



Obtención del índice de regularidad internacional “iri” en pavimentos flexibles con distanciómetro láser

Obtaining the international regularity index “iri” in flexible pavements with a laser distance meter

Obtenção do índice de regularidade internacional “iri” em pavimentos flexíveis com um distanciómetro laser

Viviana Liceth Briones Moreira ^I
vbrionesmoreira@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-1334-748X>

Pablo Aníbal Trujillo Jiménez ^{II}
pablo.trujillo@hotmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-8449-2064>

Correspondencia: vbrionesmoreira@gmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 26 de agosto de 2024 * **Aceptado:** 30 de septiembre de 2024 * **Publicado:** 10 de octubre de 2024

- I. Estudiante de la Maestría en Ingeniería Civil Mención Vialidad, Portoviejo, Manabí, Ecuador.
- II. Magíster en Construcción de Obras Viales, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

Resumen

La regularidad de los pavimentos en las vías, al encontrarse en buenas condiciones entrega a los usuarios una buena comodidad o confort y al mismo tiempo brinda seguridad al transitar por ellas, la mala condición se relaciona directamente con daños de tipo funcional y/o estructural, afectando la vida útil; por lo indicado, surge la necesidad de contar con un sistema de medición que sea de uso generalizado; es así, que el Banco Mundial en 1986 sugiere como un estándar estadístico al IRI, siendo este un parámetro que mide la condición en la que se encuentra la capa de rodadura de un camino. Este indicador es un insumo para diseñar programas de mantenimiento de una vía a corto mediano y largo plazo. Existe una gran variedad de equipos con sus propios procedimientos, clasificados de acuerdo al grado de precisión. La Norma ASTM-E 1364-95, describe el Método de Nivel Estático para la creación de un perfil topográfico y aplicando el procedimiento sugerido por el Banco Mundial y con el uso de Excel y el software Proval 3.6, resulta posible la obtención de la medición. Con este mismo principio se crea un instrumento que se encuentra anclado un distanciómetro Láser que se desliza hasta una longitud de 30 cm., permitiendo así la obtención de distancias horizontales y verticales, resultando estas por diferencia de nivel y mediante una cota de inicio se obtiene las demás cotas para formar un perfil longitudinal, insumo necesario para calcular el IRI.

Palabras Clave: Distanciómetro Laser; Índice de Regularidad Internacional; Excel; Proval 3.6.

Abstract

The regularity of the pavements on the roads, when in good condition, provides users with good comfort and at the same time provides safety when traveling on them; the poor condition is directly related to functional and/or structural damage, affecting the useful life; for this reason, the need arises to have a measurement system that is widely used; thus, the World Bank in 1986 suggested the IRI as a statistical standard, this being a parameter that measures the condition of the tread layer of a road. This indicator is an input to design maintenance programs for a road in the short, medium and long term. There is a wide variety of equipment with its own procedures, classified according to the degree of precision. The ASTM-E 1364-95 Standard describes the Static Level Method for the creation of a topographic profile and by applying the procedure suggested by the World Bank and with the use of Excel and the Proval 3.6 software, it is possible to obtain the measurement. Using this same principle, an instrument is created that is anchored to a laser distance meter that

slides up to a length of 30 cm, thus allowing the obtaining of horizontal and vertical distances, these resulting from level difference and through a starting elevation, the other elevations are obtained to form a longitudinal profile, a necessary input to calculate the IRI.

Keywords: Laser Distance Meter; International Regularity Index; Excel; Proval 3.6.

Resumo

A regularidade dos pavimentos nas estradas, estando em boas condições, proporciona uma boa comodidade ou conforto aos utentes e ao mesmo tempo proporciona segurança na sua circulação. Como indicado, surge a necessidade de ter um sistema de medição que seja amplamente utilizado; Assim, em 1986, o Banco Mundial sugeriu o IRI como padrão estatístico, sendo este um parâmetro que mede o estado do pavimento de uma estrada. Este indicador é um input para a elaboração de programas de manutenção rodoviária a curto, médio e longo prazo. Existe uma grande variedade de equipamentos com procedimentos próprios, classificados de acordo com o grau de precisão. A Norma ASTM-E 1364-95 descreve o Método do Nível Estático para a criação de um perfil topográfico e aplicando o procedimento sugerido pelo Banco Mundial e com a utilização do Excel e do software Proval 3.6 é possível obter a medição. Com este mesmo princípio, é criado um instrumento que é ancorado a um distanciómetro laser que desliza até um comprimento de 30 cm, permitindo assim obter distâncias horizontais e verticais, resultando numa diferença de nível e através de uma altura inicial. dimensões para formar um perfil longitudinal, input necessário para o cálculo do IRI.

Palavras-chave: Medidor de distâncias a laser; Índice de Regularidade Internacional; Excel; Prova 3.6.

Introducción

Uno de los parámetros más importantes para controlar el nivel de servicio es la rugosidad de la carretera que es promovida por el Banco Mundial y se cuantifica a través del IRI (Índice de Rugosidad Internacional). Este índice estandariza la rugosidad superficial en la vía. (Arriaga, Garnica. & Rico, 1998).

Una buena regularidad brinda condiciones de comodidad, confort y seguridad para los usuarios en las vías. En caso contrario, una mala regularidad, además de afectar los aspectos anteriores, refleja

daños y deterioros de carácter funcional y estructural de los pavimentos que influyen negativamente en su estado de condición y vida útil. (Badilla, 2009)

Los caminos son obras tridimensionales, cuyos elementos quedan definidos mediante las proyecciones sobre los planos ortogonales de referencia: Planta, Elevación y Sección Transversal. El elemento básico para tal definición es el eje de la vía, cuyas proyecciones en planta y elevación constituyen el alineamiento horizontal y perfil longitudinal, respectivamente (Marcobal, Diaz, Marquez, Saldaña, 2017)

El cálculo matemático del Índice Internacional de Rugosidad está basado en la acumulación de desplazamientos en valor absoluto, de la masa superior con respecto a la masa inferior (en milímetros, metros o pulgadas) de un modelo de vehículo dividido entre la distancia recorrida sobre un camino (en m, km. o millas) que se produce por los movimientos al vehículo, cuando éste viaja a una velocidad de 80 km/hr. El IRI se expresa en unidades de mm/m, m/km, in/mi, etc. (México, IRI 1998).

