención de la irregularidad longitudinal de

un pavimento en servicio, en función de los equipos utilizados, requiere un alto costo económico y demanda un largo tiempo de levantamiento in situ, en comparación con los métodos más modernos en desarrollo en el campo de la Ingeniería del Transporte.

Así, debido al avance de la tecnología, se están estudiando nuevos dispositivos para obtener datos sobre irregularidades longitudinales. Se conocen varios tipos y métodos de encuestas (subjetivas y objetivas), así como las diferencias entre ellas, principalmente en relación a la precisión y conveniencia de la recolección de datos.

Medina y Motta (2015) destacan que la evaluación del estado funcional de la superficie del pavimento permite estimar el confort y la seguridad que se ofrecen a los usuarios. Esta estimación se puede realizar de forma subjetiva, utilizando profesionales capacitados, que asignan notas, asociando esta nota con la comodidad al rodar de los vehículos en los tramos recorridos. Este método, en Brasil, se define como Índice de capacidad de servicio actual (PSI). Según los autores, la evaluación objetiva es deseable, especialmente con el uso de equipos que permitan una rápida adquisición de datos para la gestión de los recursos de mantenimiento disponibles. En este contexto, se insertan perfiladores láser y algunos nuevos equipos desarrollados que también permiten esta evaluación, como los teléfonos inteligentes y sus aplicaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este trabajo es analizar, de forma cuantitativa y cualitativa, el confort del pavimento asfáltico rodante, al comparar los valores de IRI obtenidos por una aplicación de teléfono inteligente y por un perfilómetro láser inercial, con las puntuaciones asignadas por el PSI.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Según DNIT (2006), los defectos a los que está sometido un pavimento tienden a promover el aumento de la irregularidad longitudinal, ya que la suma de las deformaciones que se producen en toda la estructura del pavimento se manifiesta por las distorsiones del perfil longitudinal y transversal. La Figura 1 ilustra la contribución de cada defecto al aumento de la irregularidad longitudinal.

Según el DNIT (2006), el IRI es el índice más utilizado por las agencias viales para evaluar el uso de pavimentos en detrimento de otros, como el Present Serviceability Index (PSI) y el Surface State Index (SSI). El PSI será uno de los objetos de estudio de este trabajo. Según Bernucci et al. (2007), la facilidad de servicio y la rugosidad se correlacionan, ya que a menor uso de pavimento, mayor rugosidad presentada en la superficie.

Para clasificar la condición de confort al porte de un pavimento es importante mencionar los valores y la clasificación de su superficie en base a los valores de IRI. En Brasil, todavía no hay consenso sobre los valores del IRI, incluso con el Departamento Nacional de Infraestructura de Transporte (DNIT). En la Tabla 1 se muestran las diferencias en las clasificaciones adoptadas por el DNIT (2006) y el DNIT (2011), cuando se trata, respectivamente, de la restauración y gestión de los pavimentos de las carreteras federales.

