

Número (1 y 2)

Enero / Diciembre 2010

Volumen 20

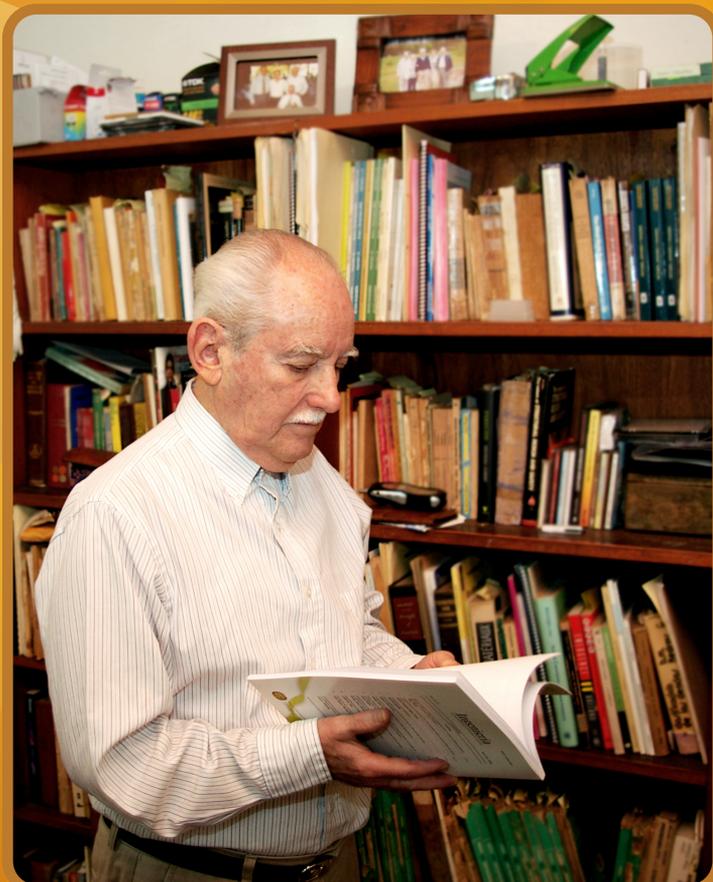
REVISTA INGENIERÍA

<http://www.inii.ucr.ac.cr/revista>
www.ucr.ac.cr / ISSN 1409-2441

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
ENERO/ DICIEMBRE 2010 - VOLUMEN 20 - Número (1 y 2)

20
Aniversario




EDITORIAL
UCR

ASPECTOS Y CONSIDERACIONES IMPORTANTES EN EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI)

Gustavo A. Badilla Vargas

Resumen

El *Índice de Regularidad Internacional* (IRI) ha sido un parámetro ampliamente utilizado para determinar las características superficiales que presentan los pavimentos. Recientemente en Costa Rica, la Administración ha venido introduciendo la medición del IRI como parámetro de aceptación de diferentes obras viales. Sin embargo, no ha sido posible lograr una adecuada implementación de este índice. El artículo presenta los principales detalles, cuidados y procedimientos involucrados en el cálculo del IRI, con la finalidad de que sean tomados en cuenta en la definición de especificaciones de aceptación de proyectos viales o evaluación de la red vial.

Palabras clave: regularidad superficial, Índice de Regularidad Internacional, IRI, rugosidad, pavimentos.

Abstract

The *International Roughness Index* (IRI) is a widely used parameter. It is used to determine surface characteristics of roads. Recently, in Costa Rica, the Administration has been introducing the measurement of the IRI as a parameter of acceptance to be used in road projects. However, it has not been possible to achieve an implementation of this index. This work presents the main details, precautions, and procedures involved in the calculation of the IRI, with the purpose that they are considered in the definition of the acceptance specifications for road projects or network evaluation.

Keywords: roughness, IRI, International Roughness Index, pavement.

Recibido: 23 de noviembre de 2009 • **Aprobado:** 08 de julio del 2010

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de pavimentos proporciona información que puede ser utilizada tanto en el diseño como en la gestión de la infraestructura, permitiendo priorizar las actividades de mantenimiento, rehabilitaciones y reconstrucciones. Permite también realizar inventarios del estado y la condición de la red vial, así como evaluar los costos adicionales en los cuales pueden incurrir los usuarios por el uso de la carretera.

Se reconocen dos tipos de evaluaciones, la evaluación estructural (relacionada con la capacidad que tiene el pavimento para soportar las cargas de los vehículos) y la evaluación funcional (relacionada directamente con la percepción del usuario al utilizar una determinada vía).

En el caso de la evaluación funcional, la regularidad dada por la superficie de ruedo para la circulación de los vehículos, ofrece condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las carreteras. Tiene incidencia en los costos de operación de los vehículos, puesto que dependiendo de la magnitud de las irregularidades superficiales, la velocidad de circulación puede verse afectada negativamente, lo cual puede reflejarse en un mayor desgaste en las llantas y el consumo de combustible.

Adicionalmente, los efectos dinámicos producidos por las irregularidades de las carreteras pueden reflejarse no sólo en los vehículos, sino también en modificaciones de estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento, lo que puede incrementar los costos en las actividades de conservación y rehabilitación.

1.1. La medición del IRI en Costa Rica

Bajo el marco de la Ley No. 8114, le corresponde al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica, realizar una evaluación cada dos años del estado de la red vial nacional pavimentada, la cual sirve como instrumento eficaz e imparcial de rendición de cuentas y de planificación técnica para la gestión vial y la inversión pública realizada.