Según el Documento Técnico número 46 del Banco Mundial, existen métodos de rugosidad que se dividen en 4 clases; la clase 1, Perfiles de precisión; clase 2, otros métodos perfilométricos; clase 3, estimación del IRI a partir de ecuaciones de correlación; y clase 4, calificaciones subjetivas.

1. METODOLOGÍA

1.1. Modelo matemático del IRI

El modelo matemático para obtener el IRI se conoce internacionalmente como “Modelo de cuarto de coche” ya que simula la suspensión y masas de la cuarta parte de un vehículo tipificado que circula a 80km/h por el tramo de carretera que se pretende evaluar, Figura 1. Existen dos grupos de sistemas que definen las masas, rigideces y amortiguaciones de este vehículo: uno es el referido al rugosímetro original del BPR (Bureau of Public Roads) y otro al HSRI (Highway Safety Research Institute), este último adoptado por el Banco Mundial y su cálculo 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.

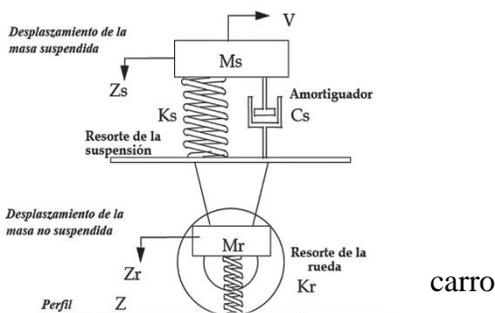


Figura 1. Modelo de cuarto de
Fuente. Banco Mundial -1998.

En el Documento Técnico número 46 del Banco Mundial pag. 4, muestra el rango aproximado de rugosidad IRI en diferentes tipos de caminos, cabe reconocer que el IRI es un número que resume las cualidades de la rugosidad que impactan en la respuesta del vehículo, pero puede que no sea el más apropiado para otras aplicaciones, más específicamente el IRI es apropiado cuando se desea una medida de la rugosidad relacionada con el costo total de operación del vehículo, Figura 2.

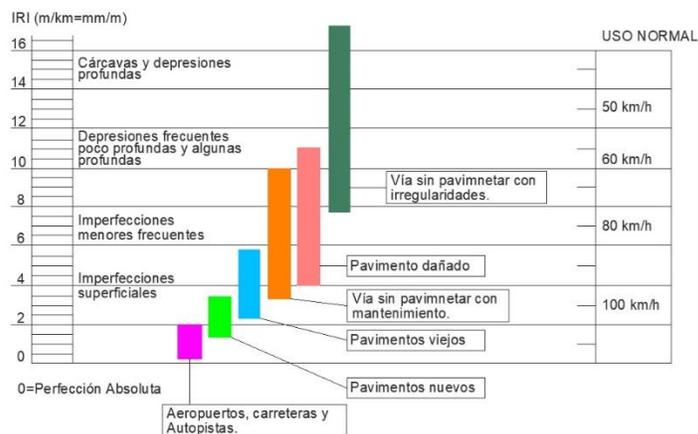


Figura 2. Escala de rugosidad

Fuente. Documento Técnico número 46 del Banco Mundial pag. 5

De las 4 clases emitidas por el Banco Mundial, para el presente artículo se realiza la comparación con la clase 1, como indica.

Clase 1. Perfiles de precisión: esta clase representa el más alto grado de exactitud en la medición y cálculo del IRI. Para que un método pertenezca a esta clase requiere una medida de precisión de perfil longitudinal y que sea definido por medio de una serie de puntos de elevación equidistantes a través de la huella de la vía.

Esta media según el apartado 6.5.1 de la Norma ASTM-E 1364-95, indica que el intervalo máximo entre mediciones es de 1 pie (305 mm.). En la figura 3 el equipo utilizado, es un nivel electrónico GeoMax ZDL700 y en la figura 4 el equipo creado al que se incorporó un distanciómetro láser Disto 8.



Figura 3.- Mira y Nivel Electrónico

Fuente: Propia



Figura 4.- Equipo creado

Fuente: Propia

1.2.Procedimiento para obtener el perfil longitudinal de la carretera

Para la medición del perfil longitudinal superficial de la carretera se realizan los siguientes pasos:

1.2.1. Técnicas

a. Medición del perfil longitudinal del camino con Mira y Nivel.

La norma (ASTM E 1364 – 95); determina que las mediciones de distancia (dx), máximo será de un pie (305mm.), para este caso de investigación se determinó segmentos de (0.30 m), en una longitud de 163.20 m. siguiendo la huella izquierda y derecha del camino.

Se dio un BM de inicio y con el uso de un Nivel Electrónico GeoMax ZDL700, se registró 545 lecturas mediante el proceso de nivelación geométrica y por cada carril, registrando la cota de cada punto materializado de forma automática.

b. Medición del perfil longitudinal del camino con Equipo Láser creado.

El equipo Láser creado para esta investigación consiste en el anclaje de un soporte a 90 grados colocado en un bastón porta prisma con plomada tipo ojo de pollo y sostenido por un bípode. En este soporte se adaptó una cabina que permite el deslizamiento de un distanciómetro Láser Disto 8 hasta una longitud de 30 cm. o 0.30 m. que tiene como finalidad realizar mediciones verticales a 0.00m y en 0.30 m. de distancia, lo que permite conocer el desnivel en cada segmento. Este procedimiento se lo realiza en todos los segmentos que conforman el tramo de investigación tanto para el perfil izquierdo como derecho y se registra la información en una hoja de campo diseñada para este procedimiento.

c. Instrumentos de recolección de datos

Para que la investigación tenga el efecto deseado, se dispone de accesorios y equipos necesarios que exigen los procedimientos utilizados, y son:

1.2.2. Equipos, Accesorios y materiales

- Cinta métrica graduada en cm.
- Mira topográfica de 4 m. con código de barras
- Trípode
- Cámara fotográfica
- Calculadora
- Hojas tipo para notas de campo, lápiz
- Chalecos de seguridad
- Conos de seguridad
- Pintura acrílica, martillo y clavos
- Nivel Electrónico
- Equipo creado con distanciómetro Láser Disto 8

- Vehículo

1.2.3. Procesamiento de información

La información de campo a obtenerse corresponde a la registrada por el Nivel Electrónico GeoMax ZDL700 y la leída por el equipo creado con distanciómetro Láser Disto 8.

a. Procesamiento de información obtenida del Nivel Electrónico.