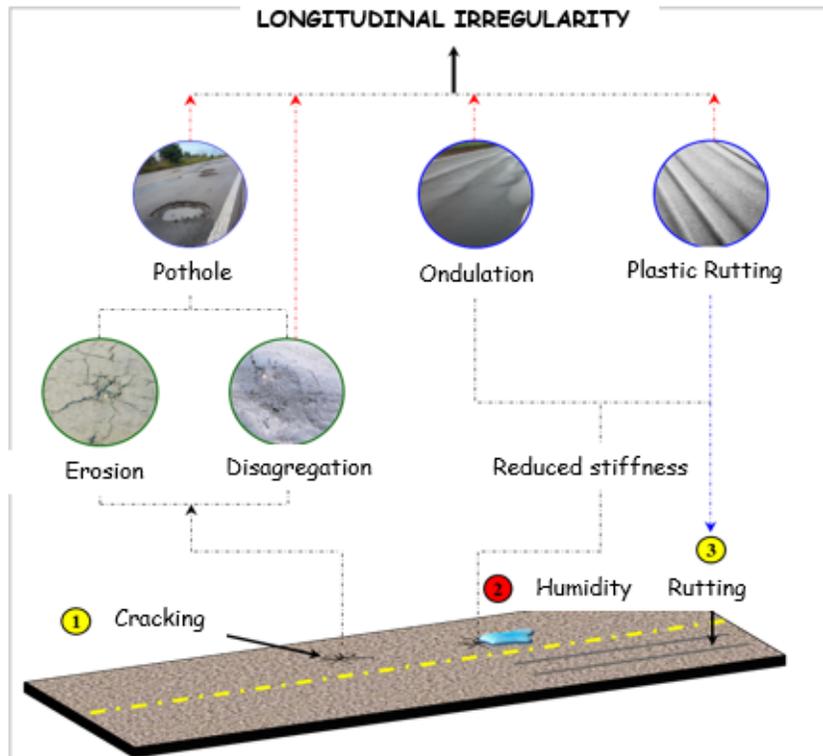


Figura 1 Influencia de los defectos que contribuyen a la irregularidad longitudinal

Tabla 1 Variaciones de los estándares IRI para DNIT (2006) y DNIT (2011)

Condiciones de tráfico	(DNIT, 2006) (m/km)	(DNIT, 2011) (m/km)
Excelente	$1 < IRI \leq 1,9$	$IRI \leq 2,7$
Buena	$1,9 < IRI \leq 2,7$	
Regular	$2,7 < IRI \leq 3,5$	$2,7 < IRI \leq 3,5$
Mala	$3,5 < IRI \leq 4,6$	$3,5 < IRI \leq 5,5$
Pobre	$4,6 < IRI$	$5,5 < IRI$

Medina y Motta (2015) afirman que los valores de IRI pueden variar de 0 a 10 m / km para concreto asfáltico o tratamiento superficial, y de 0 a 24 m / km para caminos sin pavimentar. Estos rangos se dividen en niveles de comodidad asociados con las velocidades máximas de operación para mantener la suavidad del rodamiento. Estos mismos autores afirman también que las carreteras de hormigón asfáltico que presentan IRI entre 1,4 y 2,3 m / km y las de tratamiento superficial de 2 a 3 m / km, suelen indicar un pavimento de alta calidad.

En cuanto a los métodos o equipos para medir la irregularidad, según Bernucci et al. (2007), existen levantamientos topográficos o por equipos de medición del perfil longitudinal con o sin contacto, o indirectamente por equipos de tipo respuesta, que brindan una suma de las desviaciones del eje de un vehículo respecto a la suspensión. Esta terminología se debe a que estos dispositivos miden más el efecto de la irregularidad en los vehículos y pasajeros que la irregularidad en sí. Todavía para Bernucci et al. (2007), se han empleado varias clasificaciones de equipos de medición de irregularidades, según el tipo y principio utilizado para la encuesta. Sayers et al. (1986) abordan de manera más específica la clasificación de los medidores de irregularidades, que pueden agruparse

en cuatro clases, clasificándose el perfilómetro láser inercial como Sistema de Medición de Perfil Indirecto (Clase II) y el PSI como Sistema de Medición de Evaluación Subjetiva (Clase IV). Para los teléfonos inteligentes, los autores de este artículo lo consideran un sistema de medición de irregularidades de tipo de respuesta (clase III).

Según Hirpahuanca (2016) y Douangphachanh (2014), existen situaciones en las que los datos de irregularidades no requieren una gran precisión o simplemente no es posible obtener datos precisos. En estos casos, se puede utilizar una evaluación subjetiva a través de la experiencia previa del evaluador y una inspección visual. Además de la inspección visual, se puede adoptar un sistema de clasificación basado en código, en el que se asignan notas para clasificar el estado de la superficie del pavimento, típico del PSI.

Con la llegada de la tecnología, se desarrollaron aplicaciones para teléfonos inteligentes para la determinación de irregularidades longitudinales, principalmente debido a su bajo costo, fácil operación y alta productividad. Para Bisconsini (2016), el uso de teléfonos inteligentes para evaluar la irregularidad longitudinal puede verse como un sistema de medición de tipo respuesta, aunque no funciona como un medidor convencional, que acumula los desplazamientos entre la carrocería y el eje trasero del vehículo, pero mide las aceleraciones verticales mediante un acelerómetro presente en el smartphone fijado internamente en el parabrisas del vehículo.