Los parámetros técnicos con los que se realiza la evaluación de la red de carreteras están relacionados directamente con la vida útil o de servicio, con el costo de operación de la flota vehicular que circula y con la seguridad vial.

La primera campaña de *Evaluación de la Red Vial* con equipos de alta tecnología se realizó en el año 2002. El principal objetivo de esta campaña fue la calibración de los equipos y la revisión y comparación de los resultados con estándares internacionales, por lo que se recorrió un pequeño porcentaje de la red vial nacional pavimentada. Se realizó una primera campaña de evaluación de la totalidad de la red en el año 2004, y nuevamente se realizó la evaluación en los años 2006 y 2008.

Dichas campañas se han realizado con un perfilómetro inercial láser, marca Dynatest, modelo 5051 Mark III Perfilómetro Superficial de Carreteras (RSP, por sus siglas en inglés *Road Surface Profiler*), propiedad del LanammeUCR, equipo de última generación que permite evaluar la condición de regularidad superficial de las carreteras; consta de tres sensores láser ubicados en la defensa delantera del vehículo, uno sobre cada huella de rodamiento y el tercero, central. Estos sensores están conectados a un computador con Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Con este equipo se puede recolectar información acerca del estado de la carretera con gran exactitud en las mediciones de perfil, tanto longitudinal como transversal. El perfilómetro inercial láser obtiene estas mediciones, las despliega y almacena, así como también calcula los índices de regularidad superficial, medición de ahuellamiento y registra la velocidad de operación del equipo. En el caso de la Evaluación de Red Vial Nacional,

los resultados del *Índice de Regularidad Internacional IRI* están dados en tramos de 100 m de longitud, además se informa el valor promedio del IRI para los sensores izquierdo y derecho del perfilómetro láser.

En el caso de proyectos nuevos, el CR-2002, *Especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes en Costa Rica*, establece que:

El control de IRI (Índice de Regularidad Internacional) se realizará por sectores homogéneos, correspondientes a un mismo tipo de superficie de ruedo. No se considerarán puentes, vados u otras singularidades que afecten la medición. Asimismo, no se exigirá este control para carpetas sobre pavimentos existentes, excepto cuando en el proyecto se establezcan cotas de rasante para esos recapados, así como en vías urbanas y en vías con una velocidad de diseño menor o igual a 60 km/h, y en curvas con radios menores o iguales a 300 m. Se medirá en forma continua en tramos de 200 m, o fracción, en caso de que el último tramo de un sector homogéneo no alcance a los 200 m, y se informará el IRI (m/km) con un decimal.

A continuación se mencionan algunos proyectos en los cuales se ha solicitado el cumplimiento del Índice de Regularidad Internacional:

- *Ruta 18. Sección Limonal – Tempisque:* El valor máximo aceptable será de 2,5 m/km una vez concluida la operación de Reconstrucción y Mejoramiento.
- *Ruta 21. Sección Pavones-Intersección Corozal. San Rita-Jicaral-Lepanto-Playa Naranjo II:* El valor máximo aceptable será de 2,5 m/km, una vez concluida la operación Mejoramiento.
- *Ruta 23. Sección Interamericana-Caldera:* Corresponde a lo expresado en el CR-2002, en donde la evaluación del IRI se realizará tomando el promedio de los valores de cinco tramos consecutivos. Se entenderá que la superficie del pavimento tiene una rugosidad¹ aceptable si todos los promedios

consecutivos de cinco valores de IRI tienen un valor igual o inferior a 2,0 m/km, y ninguno de los valores individuales supera 3,0 m/km.

Por estas razones, conocer la regularidad superficial del pavimento en cualquier momento desde el inicio de su periodo de servicio o en cualquier momento de la vida útil, permitirá definir las acciones de conservación o rehabilitación necesarias en el momento pertinente.

Debido a esto, muchos países han utilizado el *Índice de Regularidad Internacional* (IRI), como parámetro para evaluar la regularidad y asegurar así el confort y la seguridad de los usuarios.

Es posible encontrar diversas investigaciones en las cuales se ha evaluado la influencia de valores iniciales de IRI con el comportamiento del pavimento a largo plazo; en ellas se ha encontrado que valores iniciales elevados de IRI ocasionan mayores deterioros en el tiempo, mayor costo de mantenimiento, una vida útil de servicio inadecuada y rehabilitaciones o reconstrucciones a temprana edad del pavimento.

El hecho de profundizar en los detalles, los cuidados, el procedimiento de cálculo del IRI, así como en las especificaciones internacionales, permitirá contar con una metodología homogénea y objetiva que permita evaluar la condición superficial, representada por el IRI. Además, permitirá establecer los principales detalles, cuidados y procedimiento de cálculo del IRI por considerarse para establecer la metodología de ensayo que se aplicará para la medición del IRI en Costa Rica.

2. CONCEPTOS GENERALES EN LA EVALUACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL

2.1. Definición de regularidad superficial

En la norma de ensayo ASTM E 867-06 *Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems*, se 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.”

A la luz de esta definición, algunos autores prefieren utilizar el término *regularidad*, puesto que este concepto se asocia más fácilmente a la definición de *roughness*, que el término *rugosidad*. De esta manera, puede encontrarse bibliografía que trata indistintamente los conceptos de Regularidad y Rugosidad; sin embargo, para efectos de este artículo se prefiere utilizar Regularidad, para referirse a las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan adversamente a la calidad del rodado, seguridad y costos de operación del vehículo.