El Nivel Electrónico GeoMax ZDL700, tiene la capacidad de almacenar la información capturada de campo; es así, que se puede extraer directamente las cotas registradas del perfil izquierdo y derecho del tramo investigado. Esta información se almacena en una hoja de Excel colocando la abscisa y cota de cada punto levantado como se observa en la Figura 5.



Figura 5. Perfil longitudinal con Nivel Electrónico de huella izquierda y derecha

Fuente. Propia

b. Procesamiento de información obtenida de equipo creado con distanciómetro Láser Disto 8

La información obtenida con este equipo, se registró de forma manual y mediante digitalización en una hoja electrónica de Excel, se obtuvo las cotas de cada punto que forma parte del perfil longitudinal y su resultado se observa en la figura 6.



Figura 6. Perfil longitudinal con equipo Láser de huella izquierda y derecha

Fuente. Propia

c. Aplicación del filtro Media Móvil

Los perfiles son filtrados para mejorar la calidad de las mediciones eliminando “ruido” indeseado de los datos y para extraer información de interés (Sayers & Karamihas, 1998). Según (Badilla, 2009), el filtro de media móvil se aplica por dos razones fundamentalmente: Para simular el comportamiento entre llantas de los vehículos y la carretera y para reducir la sensibilidad del algoritmo del IRI al intervalo de muestreo.

También su uso permite comparar mediciones realizadas con diferentes métodos de un mismo perfil. La “Media Móvil” según (Fundora Ayuso, 2014); es el método más sencillo para suavizar un perfil y consiste en realizar un promedio de cotas con una base seleccionada que en este caso es de 22.20 m., esto permite el reemplazo de cada punto del perfil con el promedio de todos los puntos adyacentes que se encuentran dentro de la base de medición, dando como resultado un perfil suavizado así se indica en la Figura 7.

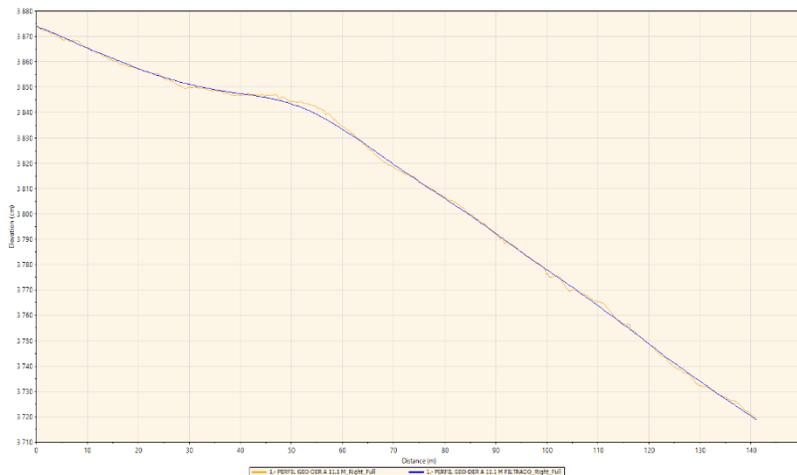


Figura 7. Ejemplo de Perfil filtrado Media Móvil base= 22.20 m.

Fuente: Propia

Las cotas del perfil geométrico derecha, se denominan (Y_r), y las cotas del perfil filtrado (Y_s), en la Tabla 1, se observa la secuencia de datos, estos se extienden hasta la abscisa 0+141, que corresponde a la longitud de perfil que forma parte de la investigación.

Tabla 1. Ejemplo de secuencia de cotas del Perfil de terreno y perfil filtrado

Fuente: Propia

Abscisas	Cotas Perfil de Terreno	Cotas (Perfil Filtrado) base=22.20m.
	(Y_r)	(Y_s)
0+000.00	38.745	38.740
0+000.30	38.738	38.738
0+000.60	38.732	38.735
0+000.90	38.730	38.733
0+001.20	38.724	38.731
0+001.50	38.722	38.728
0+001.80	38.727	38.726
0+002.10	38.724	38.724
0+002.40	38.716	38.721
0+002.70	38.713	38.719
0+003.00	38.708	38.716

1.3.Cálculo del IRI en hoja electrónica de Excel

El Documento Técnico número 46 del Banco Mundial en su apartado 3.4.1, pag. 31 y 32, plantea las ecuaciones del modelo cuarto de coche, que es posible aplicarlas en una hoja electrónica de Excel y además se puede realizar su comparación con el programa computacional ProVAL 3.61.

2.3.1. Ecuaciones

El IRI se obtiene mediante el cálculo de cuatro variables como funciones del perfil medido. Estas cuatro variables simulan la respuesta dinámica de un vehículo de referencia viajando sobre el perfil medido. Las ecuaciones para las cuatro variables se resuelven para cada punto de elevación medido, excepto el primer punto. La pendiente media durante los primeros 11 m (0,5 segundos a 80 km/h) se utiliza para inicializar las variables asignando los siguientes valores:

Valores iniciales

$$Z'1 = Z'3 = (Y_a - Y_1) / 11 \quad (1)$$

$$Z'2 = Z'4 = 0$$

(2)

$$a = (11/dx) + 1 \quad (3)$$

Donde:

(**Y_a**) es la elevación del punto "a-ésimo", a una distancia de 11 m del comienzo del perfil.

Para determinar (**Y_a**) se aplica la ecuación (3), $a = (11/0.30) + 1 = 37.7$, se redondea al inmediato superior que es la Fila 38, del valor (**Y_r**) que se resta a la Fila 1 de (**Y_s**). Este proceso es continuo hasta culminar en la abscisa 0+141, ver como ejemplo la Tabla 2.