Forslof (2013), Bisconsini (2016), Almeida (2018) y Almeida et al. (2018) comentaron que existe incredulidad en torno a un medidor de tipo de respuesta, como en el caso de los teléfonos inteligentes, especialmente cuando se compara con la Clase I o II. Sin embargo, los mismos autores señalan que los teléfonos inteligentes pueden proporcionar actualizaciones sobre el estado funcional del pavimento, en poco tiempo y bajo costo, en comparación con otros métodos.

3. MÉTODOS DE LONGITUD DE SERVICIO E IRREGULARIDAD LONGITUDINAL PARA LA PISTA ANALIZADA

El tramo en análisis corresponde a un segmento de la Carretera CE-501, en la ciudad de Fortaleza, estado de Ceará, Noreste de Brasil. El tramo tiene una extensión de 4,2 km en Concreto Asfáltico (AC), ejecutado entre 1997 y 1998, con tráfico urbano moderado compuesto principalmente por buses y autos particulares. La carretera ha sido objeto de numerosas intervenciones de mantenimiento correctivo a lo largo de su operación, especialmente con servicios de tapadera. La composición del tráfico para el año 2019 se puede ver en la Tabla 2 según Lira (2019).

Tabla 2 VMDa Carretera CE-401

Sentido	1		2	
Moto	2.408	11%	2.546	12%
Carro	12.493	54%	10.436	48%
Autobús	670	3%	630	3%
Camión ligero	441	2%	468	2%
Camión mediano	1.043	5%	999	5%
Camion pesado	2.073	9%	1.876	9%
Camión ultra pesado	3.650	16%	4.462	21%
Total (2012)	22.777	100%	21.417	100%
Proyectado (2019)	26.163		24.601	

Los datos del PSI se obtuvieron de encuestas realizadas por equipos formados por investigadores del Departamento de Ingeniería del Transporte de la Universidad Federal de Ceará. La encuesta fue realizada por tres equipos, que utilizaron el mismo coche, durante la misma mañana de mayo de 2017. Toda la encuesta siguió las recomendaciones del procedimiento DNIT (2003). La encuesta realizada con la aplicación SmartIRI se realizó en diciembre de 2017, también con una velocidad media de 60 km/h. SmartIRI, según Almeida (2018), calcula la irregularidad del pavimento aportando el valor del IRI, así como localizando en un mapa los tramos de los tramos que se han levantado. El teléfono inteligente se coloca en un soporte y se fija al parabrisas en la posición vertical del mismo automóvil utilizado en la encuesta PSI. La APP detecta las aceleraciones verticales impuestas al vehículo por la presencia de irregularidad longitudinal, convirtiendo estos datos de entrada en valores IRI reportados cada 100 m. Otra encuesta realizada con SmartIRI se llevó a cabo de la misma forma en abril de 2019. Abordó el paso del vehículo en las 6 pistas pertenecientes a la carretera analizada, con el fin de verificar la variación del IRI por pista. Asimismo, se analizaron los datos de PSI para el año de 2017 con los datos de IRI para el año de 2019. En la Figura 2 se muestran los tramos de la carretera analizados en los que para el año 2017 se realizó un relevamiento para PSI e IRI en la vía P3, para el año 2019 se realizaron levantamientos IRI para todos los tramos.



Figura 2 Sección de carretera CE-501

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE IRI Y CORRELACIÓN CON PSI

4.1 Correlación entre la evaluación subjetiva (PSI) y SmartIRI (año 2017 - Track P3)

La clasificación propuesta por SmartIRI se asemeja a la propuesta por HDM-4 (PIARC, 2010). Sin embargo, se creó una nueva clase, denominada Excelente. Esta transposición de las clases fue necesaria debido a que el SmartIRI funciona como un equipo tipo respuesta y, al observar la clasificación propuesta por Karamihias y Sayers (1998), se notó que pavimentos antiguos, con IRI de hasta 6 m/km, se clasifican como en condiciones normales de tráfico.