En la década de los 70's, el Banco Mundial financió diferentes programas de investigación a gran escala, entre los cuales se encontraba un proyecto relacionado con la calidad de las vías y los costos a los usuarios, a través del cual se detectó que los datos de regularidad superficial de diferentes partes del mundo no podían ser comparados. Aun datos de un mismo país no eran confiables, debido a que las mediciones fueron realizadas con equipos y métodos que no eran estables en el tiempo.

Con el objetivo de unificar los diferentes parámetros que se utilizaban en diversos países para determinar la regularidad superficial de las carreteras, se realizó en Brasil en 1982, el proyecto *International Road Roughness Experiment (IRRE)* promocionado por el Banco Mundial; en él participaron equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica. En este proyecto se realizó la medición controlada de la regularidad superficial de pavimentos para un número de vías bajo diferentes condiciones y con una variedad de instrumentos y métodos. A partir de dicho proyecto se seleccionó un parámetro de medición de la regularidad superficial denominado *Índice de Regularidad Internacional* (IRI, *International Roughness Index*).

De esta manera se definió que: “El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie de camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico, está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas (RARS₈₀,

Reference Average Rectified Slope, razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida) producto de la simulación del modelo de cuarto de carro, (RQCS, Reference Quarter Car Simulation), para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h”.

En términos más sencillos, el IRI es un modelo matemático que calcula el movimiento acumulado en la suspensión de un vehículo de pasajero típico, al recorrer una superficie del camino a una velocidad de 80 km/h.

2.2 Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI)

El cálculo del IRI involucra la utilización de herramientas matemáticas, estadísticas y computacionales que permiten derivar la medida de regularidad asociada al camino, lo cual contempla etapas claramente diferenciadas y ajustadas a un desarrollo sistemático.

El primer paso del procedimiento para el cálculo del IRI, y el más importante de todos, consiste en medir las cotas o elevaciones de terreno que permiten representar el perfil real de camino. Esto significa que el IRI es independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil, y dependerá únicamente de la calidad del perfil longitudinal. Estos datos son sometidos a un

primer filtro, en el cual se realiza un análisis estadístico (media móvil) y adecuaciones matemáticas para poder generar un nuevo perfil posible de ser analizado desde el punto de vista de las irregularidades que se pudieran observar. Las razones para aplicar este primer filtro se fundamentan en lo siguiente: a) para simular el comportamiento entre las llantas de los vehículos y la carretera, y b) para reducir la sensibilidad del algoritmo del IRI al intervalo de muestreo.

Al nuevo perfil generado se le aplica un **segundo filtro**, el cual consiste en la aplicación de un modelo de cuarto de carro que se desplaza a una velocidad de 80 km/h, a través de este se registran las características asociadas al camino basadas en los desplazamientos verticales inducidos a un vehículo estándar, el cual es modelado de forma simplificada como un conjunto de masas ligadas entre sí y con la superficie de la carretera mediante resortes y amortiguadores. El movimiento sobre el perfil de la carretera produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las masas que nos lleva a medir los movimientos verticales no deseados atribuibles a la irregularidad del camino (Ver Figura 1).

El modelo de simulación consta de una masa “amortiguada o suspendida” (masa de un cuarto de carro ideal) conectada a una masa “no amortiguada” (eje y neumático), a través de un resorte y un amortiguador lineal (suspensión), y

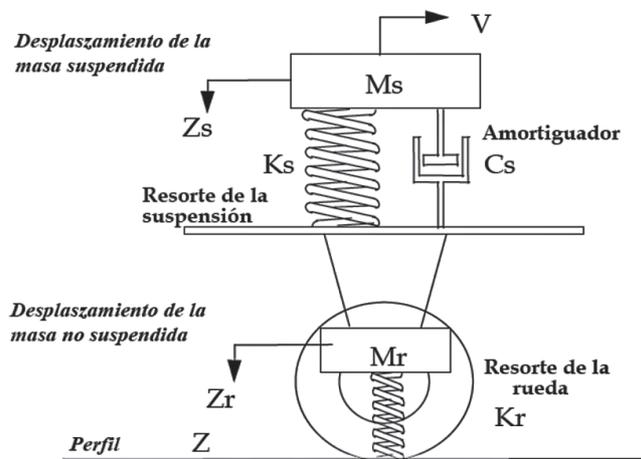


Figura 1. Modelo de cuarto de carro.

Fuente: (De Solminihac, 2006).

por último, el neumático es representado por otro resorte lineal. Por otro lado, el modelo de cuarto de carro emplea los parámetros de lo que se ha denominado como el Carro de Oro, los cuales se muestran en la ecuación (1).

donde:

k_s	constante del resorte de la suspensión, kg/s^2
k_r	constante del resorte de la rueda, kg/s^2
M_s	masa suspendida, kg
M_r	masa no suspendida, kg
c_s	amortiguador, kg/s

Las ecuaciones dinámicas presentes en el modelo forman un sistema de ecuaciones que se utilizan como dato de entrada el perfil de la carretera (en la parte inferior del “resorte del neumático”). El movimiento vertical del eje respecto a la masa suspendida se calcula y acumula. El valor en metros acumulados por kilómetro viajado (m/km) es la medida final de la regularidad del camino.

Una consideración importante que debe considerarse en el método de cálculo de IRI es que se deben estimar valores iniciales entre la respuesta de transición y la respuesta inducida por el perfil. Los efectos de esta inicialización disminuyen conforme la simulación del cuarto de carro cubre una mayor distancia del perfil. Esta inicialización influye en el modelo del cuarto de carro en aproximadamente 20 m. Por lo tanto, la manera más precisa de tratar con la inicialización es medir el perfil al menos 20 m antes del punto de inicio del tramo, e iniciar a partir de allí el cálculo del IRI.