Tabla 2. Ejemplo de secuencia para obtener el valor de (Ya)

Fuente: Propia

Abcisas	Cotas Perfil de Terreno	Cotas (Perfil Filtrado) base=22.20m.	Ya
	(Yr)	(Ys)	(Yr-Ys)
0+000.00	38.745	38.740	0.005253
0+000.30	38.738	38.738	0.000427
0+000.60	38.732	38.735	-0.003307
0+000.90	38.730	38.733	-0.002987
0+001.20	38.724	38.731	-0.006773
0+001.50	38.722	38.728	-0.006493
0+001.80	38.727	38.726	0.000867
0+002.10	38.724	38.724	0.000307
0+002.40	38.716	38.721	-0.005293
0+002.70	38.713	38.719	-0.005840
0+003.00	38.708	38.716	-0.008307

Luego se resuelven las cuatro ecuaciones recursivas que serán aplicadas a cada punto de elevación medido, desde la Fila 2 hasta la Fila (n), siendo (n) el número total de elevaciones consideradas para el cálculo, que en el caso de investigación, n=471 lecturas.

Ecuaciones:

$$Z1 = s11.Z'1+s12.Z'2+s13.Z'3+s14.Z'4+ P1.Y' \tag{4}$$

$$Z2 = s21.Z'1+s22.Z'2+s23.Z'3+s24.Z'4 + P2.Y' \tag{5}$$

$$Z3 = s31.Z'1+s32.Z'2+s33.Z'3+s34.Z'4+ P3.Y' \tag{6}$$

$$Z4 = s41.Z'1+s42.Z'2+s43.Z'3+s44.Z'4 + P4.Y' \tag{7}$$

Donde

$$Y' = (Yi - Yi-1)/dx = \text{Pendiente de entrada} \tag{8}$$

Es la pendiente que resulta de la diferencia de la posición 2 de (Yi) menos posición 1 de (Yi), dividido a dx=0.30, siendo dx la separación de cada lectura del perfil, el cálculo es iterativo hasta llegar a la abscisa 0+141.

Y además

$$(Zj' = Zj) \text{ desde la posición anterior, } j = 1,2,3,4 \tag{9}$$

S_{ij} y P_j son coeficientes que permanecen fijos para un mismo intervalo dx . Así las ecuaciones 4, 5, 6, 7, se resuelven para cada posición a lo largo de la huella de las ruedas. Una vez resuelto para una posición la ecuación 9, se utiliza para restablecer los valores de Z_1' , Z_2' , Z_3' , y Z_4' para la siguiente posición.

Tabla 3. Coeficientes S_{ij} y PR para 30 cm. De intervalo

Fuente: Documento Técnico número 46 del Banco Mundial pag. 36

Coeficientes S_{ij} y PR para 30 cm. de intervalo				
s11-s14	s21-s24	s31-s34	s41-s44	PR
0.9951219000	0.0132302200	-0.0047216490	0.0004516408	0.0095999890
-0.6468806000	0.9338062000	-1.3192620000	0.0565940400	1.9661430000
0.0301887600	0.0030109390	0.6487856000	0.0091292630	0.3210257000
3.6619570000	0.3772937000	-43.4046800000	0.3016807000	39.7427300000

También para cada posición se calcula la pendiente rectificada de la Estática de Conducción (RS) del perfil filtrado se calcula como:

$$RS_i = |Z_3 - Z_1| \tag{10}$$

El IRI estadístico es el promedio de la pendiente rectificada, se calcula como el movimiento acumulado en metros, de la suspensión del “cuarto de coche”, y se divide por la longitud del perfil recorrido en km. El IRI se representa con las unidades (m/km), la ecuación es.

$$IRI = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=2}^n RS_i \tag{11}$$

2.3.2. Aplicación de las ecuaciones desde la 1 hasta la 11 para determinar el IRI.

Considerando lo extenso del procesamiento de información, como ejemplo en la Tabla 1 y Tabla 2, se indica la manera de calcular (Ya) del perfil geométrico derecho, este procedimiento se aplica para los cuatro perfiles con 545 lecturas cada uno y al haber aplicado un filtro 22.2 m. entonces para el cálculo del IRI, le corresponde 471 lecturas que da una longitud de investigación de 141 m.

2.3.3. Cálculo Fila 1 de Tabla 4:

Se describe el procedimiento para llegar a obtener el IRI del tramo; para esto, en la fila 1 de las columnas Z_1 , Z_2 , Z_3 y Z_4 , le corresponde los valores iniciales de Z_1' , Z_2' , Z_3' y Z_4' , su cálculo se obtiene aplicando las ecuaciones (1) y (2) así:

(Ya), se toma el valor de la fila 38, le corresponde un valor=-0.000133, ver Tabla 4

(Y1), se toma el valor de la fila 1 de (Ya), le corresponde un valor=-0.005253, ver Tabla 4

$$Z'1 = Z'3 = (Y_a - Y_1) / 11 = (-0.000133 - 0.005253) / 11 = -0.00490 \quad (1)$$

$$Z'2 = Z'4 = 0 \quad (2)$$

Así mismo siguiendo la Fila 1 de las columnas Y'i pend. entrada, RSi, RSacumulado, IRI, le corresponde valor de cero, por ser el inicio al cálculo, ver tabla 4.

2.3.4. Cálculo Fila 2 de Tabla 4:

En la columna Y'i pend. entrada, le corresponde el cálculo como sigue ver Tabla 4:

$$Y' = (Y_i - Y_{i-1}) / dx = \text{Pendiente de entrada} \quad (8)$$

$$Y' \text{ i pend. Entrada} = (Y_a \text{ Fila 2} - Y_a \text{ Fila 1}) / 0.30$$

$$Y' \text{ i pend. Entrada} = (0.000427 - 0.005253) / 0.30 = -0.016089$$

Se continúa el cálculo de la fila 2 de las columnas Z1, Z2, Z3 y Z4, con las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) así:

$$Z1 = s11 \cdot Z'1 + s12 \cdot Z'2 + s13 \cdot Z'3 + s14 \cdot Z'4 + P1 \cdot Y' \quad (4)$$

$$Z1 = (0.9951219 \times -0.000490) + (0.01323022 \times 0) + (-0.004721649 \times 0.000490) + (0.0004516408 \times 0) + (0.009599989 \times -0.016089) = -0.000639$$

$$Z2 = s21 \cdot Z'1 + s22 \cdot Z'2 + s23 \cdot Z'3 + s24 \cdot Z'4 + P2 \cdot Y' \quad (5)$$