Otro motivo para realizar la transposición de clases es que la mayoría de los recubrimientos viales en el estado de Ceará, donde se desarrolló y calibró el SmartIRI, se ejecutan en Tratamientos

Superficiales. Debido al proceso ejecutivo, las carreteras con Tratamiento de Superficie tienden a tener valores de IRI mayores que un revestimiento de Concreto Asfáltico. La Tabla 3 muestra la comparación entre las clasificaciones propuestas por DNIT (2006), SmartIRI y HDM-4.

Tabla 3 Clasificación DNIT (2006), SmartIRI y HDM-4

Condiciones de tráfico	DNIT (2006) (m/km)	SmartIRI (m/km)	HDM-4 (PIARC, 2010) (m/km)
Excelente	$1 < \text{IRI} \leq 1,9$	$0 < \text{IRI} < 2$	-
Buena	$1,9 < \text{IRI} \leq 2,7$	$2 \leq \text{IRI} < 4$	$0 < \text{IRI} < 2$
Regular	$2,7 < \text{IRI} \leq 3,5$	$4 \leq \text{IRI} < 6$	$2 \leq \text{IRI} < 4$
Mala	$3,5 < \text{IRI} \leq 4,6$	$6 \leq \text{IRI (m/km)}$	$4 \leq \text{IRI} < 6$
Pobre	$4,6 < \text{IRI}$	-	$6 \leq \text{IRI (m/km)}$

La aplicación utilizada en el levantamiento, SmartIRI, emite un informe en un archivo generado en formato .kml (Figura 3) que permite al usuario visualizar el segmento monitoreado mapeando el tramo cada 100 m en una escala de colores asociada a los parámetros de IRI, según a la Tabla 4.

Table 4 Clasificación propuesta por SmartIRI

Clasificación	Colores
$0 < \text{IRI (m/km)} < 2$ (Excelente)	Verde
$2 \leq \text{IRI (m/km)} < 4$ (Buena)	Verde claro
$4 \leq \text{IRI (m/km)} < 6$ (Regular)	Amarillo
$6 \leq \text{IRI (m/km)}$ (Mala)	Rojo

Se observó en la Figura 3 que, al final del tramo analizado, se detectaron valores altos de IRI, indicando malas condiciones de tráfico, con grietas y parches, como se muestra en la Figura 4.



Figura 3 Mapa generado por SmartIRI en carretera CE-501



Figura 4 Detalle del final del tramo de la carretera CE-501

La Tabla 5 muestra la clasificación del servicio a través de PSI y SmartIRI. Cabe mencionar que los valores de IRI y PSI tienen una relación inversa, ya que en el primero cuanto menor es el valor, mejor es el rumbo, y en el segundo ocurre lo contrario.

Tabla 5 Intervalos de valor y conceptos cualitativos entre PSI e IRI

PSI	IRI (m/km)	Clasificación
$0 \leq \text{PSI} < 1$	$6 \leq \text{IRI}$	Mala/pobre
$1 \leq \text{PSI} < 2$		
$2 \leq \text{PSI} < 3$	$4 \leq \text{IRI} < 6$	Regular
$3 \leq \text{PSI} < 4$	$2 \leq \text{IRI} < 4$	Buena
$4 \leq \text{PSI} \leq 5$	$0 < \text{IRI} < 2$	Excelente

Los datos de PSI recopilados se exponen en la Tabla 6. La información se dividió en intervalos de 600 m, totalizando 7 segmentos. Con los datos de la Tabla 6, se obtuvo el coeficiente de correlación y la determinación entre PSI y SmartIRI, como se muestra en la Tabla 7. El segmento se dividió en 600 m para conveniencia de los autores de este manuscrito. Las especificaciones brasileñas para la evaluación funcional de pavimentos flexibles recomiendan tramos de 100 a 200 m. Para la valoración estructural, existen procedimientos que pueden detectar tramos homogéneos, sin embargo, para el tramo analizado, no existen datos estructurales que puedan sustentar esta toma de decisión.