A partir del estudio realizado por el Banco Mundial, se propuso una escala de medición de la regularidad superficial para diferentes tipos de vías (Figura 2). Para caminos pavimentados, el rango de la escala del IRI es de (0 a 12) m/km , donde 0 representa una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable; para vías no pavimentadas la escala se extiende hasta el

valor de 20. El perfil real de una carretera recién construida tiene un estado cero, pero se define por su IRI inicial mayor a cero, debido principalmente a que alcanzar valores de $\text{IRI} = 0$ es sumamente difícil desde el punto de vista constructivo. Una vez puesta en servicio, la regularidad del pavimento se modifica lentamente en función del paso del tránsito.

2.3 Equipos para la medición de la regularidad superficial de los pavimentos

Existen diferentes equipos para determinar la regularidad superficial de los pavimentos, los cuales han venido evolucionando con el tiempo, variando unos de otros en la precisión y rapidez para la obtención de los resultados. En el Cuadro 1 se muestran de manera resumida los diferentes equipos empleados para la determinación de la regularidad superficial y sus principales usos.

Como se mencionó anteriormente, el cálculo del IRI es independiente de la técnica o equipo utilizado, y por lo tanto el paso más importante para el cálculo del IRI consiste en la calidad de la medición de las ordenadas o cotas de una línea de perfil longitudinal. Sin embargo, es importante destacar que graficar las elevaciones en función de la distancia longitudinal para un mismo tramo de carretera empleando diferentes equipos de medición, no necesariamente implica que los perfiles longitudinales medidos coincidan entre sí. Por ejemplo, la Figura 3 muestra los perfiles longitudinales obtenidos a partir del Dipstick y otros dos perfilómetros inerciales (ICC Laser y K. J. Law), los cuales evidentemente son muy diferentes entre sí. Estas diferencias se deben principalmente a la conjugación entre el perfil del camino que contribuye a la regularidad y la pendiente total del tramo seleccionado. En otras palabras, dependiendo del equipo se establecen niveles de referencia diferentes para la determinación del perfil; es decir, en el caso

$$k_2 = \frac{k_s}{M_s} = 63.3 \text{ s}^{-2} \quad k_1 = \frac{k_r}{M_s} = 653 \text{ s}^{-2} \quad c = \frac{c_s}{M_s} = 6 \text{ s}^{-1} \quad \mu = \frac{M_r}{M_s} = 0.15 \quad (1)$$

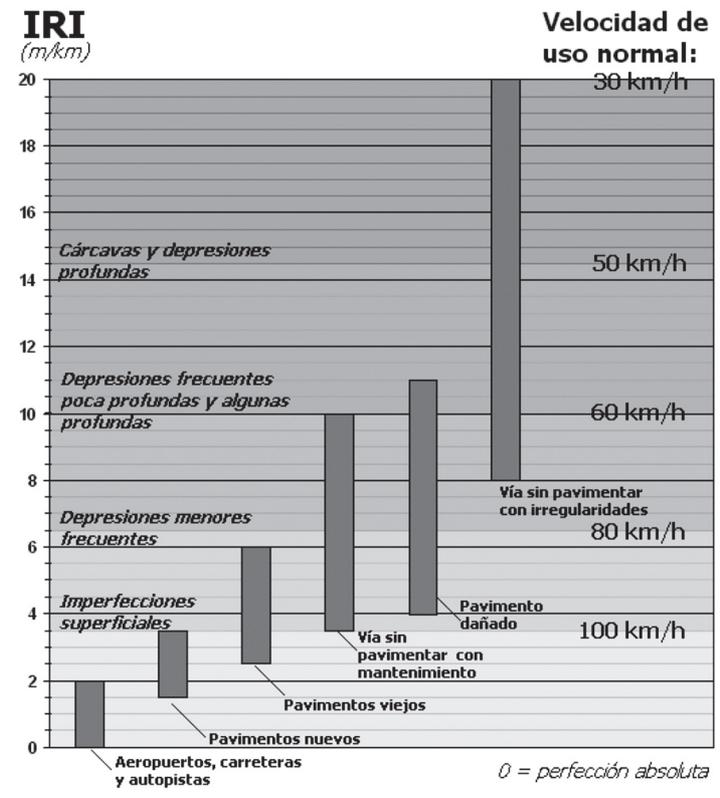


Figura 2. Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías.

Fuente: Adaptado de (UMTRI Research Review, 2002).

del Dipstick se registra la elevación de un apoyo relativo a la elevación del otro, mientras que en el caso de los perfilómetros inerciales, las elevaciones se registran respecto a un eje de referencia inercial, lo cual genera las diferencias mostradas en la Figura 3.

Una vez que se cuenta con el perfil longitudinal, este es sometido al primer filtro que consiste en una serie de adecuaciones matemáticas y análisis estadístico (media móvil) para generar un nuevo perfil suavizado de las irregularidades. Como se muestra en la Figura 4, los perfiles anteriores después de la aplicación del primer filtro muestran básicamente el mismo patrón.

Finalmente, este perfil suavizado se le aplica el segundo filtro de la simulación del cuarto de carro, RQCS, a una velocidad de 80 km/h y se le determina el IRI.