$$Z2 = (-0.6438806 \times -0.000490) + (0.9338062 \times 0) + (-1.319262 \times 0.000490) + (0.05659404 \times 0) + (1.966143 \times -0.016089) = -0.030670$$

$$Z3 = s31 \cdot Z'1 + s32 \cdot Z'2 + s33 \cdot Z'3 + s34 \cdot Z'4 + P3 \cdot Y' \quad (6)$$

$$Z3 = (0.03018876 \times -0.000490) + (0.003010939 \times 0) + (0.6487856 \times 0.000490) + (0.009129263 \times 0) + (0.3210257 \times -0.016089) = -0.005497$$

$$Z4 = s41 \cdot Z'1 + s42 \cdot Z'2 + s43 \cdot Z'3 + s44 \cdot Z'4 + P4 \cdot Y' \quad (7)$$

$$Z4 = (3.661957 \times -0.000490) + (0.3772937 \times 0) + (-43.40468 \times 0.000490) + (0.3016807 \times 0) +$$

$$+(39.74273 \times -0.016089) = - \mathbf{0.619954}$$

2.3.4. Cálculo Fila 3:

En la columna Y'i pend. entrada, le corresponde el cálculo como sigue ver Tabla 4:

$$Y' = (Y_i - Y_{i-1}) / dx = \text{Pendiente de entrada} \quad (8)$$

$$Y' \text{ i pend. Entrada} = (Y_{\text{a Fila 3}} - Y_{\text{a Fila 2}}) / 0.30$$

$$Y' \text{ i pend. Entrada} = (-0.003306 - 0.000427) / 0.30 = - \mathbf{0.012444}$$

Se continúa el cálculo de la fila 3 de las columnas Z1, Z2, Z3 y Z4, con las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) así:

Los valores de Z'1, Z'2, Z'3 y Z'4, se adoptan de los de la fila 2 y son:

$$Z'1 = -0.00063945, Z'2 = -0.03067024, Z'3 = -0.00549744, Z'4 = -0.61995448$$

$$Z1 = s_{11}.Z'1 + s_{12}.Z'2 + s_{13}.Z'3 + s_{14}.Z'4 + P1.Y' \quad (4)$$

$$Z1 = (0.9951219 \times -0.00063945) + (0.01323022 \times -0.03067024) + (-0.004721649 \times -0.00549744) + (0.0004516408 \times -0.61995448) + (0.009599989 \times -0.012444) = - \mathbf{0.001416}$$

$$Z2 = s_{21}.Z'1 + s_{22}.Z'2 + s_{23}.Z'3 + s_{24}.Z'4 + P2.Y' \quad (5)$$

$$Z2 = (-0.6438806 \times -0.00063945) + (0.9338062 \times -0.03067024) + (-1.319262 \times -0.00549744) + (0.05659404 \times -0.61995448) + (1.966143 \times -0.012444) = - \mathbf{0.080527}$$

$$Z3 = s_{31}.Z'1 + s_{32}.Z'2 + s_{33}.Z'3 + s_{34}.Z'4 + P3.Y' \quad (6)$$

$$Z3 = (0.03018876 \times -0.00063945) + (0.003010939 \times -0.03067024) + (0.6487856 \times -0.00549744) + (0.009129263 \times -0.61995448) + (0.3210257 \times -0.012444) = - \mathbf{0.013333}$$

$$Z4 = s_{41}.Z'1 + s_{42}.Z'2 + s_{43}.Z'3 + s_{44}.Z'4 + P4.Y' \quad (7)$$

$$Z4 = (3.661957 \times -0.00063945) + (0.3772937 \times -0.03067024) + (-43.40468 \times -0.00549744) + (0.3016807 \times -0.61995448) + (39.74273 \times -0.012444) = -0.456903$$

El proceso para el cálculo de las incógnitas Z1, Z2, Z3 y Z4 de las ecuaciones (4), (5), (6) y (7), es iterativo hasta la posición (n=471) que corresponde a una longitud de 141m.

2.3.5. Cálculo de (RSi)

El cálculo de (RSi), es el valor absoluto de (Z3 - Z1), desde la fila 2 hasta la posición (n=471).

$$RS_i = |Z_3 - Z_1| \quad (10)$$

$RS_2 = |-0.005497 - (-0.000639)| = 0.004858$, valor (RS) de la fila 2.

El proceso para el cálculo de la ecuación (10), es iterativo hasta la posición (n=471) que corresponde a una longitud de 141m.

2.3.6. Cálculo de (RSiacumulado)

Consiste en realizar la suma acumulada desde la fila 2 hasta la posición (n=471) que corresponde a una longitud de 141m.

2.3.7. Cálculo del (IRI)

$$IRI = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=2}^n RS_i \quad (11)$$

El cálculo del IRI, se lo obtiene parcialmente desde la Fila 2 hasta la Fila 471 así:

$$IRI_{0+000.30} = (RS_{acumulado} / (n-1)) * 1000$$

$$IRI_{0+000.30} = (0.004858 / (2-1)) * 1000 = \mathbf{4.858}$$
, corresponde a la fila 2

$$IRI_{0+000.60} = (RS_{acumulado} / (n-1)) * 1000$$

$$IRI_{0+000.60} = (0.016775 / (3-1)) * 1000 = \mathbf{8.388}$$
, corresponde a la fila 3

Se calcula la posición (n=471)

$$IRI_{0+141.00} = (2.992783 / (471-1)) * 1000 = 6.368$$
, corresponde a la fila 471