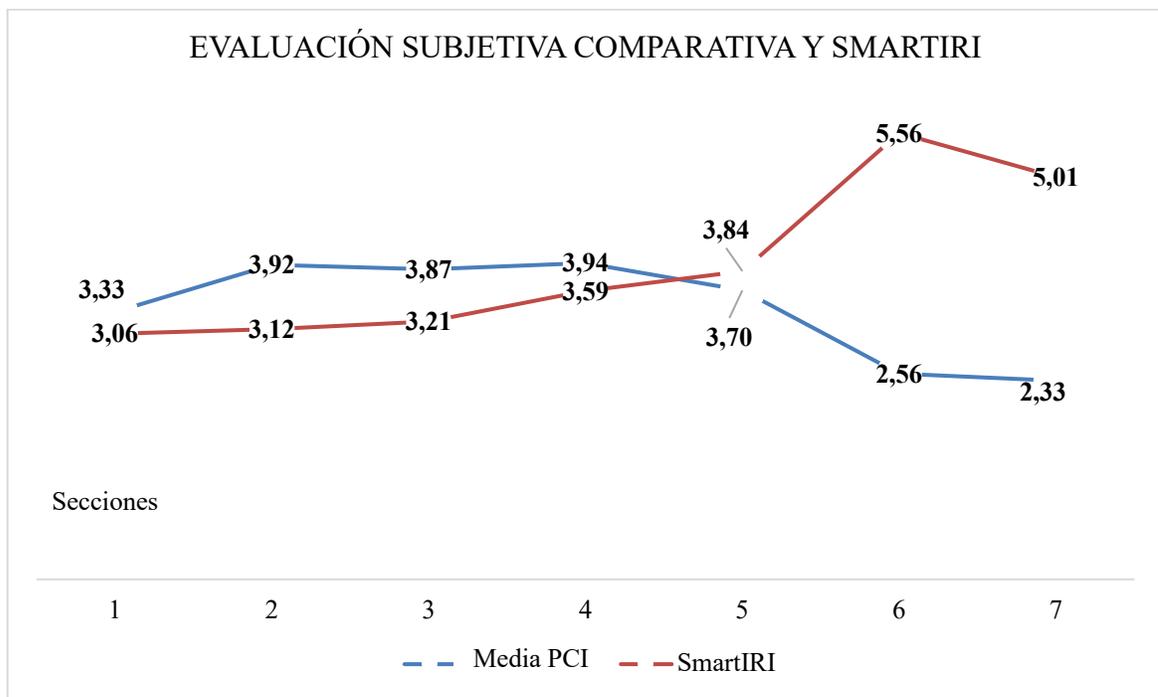
Tabla 6 Valores de PSI y SmartIRI en los tramos de la carretera CE-501

	Secciones	1	2	3	4	5	6	7
	Intervalos (m)	0 a 600	600 a 1200	1200 a 1800	1800 a 2400	2400 a 3000	3000 a 3600	3600 a 4100
Equipo 1	PSI	3,5	4,0	3,8	4,0	3,8	2,3	2,0
Equipo 2		3,4	3,9	3,8	3,7	3,6	2,7	2,5
Equipo 3		3,2	3,9	4,0	4,0	3,6	2,8	2,5
Media	Media PSI	3,4	3,9	3,9	3,9	3,7	2,6	2,3
	IRI (m/km) - SmartIRI	3,06	3,12	3,21	3,59	3,84	5,56	5,01
Desviación estándar y variación	IRI - SmartIRI	0,29 9%	0,55 18%	0,71 22%	0,49 14%	0,72 19%	1,21 22%	0,40 8%

Tabla 7 Correlación entre PSI y SmartIRI para los equipos de la Carretera CE-501

	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	Media PSI y IRI
Correlación	-0,89	-0,89	-0,78	-0,87
R ²	0,79	0,80	0,62	0,76

Se verificó una fuerte correlación entre los valores de PSI y los valores obtenidos por el SmartIRI, siendo el coeficiente de determinación (R^2) de aproximadamente 0,76. Se elaboró una gráfica de líneas para representar el comportamiento de los índices en estudio a lo largo de la carretera, como se muestra en la Figura 5. De acuerdo con la Figura 5, se observa que a medida que el IRI aumenta en valor, el PSI disminuye, confirmando la relación inversa entre estos dos parámetros, además de evidenciarse por el valor del coeficiente de correlación, cuyo valor de las medias de los índices fue de -0,87.