2.4 Variación del IRI según la longitud de evaluación

El IRI puede ser calculado sobre cualquier longitud de camino; sin embargo, los usuarios deben entender que el cálculo del IRI depende altamente sobre cuál longitud es acumulado. De esta forma, aunque la bibliografía casi siempre habla solamente del valor del IRI de una carretera, es conocido que para ser precisos se debe añadir cada cuanto se determina dicho valor. Es decir, el IRI es el valor promedio de los IRI unitarios (habitualmente el valor unitario más utilizado es cada 0,25 m). Por su parte, la definición de un valor global de referencia de una carretera puede variar dependiendo de cada país o agencia que administra los pavimentos, la cual puede definir valores de IRI cada 50 m,

Cuadro 1. Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de pavimentos

Equipo	Descripción	Grado de precisión	Aplicaciones	Complejidad del equipo	Observaciones
Nivel y mira topográfica	Es la manera más conocida para la medición del perfil longitudinal. El equipo consiste en una mira de precisión graduada con unidades convenientes de elevación (típicamente divisiones de cm o de ft), y un nivel topográfico empleado para establecer el dato de la línea horizontal.	Muy alto	Mediciones de perfil y calibraciones de equipos complejos.	Simple	Poco práctico y costos muy elevados para proyectos largos.
Dipstick	El Dipstick consiste de un inclinómetro sostenido entre dos apoyos separados por 300 mm o 250 mm (dependiendo de las unidades de análisis, los apoyos pueden separarse 12 in), los cuales registran la elevación de un apoyo relativo a la elevación del otro.	Muy alto	Mediciones de perfil y calibraciones de equipos complejos.	Muy simple	Poco práctico y costos elevados para proyectos largos.
Perfilómetros	Los perfilómetros tienen una rueda sensible, montada al centro del marco para mantener el movimiento vertical libre. La desviación de un plano de referencia establecido por el marco del perfilómetro, se registra (automáticamente en algunos modelos) en papel según el movimiento de la rueda sensible. Se pueden encontrar en una gran variedad de formas, configuraciones y marcas.	Medio	Control de calidad y recepción de obras	Simple	No son prácticos para evaluar la condición a nivel de red.
Equipos tipo respuesta (RTRRMS)	Equipos RTRRMS operan a la velocidad normal de circulación de una carretera. Miden los movimientos verticales del eje trasero del automóvil o el eje remolque respecto al marco del vehículo. De esta manera, el equipo mide la respuesta (rebote) del vehículo a la regularidad del camino, por lo que no es realmente una medida verdadera de la lisura de la superficie.	Medio	Monitoreo de carreteras a nivel de red.	Compleja	Los resultados no son transportables ni estables en el tiempo, pues dependen de la dinámica particular del movimiento del vehículo.
Perfilómetro inercial	Son equipos de alto rendimiento que producen medidas automáticas y de alta calidad del perfil del camino. Determina el movimiento vertical del eje de referencia y mide el desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento. Las mediciones son independientes de cualquier variación en el peso y la velocidad del vehículo, temperatura, color y textura del pavimento.	Muy alto	Monitoreo de carreteras a nivel de red y recepción de proyectos viales.	Muy compleja	Equipo de alta precisión, cuyos resultados son transportables y estables en el tiempo. Su principal uso es la evaluación de redes viales grandes.

Fuente: (Ventura y Alvarenga, 2005).

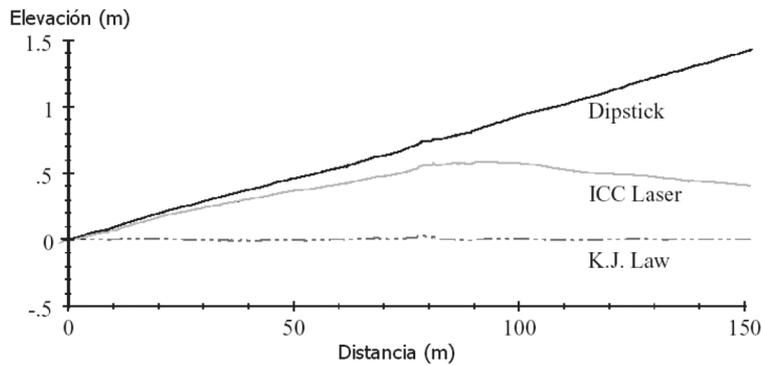


Figura 3. Variaciones aparentes de perfiles longitudinales utilizando diferentes equipos.

Fuente: (Sayers & Karamihas, 1998).

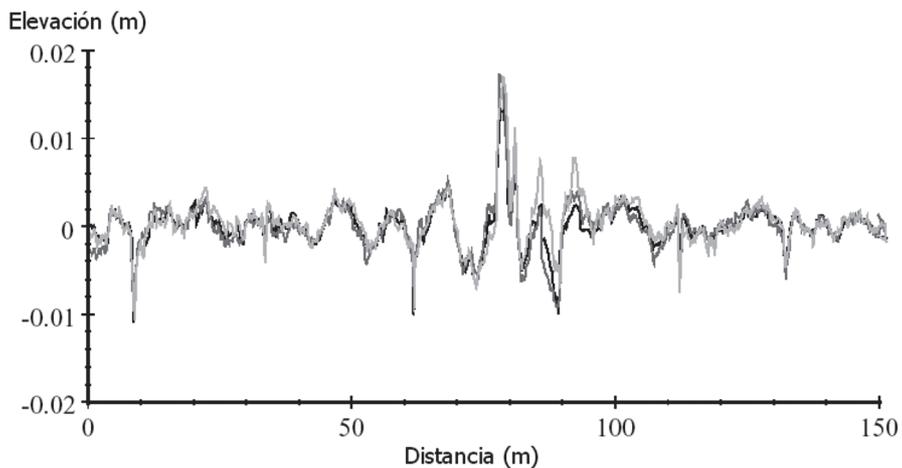


Figura 4. Los mismos perfiles de la figura anterior después del filtrado.