Tabla 4. Ejemplo de secuencia de cálculo del IRI perfil geométrico derecho

Fuente: Propia

Abscisas	Cotas Perfil de Terreno		Cotas (Perfil Filtrado) base=22.20m.		Ya	Z1	Z2	Z3	Z4	Y'i pend. entrada	Ride Statics	Ride Statics	IRI
	(Yr)	(Ys)	(Yr-Ys)	(Yr-Ys)	(RSi)	(RSacumulado)	(m./Km.)						
0+000.00	38.745	38.740	0.005253	-0.000490	0.000000	-0.000490	0.000000	#	0.000000	0.000000	0.000000	0.000	
0+000.30	38.738	38.738	0.000427	-0.000639	-0.030670	-0.005497	-0.619954	-0.016089	0.004858	0.004858	0.004858	4.858	
0+000.60	38.732	38.735	-0.003307	-0.001416	-0.080527	-0.013333	-0.456903	-0.012444	0.011917	0.011917	0.016775	8.388	
0+000.90	38.730	38.733	-0.002987	-0.002607	-0.080452	-0.012764	0.447703	0.001067	0.010157	0.026932	0.026932	8.977	
0+001.20	38.724	38.731	-0.006773	-0.003518	-0.056080	-0.008567	0.147547	-0.012622	0.005049	0.031982	0.031982	7.995	
0+001.50	38.722	38.728	-0.006493	-0.004126	-0.028605	-0.004187	0.419416	0.000933	0.000060	0.032042	0.032042	6.408	
0+001.80	38.727	38.726	0.000867	-0.004040	0.053453	0.008778	1.257366	0.024533	0.012818	0.044860	0.044860	7.477	
0+002.10	38.724	38.724	0.000307	-0.002805	0.108437	0.016614	-0.070491	-0.001867	0.019418	0.064278	0.064278	9.183	
0+002.40	38.716	38.721	-0.005293	-0.001646	0.040465	0.004384	-1.453592	-0.018667	0.006030	0.070308	0.070308	8.789	
0+002.70	38.713	38.719	-0.005840	-0.001797	-0.052780	-0.010938	-0.692005	-0.001822	0.009141	0.079450	0.079450	8.828	
0+003.00	38.708	38.716	-0.008307	-0.002826	-0.089023	-0.016267	-0.087251	-0.008222	0.013441	0.092890	0.092890	9.289	
0+003.30	38.711	38.714	-0.002787	-0.003776	-0.028602	-0.005797	1.367068	0.018400	0.002020	0.094911	0.094911	8.628	
0+003.60	38.709	38.711	-0.002240	-0.003474	0.064332	0.009104	0.711826	0.001822	0.012578	0.107489	0.107489	8.957	
0+003.90	38.703	38.709	-0.005707	-0.002438	0.067875	0.008784	-0.628125	-0.011556	0.011223	0.118712	0.118712	9.132	
0+004.20	38.701	38.706	-0.005107	-0.001834	0.021755	0.000738	-0.474611	0.002000	0.002572	0.121284	0.121284	8.663	
0+004.50	38.694	38.703	-0.009493	-0.001896	-0.035081	-0.008538	-0.754836	-0.014622	0.006642	0.127926	0.127926	8.528	
0+004.80	38.696	38.701	-0.004867	-0.002503	-0.032665	-0.007643	0.735623	0.015422	0.005139	0.133065	0.133065	8.317	
0+005.10	38.687	38.698	-0.011227	-0.002758	-0.018852	-0.005222	-0.310393	-0.021200	0.002464	0.135529	0.135529	7.972	
0+005.40	38.684	38.696	-0.011560	-0.003121	-0.028681	-0.006719	0.071662	-0.001111	0.003598	0.139127	0.139127	7.729	
0+005.70	38.688	38.693	-0.004867	-0.003207	0.032023	0.003277	1.177692	0.022311	0.006484	0.145611	0.145611	7.664	
0+006.00	38.689	38.690	-0.001187	-0.002133	0.118422	0.016815	0.700892	0.012267	0.018948	0.164559	0.164559	8.228	
0+006.30	38.685	38.687	-0.002480	-0.000360	0.120970	0.016216	-0.652879	-0.004311	0.016576	0.181136	0.181136	8.626	
0+006.60	38.677	38.685	-0.007720	-0.000703	0.020511	-0.000693	-1.550674	-0.017467	0.001396	0.182532	0.182532	8.297	
0+006.90	38.683	38.682	0.001093	0.000556	-0.010385	-0.005092	0.740150	0.029378	0.005648	0.188180	0.188180	8.182	
0+007.20	38.686	38.679	0.006853	0.000958	0.076299	0.009602	1.205497	0.019200	0.008644	0.196824	0.196824	8.201	
0+007.50	38.685	38.676	0.008587	0.002518	0.137544	0.019349	0.208807	0.005778	0.016831	0.213655	0.213655	8.546	
0+007.80	38.683	38.674	0.009360	0.004353	0.118171	0.015777	-0.613268	0.002578	0.011424	0.225079	0.225079	8.657	
0+008.10	38.682	38.671	0.011120	0.005600	0.063546	0.007008	-0.576128	0.005867	0.001408	0.226487	0.226487	8.388	
0+008.40	38.680	38.668	0.011907	0.006145	0.19022	0.000489	-0.329282	0.002622	0.005656	0.232143	0.232143	8.291	
0+008.70	38.674	38.665	0.008667	0.006112	-0.026727	-0.005913	-0.520110	-0.010800	0.012025	0.244169	0.244169	8.420	
0+009.00	38.669	38.663	0.006373	0.005448	-0.065576	-0.010935	-0.191766	-0.007644	0.016383	0.260551	0.260551	8.685	
0+009.30	38.659	38.660	-0.000907	0.004286	-0.108899	-0.016668	-0.552455	-0.024267	0.020954	0.281506	0.281506	9.081	
0+009.60	38.659	38.657	0.001840	0.002742	-0.095738	-0.013117	0.895282	0.009156	0.015859	0.297364	0.297364	9.293	
0+009.90	38.656	38.655	0.001493	0.001917	-0.025474	-0.000913	0.767414	-0.001156	0.002830	0.300194	0.300194	9.097	
0+010.20	38.655	38.652	0.003120	0.001973	0.030269	0.008135	0.484053	0.005422	0.006162	0.306356	0.306356	9.010	
0+010.50	38.652	38.649	0.002733	0.002532	0.041116	0.009434	-0.239658	-0.001289	0.006902	0.313258	0.313258	8.950	
0+010.80	38.647	38.647	0.000307	0.002833	-0.005156	0.001536	-0.778471	-0.008089	0.001297	0.314555	0.314555	8.738	
0+011.10	38.644	38.644	-0.000133	0.002378	-0.055615	-0.006511	-0.351391	-0.001467	0.008889	0.323444	0.323444	8.742	

Una vez obtenidos los valor del IRI parcialmente, se procede a obtener el promedio de (n-1)=470, por lo extenso de la hoja de cálculo se presenta los valores del IRI, de los cuatro perfiles investigados en una longitud de 141m.