**Figura 5** Comportamiento de los índices PSI y SmartIRI en la carretera CE-501

El gráfico de la Figura 6 se generó a partir de los datos de la Tabla 7, con el fin de calcular el R^2 . Se obtuvo un valor de 0,76 que indica un alto coeficiente de determinación. También se puede observar la presencia de baja irregularidad de la carretera en los tramos iniciales (del 1 al 5) y el aumento de la irregularidad en el tramo final (6 y 7) de la carretera analizada.

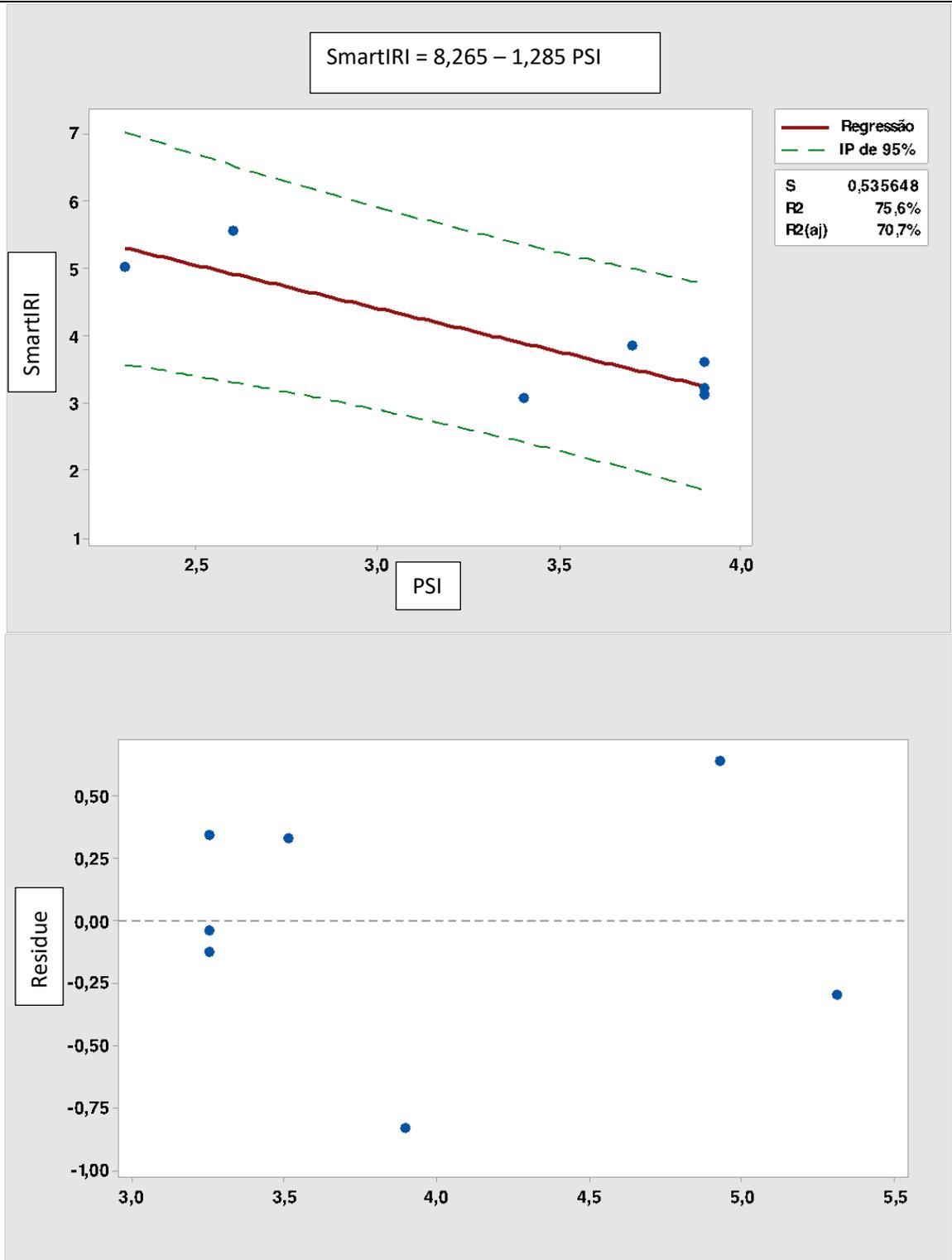


Figura 6 Evaluación subjetiva (PSI) y SmartIRI en la carretera CE-501

4.2 Análisis del IRI obtenido por SmartIRI por banda de tráfico (año 2019)

Analizando estadísticamente los datos obtenidos por SmartIRI, se verificó que los rangos de tráfico tienen altos coeficientes de variación, lo que posiblemente indique que el tramo no es homogéneo, es decir, en algunas partes del tramo existe una mayor concentración de defectos. La Tabla 8 muestra las estadísticas descriptivas de las mediciones.

Tabla 8 Estadística descriptiva de la medición realizada por SmartIRI en la carretera CE-501

Parametros	SmartIRI					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Tracks						
Media – IRI (m/km)	4,00	3,76	4,07	3,62	3,79	3,53
Desviación estándar	1,11	0,83	1,18	0,74	0,82	0,80
Coefficiente de variación	28%	22%	29%	20%	22%	23%
Valor más alto	7,08	5,71	7,70	5,99	6,98	7,09
Valor más bajo	2,82	2,70	2,82	2,67	2,98	2,67

En la Figura 7 se muestra una parte de la sección en la que se observó la presencia de defectos como parches, grietas y agujeros, posiblemente contribuyendo al aumento del valor de IRI, aumentando consecuentemente el coeficiente de variación.



Figura 7 Defectos observados en tramos de la carretera CE-501