Fuente: (Sayers & Karamihas, 1998).

o cada 100 m, o 200 m, etc. dependiendo de la experiencia que tenga la agencia.

En vista de la importancia que tiene la longitud para la determinación del IRI, es necesario establecer un intervalo de longitud, ya que intervalos de longitud mayores ocultan niveles altos de regularidad superficial en los pavimentos, obteniendo de una manera engañosa valores de IRI satisfactorios. Por otra parte, la utilización de intervalos de longitud menores para la determinación del IRI puede detectar niveles

altos de irregularidad, contribuyendo a obtener pavimentos con mejores niveles de seguridad y confort. La Figura 5 y los Cuadros 2 y 3 muestran los resultados de IRI obtenidos cuando se realizan variaciones en la longitud de evaluación.

Como se puede observar en la Figura 5 y en los Cuadros 2 y 3, las variaciones en la longitud del intervalo de medición del IRI, tiene incidencia directa en los resultados, de forma tal que los valores se suavizan como consecuencia del efecto de promediar. Lo cual

es bastante evidente, al observar los primeros 200 m del tramo, en los cuales se dan valores de IRI mayores a 10 y valores de IRI inferiores a 2, cuando el intervalo de evaluación es igual a 5 m. Por su parte, al calcular el valor del IRI en una longitud de evaluación de 200 m, el efecto de promediar los valores dentro de este tramo muestra un valor de IRI igual a 3,5, lo cual puede resultar en la obtención inadecuada de valores de IRI satisfactorios, en algunos casos.

2.5 Efecto de singularidades en la medición y cálculo del IRI

La correcta terminación de los pavimentos es de gran importancia para la comodidad, seguridad y costos de operación de los usuarios de los caminos, factor que además de tener una gran influencia en la duración de estos, repercute en los costos del mantenimiento vial. Debido a que IRI involucra la diferencia entre el perfil longitudinal teórico y el perfil longitudinal existente, es un hecho que se pueden presentar ciertas singularidades que pueden afectar la medición del IRI. Según el LNV 107-2000, se entiende como singularidad a:

Cualquier alteración del perfil longitudinal del camino que no provenga de fallas constructivas y que incremente el valor del IRI en el tramo en que se encuentra. Entre ellas se pueden citar puentes, badenes, tapas de alcantarillas, cuñas, cruces de calles y otras, que por diseño geométrico alteren el perfil del camino.

Debe tenerse en cuenta que el valor de la medición del IRI se verá afectado a todo lo largo de la singularidad más su área de influencia, que son 40 m hacia delante en el sentido de la medición, lo cual corresponde a una característica propia del método de cálculo del IRI.

Aunque la definición anterior está relacionada con alteraciones en el perfil longitudinal que no provienen de fallas constructivas, se muestra a continuación un ejemplo particular de lo que ocurre cuando se calcula el IRI en un tramo en el cual se presenta una junta de construcción, en la cual en una longitud de 5 cm se produjo una depresión de 1,5 cm de profundidad superficial debido a fallas constructivas (ver Figura 6).

Se puede notar que esta falla constructiva genera un incremento en el valor del IRI (valor superior a 3 m/km para un intervalo de evaluación

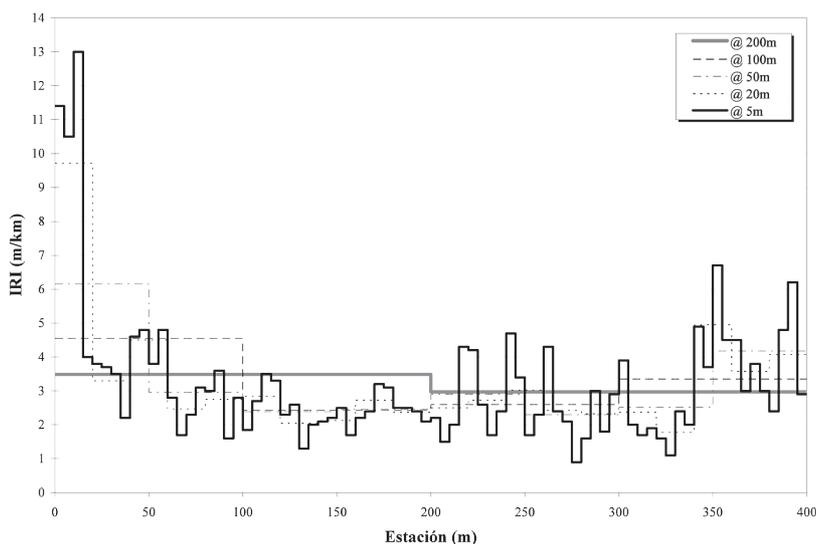


Figura 5. Variación en el valor del IRI según la longitud de evaluación.

Fuente: (El autor).

Cuadro 2. Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación.