Tabla 5. Valor del IRI de cuatro perfiles topográficos, en hoja electrónica Excel

Fuente: Propia

COMPARACIÓN DEL IRI PARA LONGITUD DE PERFIL DE 141 m.				
ABSCISAS		DESCRIPCIÓN	PERFIL	EXCEL
DESDE	HASTA			IRI (m/km)
0+000.00	0+141.00	1.- PERFIL IZQUIERDO CON GEOMAX700	Izquierdo	9.693
0+000.00	0+141.00	2.- PERFIL LASSER-IZQUIERDA	Izquierdo	9.715
0+000.00	0+141.00	3.- PERFIL DERECHO CON GEOMAX700	Derecho	6.324
0+000.00	0+141.00	4.- PERFIL LASSER-DERECHA	Derecho	6.007

1.4.Cálculo del IRI con ProVAL 3.61

El manual del Usuario de ProVAL menciona que es una aplicación de software de ingeniería que permite ver y analizar perfiles de pavimento longitudinales de muchas maneras diferentes, para



nuestro caso de investigación lo utilizamos para importar datos de texto de perfiles longitudinales, con la finalidad de calcular el IRI de cada uno de los tramos seleccionados en esta investigación.

1.4.1. Paso 1

El interfaz del programa tiene su inicio como se indica en la figura 8, donde permite ingresar un nuevo proyecto:

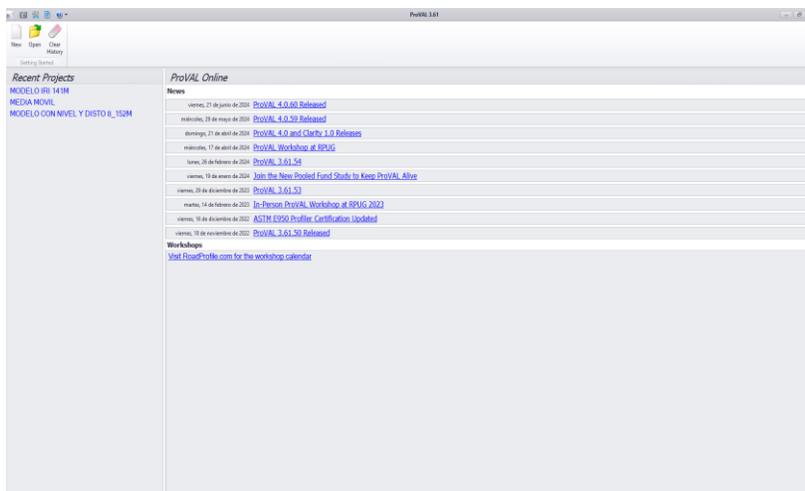


Figura 8. Interfaz de inicio de ProVAL 3.61

Fuente: Propia

1.4.2. Paso 2

Ya en nuevo Proyecto, se agrega los cuatro archivos de texto que contiene los cuatro perfiles para su análisis ver Figura 9.

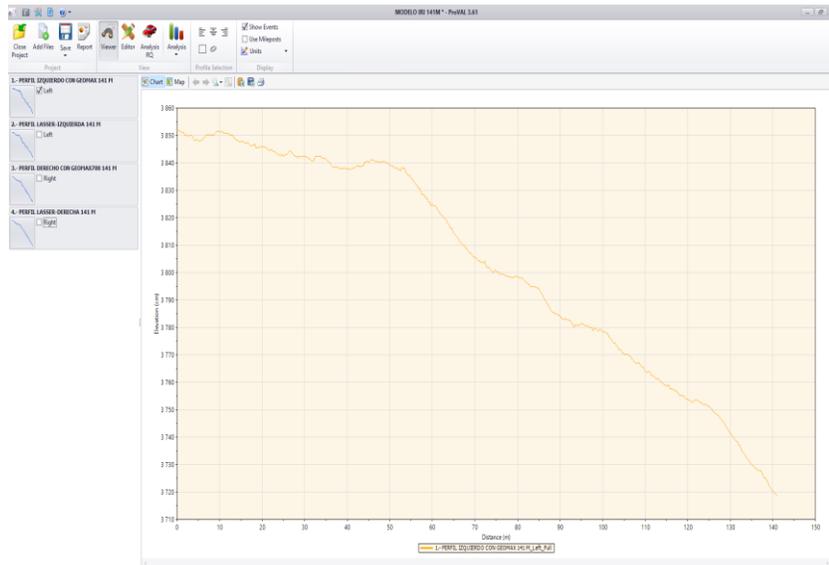


Figura 9. Importación de cuatro perfiles

Fuente: Propia

1.4.3. Paso 3

En el icono Análisis RQ, se obtiene el cálculo del IRI de los cuatro perfiles ingresado, ver figura 10.

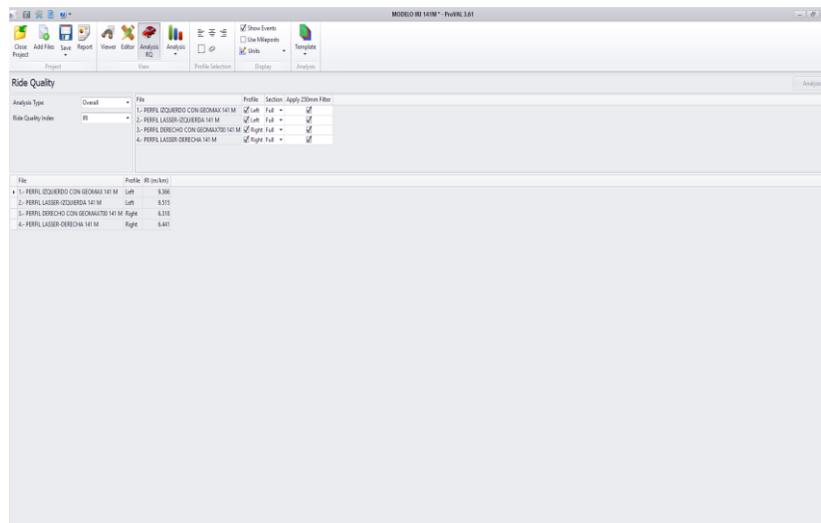


Figura 10. Cálculo del IRI de cuatro perfiles.