Analizando los valores de IRI en sus respectivas clases cualitativas, los índices medidos por la aplicación proporcionaron los porcentajes de las secciones que se encuentran dentro de la clasificación cualitativa según la Tabla 9.

Tabla 9 Datos cualitativos obtenidos por SmartIRI en la carretera CE-501

Bandas	SmartIRI (% cualitativo)					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Excelente	0	0	0	0	0	0
Buena	67,57	70,27	70,27	75,68	75,68	84,21
Regular	21,62	29,73	21,62	24,32	21,62	13,16
Mala/Pobre	10,81	0	8,11	0	2,7	2,63

Analizando la evolución de los valores de IRI obtenidos por SmartIRI, se observó que no existen grandes variaciones entre las mediciones (Tabla 10), indicando que, posiblemente, se realizaron actividades de mantenimiento en el tramo analizado con el fin de mantener la carretera con el mismas condiciones de confort de rodadura.

Tabla 10 Valores de IRI obtenidos por SmartIRI - Rango P3 en la carretera CE-501

	Secciones	1	2	3	4	5	6	7
	Intervalos (m)	0 a 600	600 a 1200	1200 a 1800	1800 a 2400	2400 a 3000	3000 a 3600	3600 a 4100
IRI (m/km)	Año 2017	3,06	3,12	3,21	3,59	3,84	5,56	5,01
	Año 2019	3,15	3,46	3,63	3,32	3,74	5,90	5,50

La Tabla 11 y la Figura 8 muestran el resumen de la encuesta y la clasificación cualitativa de cada índice en la banda de tráfico P3. Cabe señalar que las mediciones son cualitativamente correlacionables.

Tabla 11 Resumen de los resultados de la encuesta en la carretera CE-501, en 2017 y 2019

Colors	PSI - 2017 (DNIT, 2003)	SmartIRI - 2017	SmartIRI - 2019
Sección 1	3,4 (Buena)	3,06 (Buena)	3,15 (Buena)
Sección 2	3,9 (Buena)	3,12 (Buena)	3,46 (Buena)
Sección 3	3,9 (Buena)	3,21 (Buena)	3,63 (Buena)
Sección 4	3,9 (Buena)	3,59 (Buena)	3,32 (Buena)
Sección 5	3,7 (Buena)	3,84 (Buena)	3,74 (Buena)
Sección 6	2,6 (Regular)	5,56 (Regular)	5,90 (Regular)
Sección 7	2,3 (Regular)	5,01 (Regular)	5,50 (Regular)