Estación inicial (m)	Estación final (m)	Valores de IRI promediando resultados del RSP a diferente intervalos				
		Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m
0	5	11,4				
5	10	10,5	9,7			
10	15	13,0				
15	20	4,0				
20	25	3,8		6,2		
25	30	3,7	3,3			
30	35	3,5				
35	40	2,2				
40	45	4,6				
45	50	4,8	4,5		4,6	
50	55	3,8				
55	60	4,8				
60	65	2,8				
65	70	1,7	2,5			
70	75	2,3		3,0		
75	80	3,1				
80	85	3,0				
85	90	3,6	2,8			
90	95	1,6				
95	100	2,8				
100	105	1,9				3,5
105	110	2,7	2,8			
110	115	3,5				
115	120	3,3				
120	125	2,3		2,4		
125	130	2,6	2,1			
130	135	1,3				
135	140	2,0				
140	145	2,1				
145	150	2,2	2,1		2,4	
150	155	2,5				
155	160	1,7				
160	165	2,2				
165	170	2,4	2,7			
170	175	3,2		2,5		
175	180	3,1				
180	185	2,5				
185	190	2,5	2,4			
190	195	2,4				
195	200	2,1				

Fuente: (El autor).

Cuadro 3. Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación.

Estación inicial (m)	Estación final (m)	Valores de IRI promediando resultados del RSP a diferente intervalos				
		Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m
200	205	2,2				
205	210	1,5	2,5			
210	215	2,0				
215	220	4,3				
220	225	4,2		2,9		
225	230	2,6	2,7			
230	235	1,7				
235	240	2,4				
240	245	4,7				
245	250	3,4	3,0		2,6	
250	255	1,7				
255	260	2,3				
260	265	4,3				
265	270	2,4	2,4			
270	275	2,1		2,3		
275	280	0,9				
280	285	1,6				
285	290	3,0	2,3			
290	295	1,8				
295	300	2,9				
300	305	3,9				3,0
305	310	2,0	2,4			
310	315	1,7				
315	320	1,9				
320	325	1,6		2,5		
325	330	1,1	1,8			
330	335	2,4				
335	340	2,0				
340	345	4,9				
345	350	3,7	5,0		3,4	
350	355	6,7				
355	360	4,5				
360	365	4,5				
365	370	3,0	3,6			
370	375	3,8		4,2		
375	380	3,0				
380	385	2,4				
385	390	4,8	4,1			
390	395	6,2				
395	400	2,9				

Fuente: (El autor).

de 5 m), especialmente si se utilizan intervalos o longitudes de evaluación más cortos. En el caso de que aumente la longitud de evaluación, los resultados de los valores de IRI se reducen e imposibilitan determinar el sitio donde se presentan las particularidades. Puede notarse también los 40 m del área de influencia después del sitio donde se presentó la particularidad, especialmente cuando se emplean intervalos o longitud de evaluación pequeños, fenómeno que deberá considerarse cuando se define la longitud de evaluación del IRI, en el caso del establecimiento de una especificación.

2.6 Otras consideraciones relacionadas con la regularidad superficial

Un estudio realizado por Townsend & Veliz (2002), presenta algunas consideraciones, en términos cualitativos, que deben tenerse en cuenta para el control receptivo de proyectos:

- La presencia de desvíos durante la construcción de las obras, aseguran valores de regularidad bajos, respecto a aquellas obras ejecutadas sin la presencia de estos.
- La geometría del camino asociada a curvas verticales y horizontales, pendientes, gradientes, peraltes y otras, durante la etapa constructiva de las obras puede afectar la adecuada terminación de los caminos, en términos de obtener valores de IRI aceptables.

- La calidad y tecnología de las maquinarias, los equipos topográficos, las buenas prácticas constructivas, el adiestramiento y la capacitación de operadores, aseguran una baja regularidad.
- Según la experiencia internacional, es conveniente anticipar controles de regularidad en las capas estructurales inferiores a la superficie de rodado. La evaluación de la capacidad funcional en cada etapa de la construcción se presenta como una alternativa complementaria a las tradicionales. La evaluación por capas puede corregir eventualmente diferencias en la construcción de una capa y mejorar la regularidad superficial del pavimento.

Por su parte Zaghoul (1996), estableció que valores iniciales elevados de IRI ocasionan mayores deterioros en el tiempo, mayor costo de mantenimiento, una vida útil de servicio inadecuada y rehabilitaciones o reconstrucciones a temprana edad del pavimento. Aun solucionándose los deterioros iniciales, el pavimento siempre presentará fallas funcionales en el tiempo más graves que aquel pavimento que inició su vida útil con un valor de IRI menor.

En el estudio de Janoff (1988), se muestra el efecto de la regularidad inicial sobre el desempeño del pavimento a largo plazo, presentando los siguientes resultados:

- Los pavimentos con una menor regularidad inicial tienen niveles más bajos de regularidad para los siguientes diez años a la construcción.

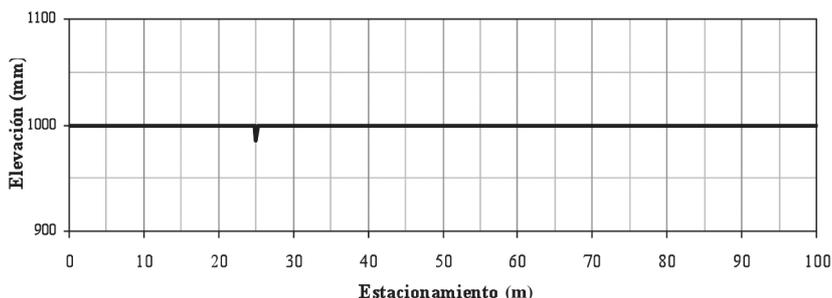


Figura 6. Simulación de una junta de construcción

Fuente: (El autor).