Fuente: Propia

1.4.4. Resultados del cálculo del IRI con ProVAL 3.61

En pantalla ampliada se observa los valores de IRI, para realizar comparación con resultados del IRI en hoja electronica de Excel, ver Figura 11.

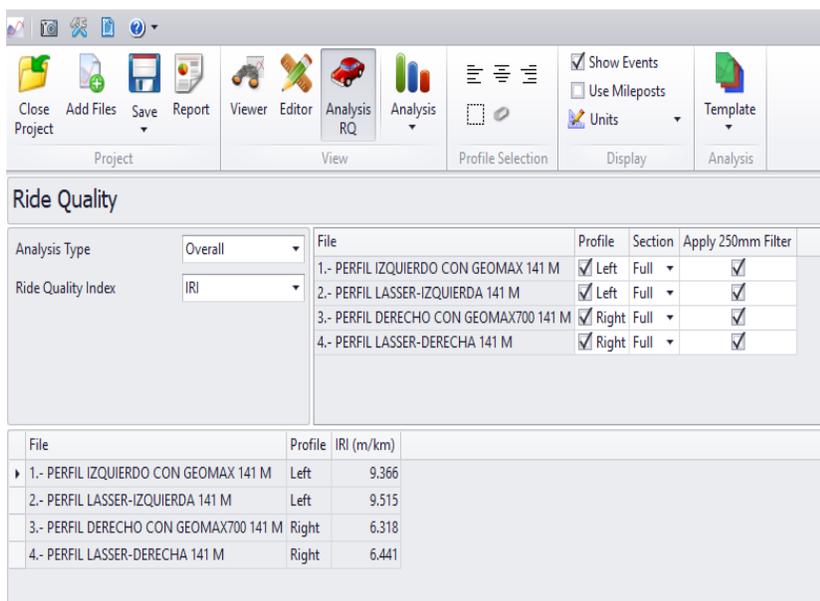


Figura 11. Resultados del IRI con ProVAL 3.61

Fuente: Propia

1.5.Comparación de Resultados del IRI en hoja electrónica de Excel y el software ProVAL 3.61

Tabla 6. Resultados del IRI con ProVAL 3.61

Fuente: Propia

COMPARACIÓN DEL IRI PARA LONGITUD DE PERFIL DE 141 m.						
ABSCISAS		DESCRIPCIÓN	PERFIL	EXCEL	ProVAL 3.61	DIF. IRI (m/km)
DESDE	HASTA			IRI (m/km)	IRI (m/km)	
0+000.00	0+141.00	1.- PERFIL IZQUIERDO CON GEOMAX700	Izquierdo	9.693	9.366	0.327
0+000.00	0+141.00	2.- PERFIL LASSER-IZQUIERDA	Izquierdo	9.715	9.515	0.200
0+000.00	0+141.00	3.- PERFIL DERECHO CON GEOMAX700	Derecho	6.324	6.318	0.006
0+000.00	0+141.00	4.- PERFIL LASSER-DERECHA	Derecho	6.007	6.441	-0.435

2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:

Una vez realizados los cálculos donde se determinó el IRI de los cuatro perfiles, el objeto de esta investigación fue comparar los resultados obtenidos con Nivel Electrónico GeoMax ZDL700 y el equipo creado con distanciómetro Láser Disto 8, se tiene los siguientes resultados:

- En la Tabla 5 se observa que los valores de IRI, calculados en hoja electrónica de Excel y ProVAL 3.61, difieren ± 0.435 (m/km), lo que determina que si es posible utilizar esta herramienta electrónica.
- Además en la Tabla 5 se observa que los valores de IRI, de la hoja electrónica de Excel de los perfiles 1 y 2, correspondientes al lado izquierdo del camino, difiere 0.022 (m/km) y los perfiles 3 y 4, correspondientes al lado derecho del camino, difiere 0.317 (m/km), esto significa que si es posible realizar mediciones con el equipo creado.

3. CONCLUSIONES:

- El uso de este equipo creado resulta satisfactorio para realizar monitoreos del IRI.
- El uso de la hoja electrónica de Excel, aplicando todos los procedimientos emitidos por el Banco Mundial, resulta satisfactoria para el cálculo del IRI.

4. RECOMENDACIONES:

- Para realizar monitoreo del IRI con equipo creado, solo serviría para tramos muy cortos debido al alto período de tiempo que requiere para realizar las mediciones.

Para la calibración de otros equipos, el más exacto es utilizando la Norma ASTM-E 1364-95, que se refiere al uso de mira y nivel y así sea considerado como clase 1 y para la determinación del IRI, podría utilizarse ProVAL 3.61 u otras versiones más actuales siguiendo alineamiento emitidos por el Banco Mundial.

Referencias

- [1] G. Badilla, “Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI)”, *Infraestructura Vial*, vol 21, pp. 30-37, 2009.

- [2] M. Arriaga, P. Garnica and A. Rico, “Índice internacional de rugosidad en la red carretera de México”, Publicación Técnica No. 108, Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro., 1998.
- [3] J. Marcobal, R. Diaz, W. Marquez, D. Saldaña, “Evaluación de la rugosidad (IRI) en caminos pavimentados de geometría restringida: cálculo del IRI geométrico – caso de aplicación”. Congreso Ibero- Latinoamericano del Asfalto, Medillin, 2017.
- [4] Designation: E1364 – 95, “Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method”, ed. Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards, (2017)
- [5] M. Sánchez, “Procedimiento para determinar el Índice de Regularidad Internacional (IRI) en pavimentos, a partir del procesamiento de imágenes obtenidas por cámaras convencionales” Master Thesis, Universidad Tecnológica de la Habana, José Antonio Echeverría, 2019. Available from: <https://www.researchgate.net/profile/maria-sanchez-86/publication/334897050>.
- [6] M. Sayers, T. Gillespie, y W. Paterson, “Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements”, WORLD BANK TECHNICAL PAPER NUMBER, ed. 46, 1986, pp. 31-36.
- [7] J. Gonzalo, H. Beingolea, “Aplicación del Smartphone y el rugosímetro de Merlín para la medición de la rugosidad del pavimento flexible en la Av. Internacional, Tacna” Master Thesis, Universidad Particular de Tacna, Perú, 2021, Available from: <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/1801>.