Figura 8 Indicación de los tramos de la carretera CE-501

5. CONCLUSIONES

Con base en el análisis descrito en este artículo, se verificó que diferentes tipos de equipos o métodos, pertenecientes a diferentes clases de medición de irregularidades longitudinales, se pueden utilizar para medir el confort al apoyo de pavimentos flexibles, ya que los dos métodos utilizados presentaron valores correlacionados. entre los índices en estudio. Con base en los datos obtenidos por diferentes métodos, corresponde a los gerentes definir el método más factible para ser aplicado en el proceso de toma de decisiones.

Cabe destacar también la eficiencia del SmartIRI para el levantamiento de campo y el procesamiento de datos, ya que fue posible verificar los valores de IRI en tiempo real, así como su ubicación en un mapa, una vez asociada la aplicación a un Sistema de Información geográfica (SIG). Otro punto observado es que la utilización de cualquiera de los métodos, junto con el análisis de los datos obtenidos, puede indicar la presencia de defectos superficiales en la vía.

Finalmente, se concluye que los teléfonos inteligentes se presentan como una alternativa viable en el análisis preliminar del estado funcional de los pavimentos, ya que, a través de la información obtenida y el correcto análisis de los datos, puede ayudar a la toma de decisiones del equipo directivo. una vez que sus parámetros se correlacionan con los métodos tradicionales. Estas nuevas tecnologías desarrolladas tienen bajo costo, fácil operación y alta productividad, y se pueden aplicar a gran escala, enfatizando que una tecnología más avanzada no impide el uso de una tecnología más tradicional.

REFERENCIAS

Almeida, L.C. (2018) Aplicativo para smartphone destinado à medição da irregularidade longitudinal em rodovias. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Almeida, L.C., Oliveira, F.H.L. y Ramos, S.P. (2018) Estudo da condição de superfície em rodovias por meio do uso de aplicativo para smartphone. *TRANSPORTES* v. 26, n.2, 2016. ISSN: 2237-1346 (online). DOI:10.4237/transportes.v26.i2/1059.

Bernucci, L.B., Mota, L.M.G., Cerati, J.A.P. y Soares, J.B. (2007) Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros. Ed. Petrobras/Abeda, Rio de Janeiro.

Biconsini, D.R. (2016) Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo, São Paulo.

DNIT (2003) Avaliação Subjetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semirrígidos. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro.

DNIT (2006) Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro.

DNIT (2011) Manual de Gerência de Pavimentos. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro.

Douangphachanh, V. (2014) The Development of a Simple Method for Network-wide Road Surface Roughness Condition Estimation and Monitoring Using Smartphone Sensors. Tese de Doutorado, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japão.

Forslof, L. (2013) Roadroid: Continuous road condition monitoring with smart phones. In IRF 17th World Meeting and Exhibition, Riyadh, Saudi Arabia.

Hudson, W.R., Haas, R. y Pedigo, R.D. (1979) Pavement management system development, National Cooperative Highway Research Program Report No. 215, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Hirpahuanca, D.L. (2016) Determinación y Comparación de la Regularidad Superficial del Pavimento de la Carretera Cusco-Urcos, Usando Teléfonos Inteligentes y el Rugosímetro de MERLIN. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidad Andina del Cusco.

Karamihas, S.M. y Sayers, M.W. (1998) The Little Book of Profiling. Basis information about measuring an interpreting road profiles. The Regent of the University of Michigan.

Lira, E.S.A.B. (2019) Análise da irregularidade longitudinal por faixas de tráfego através de aplicativo para smartphone. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário Christus.

Medina, J. y Motta, L.M.G. (2015) Mecânica dos Pavimentos, Rio de Janeiro, 3ª. Ed. Oficina de Textos.

PIARC (2010) Manual do Usuário do Programa HDM-4. Volume 04,1 CD-ROM.

Sayers, M.W., Gillespie, T.D. y Queiroz, C.A.V. (1986) The international road roughness experiment: Establishing correlation and a calibration standard for measurements. The World Bank, Technical Report, 45, 453.