- Los pavimentos con una menor regularidad inicial tienen niveles más bajos de agrietamiento para los siguientes diez años a la construcción.
- Los pavimentos con una menor regularidad inicial tienen costos anuales medios de mantenimiento más bajos para los siguientes diez años a la construcción.
- En un periodo de diez años, los ahorros anuales alcanzan en promedio US\$ 588/km carril. Además se espera que la carretera dure aproximadamente cuatro años más.

En el estudio de la NCHRP 1-31 se estimó que un mejoría del 50 % en la regularidad del pavimento implica un incremento del 15 % en la vida útil del pavimento y que, en la pista de ensayo de la WestTrack se determinó que una reducción del 10 % en el valor del IRI resulta en un incremento en el rendimiento del combustible de 1,91 km/L aproximadamente. Además, se determinó que mayores irregularidades implican un aumento de la frecuencia de falla en componentes de los camiones y remolques.

Finalmente, aumentar la vida útil de las carreteras y ahorrar millones de colones en mantenimiento, depende de solo empezar a darle una mayor importancia a los procedimientos, especificaciones y control de calidad durante la colocación de las mezclas asfálticas para beneficio de los usuarios y contribuyentes.

CONCLUSIONES

1. El IRI es independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil. Depende únicamente de la calidad del perfil longitudinal.
 2. Para indicar un valor adecuado del IRI es necesario especificar cuál es el intervalo o longitud de evaluación, ya que el IRI es el valor medio de los IRI unitarios.
 3. Intervalos de longitud mayores ocultan niveles altos de regularidad superficial en los pavimentos, obteniendo valores de IRI satisfactorios.
 4. La presencia de desvíos durante la construcción de las obras, asegura valores de regularidad bajos, respecto a aquellas obras ejecutadas sin la presencia de estos.
5. La geometría del camino asociada a curvas verticales y horizontales, pendientes, gradientes, peraltes y otras, durante la etapa constructiva de las obras pueden afectar la adecuada terminación de los caminos en términos de obtener valores de IRI aceptables.
 6. La calidad y tecnología de las maquinarias, los equipos topográficos, el adiestramiento y la capacitación de operadores, aseguran una baja regularidad.
 7. Según la experiencia internacional, es conveniente anticipar controles de regularidad en las capas estructurales inferiores a la superficie de rodado.
 8. Aumentar la vida útil de las carreteras y ahorrar millones de colones en mantenimiento, depende de solo empezar a darle una mayor importancia a los procedimientos, especificaciones y control de calidad durante la colocación de las mezclas asfálticas para beneficio de los usuarios y contribuyentes.

NOTAS

1. Véase la sección 2.1 Definición de regularidad superficial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Awasthi, G. & Singh, T. (May 2003). On pavement roughness indices. IE (I) Journal-CV. Recuperado el 19 de diciembre 2007 de: <http://www.ieindia.org/publish/cv/0503/may03cv6.pdf>
- Budras, J. (Ago 2001). A synopsis on the current equipment used for measuring pavement smoothness. Recuperado el 11 de diciembre 2007 de: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/smoothness/rough.cfm>
- Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP) (Jul 1999). Summary of pavement smoothness specifications in Canada and

- around the world. Technical Brief #16. Canada. Recuperado 18 de diciembre 2007 de: <http://www.cshrp.org/products/br-6-e.pdf>
- Crespo del Río, R. (Set 2003). Variación del IRI según la longitud de evaluación. Área de Gestión de Infraestructura. AEPO Ingenieros Consultores. Madrid, España.
- De Solminihaç, H., Cabrera, C. & Bengoa, E. (s.f.) Evaluación de la capacidad estructural y funcional del pavimento durante el proceso de construcción. Chile.
- Montes, R. (s.f.). Determinación de la rugosidad de los pavimentos mediante perfilometría longitudinal. Sub-Unidad de Normalización, Laboratorio Nacional de Vialidad. Chile
- Ningyuan, L., Marciello, F. & Kazmicrowski, T. (s.f.) Quality assurance applied in measuring pavement roughness of Ontario provincial roads. Ontario, Canadá. Recuperado el 18 de diciembre 2007 de: <http://pms.nevadadot.com/2002presentations/47.pdf>
- Sayers, M. (1995). On the calculation of International Roughness Index from longitudinal road profile. Transportation Research Record, Transportation Research Board (TRB), Washington, DC. No. 1501, pp 1-12.
- Sayers, M. & Karamihas, S. (Set 1998). The little book of profiling: basic information about measuring and interpreting road profiles. University of Michigan, USA. Recuperado el 19 de diciembre 2007 de: <http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness>
- Townsend, E. & Veliz, C (s.f.). Determinación de umbrales de rugosidad (IRI) obtenido de base de datos de caminos con controles receptivos. Chile. Recuperado el 19 de diciembre 2007 de: http://www2.udec.cl/~provincial/trabajos_pdf/43EdgardoTownsendUmbralrugosidad.pdf
- UMTRI Research Review (Jan-Mar 2002). The shape of roads to come: measuring and interpreting road roughness profiles. Vol 33. Num 1.
- Ventura, J. & Alvarenga E. (May 2005). Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Unidad de Investigación y Desarrollo Vial. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano. República de El Salvador
- Zaghloul, S. (1996). Benefits of constructing smoother pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 65:747-770.

SOBRE EL AUTOR

Gustavo A. Badilla Vargas

Ingeniero civil. Licenciado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica
 Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
 Unidad de Investigación en Infraestructura Vial (UI)
 Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes
 San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
 Teléfono: (506) 2511-4994
 Facsímil: (506) 2511-4442
 Correo electrónico: gustavo.badilla@ucr.ac.cr