

Control de Calidad de la Regularidad Superficial de los Pavimentos Utilizando Perfilómetros Inerciales

Carlos M. Chang-Albitres, Ph.D.¹; P.E., Daniel Saenz²; Willians R. Mertz Villa, M.A. Eco³;
Franck P. Vásquez Pérez, B.E.⁴

RESUMEN

Los perfilómetros inerciales son equipos de alto rendimiento usados para evaluar la regularidad superficial de los pavimentos utilizando el Índice de Rugosidad Internacional (International Roughness Index, IRI) como parámetro de medición. Las mediciones realizadas con los perfilómetros son parte del proceso de control de calidad de los pavimentos terminados y sirven también para el desarrollo de estrategias de gestión de mantenimiento y rehabilitación. Si no se satisfacen los valores de IRI exigidos en las especificaciones, los Contratistas son sometidos a penalidades. Por esta razón, se exige que los perfilómetros sean sometidos a un proceso de certificación y validación en el campo. Las normas ASTM E 950/E950M y Tex-1001-S describen los procedimientos de certificación. Complementariamente, para validar la precisión y exactitud de las mediciones se requieren de análisis estadísticos que incluyen correlaciones, pruebas de hipótesis, y análisis de la varianza (ANOVA). Este trabajo describe los procedimientos de certificación y validación utilizando como ejemplo los resultados obtenidos por el perfilómetro Chasqui de HOB Consultores, S.A. en pistas de prueba ubicadas en Texas, Estados Unidos. El trabajo incluye también recomendaciones para mejorar precisión y exactitud de las mediciones de IRI.

1. INTRODUCCIÓN

Las agencias de transporte utilizan la medición de regularidad superficial del perfil longitudinal como parámetro para evaluar la condición funcional de los pavimentos, determinar la calidad de una obra terminada, y formular estrategias de gestión de mantenimiento y rehabilitación durante su vida en servicio. El Índice de Rugosidad Internacional (International Roughness

¹ Profesor del Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Texas en El Paso,

² Asistente de Investigación Departamento de Ingeniería, Universidad de Texas en El Paso.

³ Consultor en asuntos de Innovación Tecnológica relacionados a equipos de medición de pavimentos.

⁴ Ingeniero Electrónico, Bachiller Ingeniería Electrónica, Departamento de Diseño y Desarrollo de HOB INNOVA.

Index, IRI) es la unidad de medida establecida como escala común para la medición de la regularidad superficial.

La gran extensión de las redes viales, limitaciones de tiempo, disponibilidad de personal, y recursos monetarios han llevado a la necesidad de implementar perfilómetros de alto rendimiento para medir la rugosidad de los pavimentos. Los perfilómetros inerciales son los equipos más modernos y tienen la capacidad de medir en forma continua a velocidades normales de operación vehicular. Previamente a su uso, los perfilómetros inerciales deben ser certificados en pistas de prueba y el registro de mediciones validadas en campo. La norma ASTM E950/E950M y Tex-1001-S son usualmente utilizadas para estos fines (1,2). Este paso es indispensable, puesto que las mediciones del perfil longitudinal son usadas para obtener el IRI que sirve para el control de calidad de los pavimentos terminados, afectando los pagos al Contratista así como los presupuestos de mantenimiento y rehabilitación.

2. CLASES DE PERFILÓMETROS

Los perfilómetros se clasifican de acuerdo a como se recolectan y modelan los datos del perfil longitudinal. Podemos mencionar los tipos de perfilómetro siguientes:

- a. Perfilómetros de alta precisión: Estos equipos pueden realizar medidas muy exactas del perfil longitudinal a distancias menores a 25 cm (9.84 in) y con una precisión de 0.5 mm (984.25 milésimas de pulgada). Usualmente son equipos de bajo rendimiento utilizados para para la verificación y calibración de otros equipos.
- b. Perfilómetros inerciales: Este tipo de perfilómetros son de alto rendimiento operativo y utilizan sensores láser instalados en un vehículo que recorre la carretera a velocidades normales de operación. Estos equipos pueden llegar a una alta precisión en las mediciones dependiendo de los componentes que lo integran.

- c. Rugosímetro Dinámico: Estos equipos obtienen los datos de un vehículo que recorre la vía a velocidad uniforme. La calibración dinámica del vehículo tiene un efecto directo en el nivel de precisión y depende de las ecuaciones de correlación para calcular la rugosidad.

Por otro lado, la ASTM E950/E950M clasifica los perfilómetros en cuatro categorías como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de Perfilómetros según ASTM E 950/950 M

Clase	Resolución (R)	
	Longitudinal	Vertical
1	$R \leq 25 \text{ mm}$	$R \leq 0.1 \text{ mm}$
2	$25 \text{ mm} < R \leq 150 \text{ mm}$	$0.1 \text{ mm} < R \leq 0.2 \text{ mm}$
3	$150 \text{ mm} < R \leq 300 \text{ mm}$	$0.2 \text{ mm} < R \leq 0.5 \text{ mm}$
4	$R > 300 \text{ mm}$	$R > 0.5 \text{ mm}$

Los perfilómetros clase 1 son los de mayor precisión y exactitud. Los perfilómetros inerciales usualmente clasifican como clase 1 o 2 utilizando sensores láser para registrar las variaciones en las elevaciones del perfil longitudinal conforme el vehículo recorre la vía.

3. INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX (IRI)

Las mediciones de los perfiles verticales son filtradas y trasladadas a una escala común con el modelo matemático denominado *The Golden Car* que se muestra en la Figura 1. El modelo calcula la desviación de las elevaciones con respecto al perfil promedio, simulando la suspensión de un cuarto de carro de un sistema mecánico (3). Las desviaciones con respecto al perfil vertical son acumuladas y divididas por la distancia longitudinal siendo el valor resultante el IRI expresado en unidades de m/km o pulg/milla.

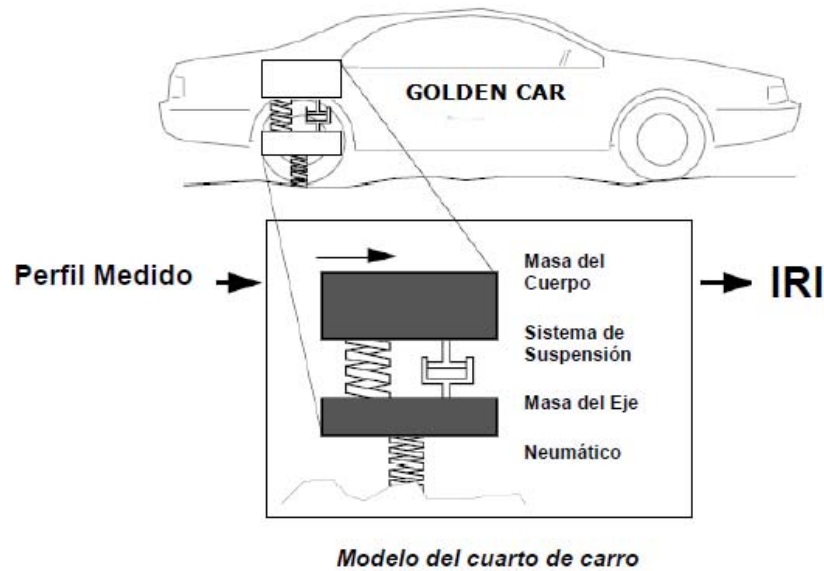


Figura 1. Modelo The Golden Car. (Adaptado de 3)

En sistemas discretos como es el caso de la medición de las elevaciones del perfil longitudinal es necesario tomar en cuenta criterios que influyen en la fidelidad para la medición de las señales como son: “aliasing”, ancho de banda o banda útil, frecuencia de muestreo, periodo de muestreo, rango dinámico de señales, entre otros. El periodo de muestreo determina los pasos para la obtención del perfil longitudinal, el cual es el inverso de la frecuencia de muestreo (análogo al muestreo en el tiempo) o ciclos/m al cual se registra el perfil longitudinal. El “aliasing” determina la mínima frecuencia de muestreo o ciclos/m al que debe registrarse el perfil longitudinal, según Nyquist este deber ser el doble de la frecuencia máxima de una señal. Este criterio es muy importante puesto que de existir longitudes de onda con valores “significativos” en amplitud que superen a la mitad de la frecuencia de muestreo contaminarán la información (efecto aliasing). El rango dinámico determina la variación máxima que puede registrar una señal con los instrumentos de medición, de lo contrario se introduce una distorsión armónica no lineal a las longitudes de onda que satura los datos afectando la calidad de la información recolectada. El ancho de banda útil es determinado por el nivel de “significancia” o “participación” de las longitudes de onda en el cálculo de los diferentes parámetros tales como el IRI, RN, etc. De, acuerdo al *World Bank Technical Paper Number 46* la banda útil para el cálculo del IRI se

encuentra entre 30 m a 1.5 m; por otro lado, la norma ASTM 950 recomienda que se registren longitudes de ondas sin alteración desde 60m (4).

4. CONTROL DE CALIDAD DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL

El IRI es un indicador de la condición funcional del pavimento o serviciabilidad, estando directamente relacionado con el nivel de confort del usuario al transitar la vía. Así por ejemplo, un valor de IRI menor a 1.5 m/Km indica una superficie de pavimento en muy buenas condiciones, en cambio un IRI mayor a 4 m/km indica un pavimento en pésimas condiciones.

En los Contratos por conservación de niveles de servicio se exigen valores mínimos de IRI al inicio del período de servicio y durante el periodo de la concesión. La Tabla 2 muestra valores de IRI típicamente utilizados para la aceptación de pavimentos por niveles de servicio.

Tabla 2. Valores de IRI para la Aceptación del Pavimentos por Niveles de Servicio

IRI para recepción de las Obras	IRI medio deslizante máximo, intervalo de 1 Km (concreto asfáltico).	2.0 m/Km (126.72 pulg./milla) IRI con una tolerancia de 20%
	IRI medio deslizante máximo, intervalo de 1 Km (Tratamiento superficial/sellado).).	3.0 m/Km (190 pulg./milla) IRI con una tolerancia de 15%
IRI durante el periodo de Conservación	IRI medio deslizante máximo, intervalo de 1 Km (concreto asfáltico).	3.0 m/Km (190 pulg./milla) IRI con una tolerancia de 15%
	IRI medio deslizante máximo, intervalo de 1 Km (tratamiento superficial c/sellado).).	4.0 m/Km (253.44 pulg./milla) IRI con una tolerancia de 10%

Las agencias de transporte establecen también normas de control de calidad exigiendo rugosidades mínimas a los pavimentos terminados. Así por ejemplo, el ítem 585 del “Manual de Especificaciones Estándar para la Construcción y Mantenimiento de Carreteras, Calles y Puentes” del Departamento de Transporte de Texas (TxDOT) indica los requerimientos del equipo, proceso de toma de mediciones, y el ajuste en el pago o trabajo correctivo de acuerdo a los resultados de IRI (5). El ítem 585 establece que las mediciones deben ser tomadas en un plazo de 7 días después de terminado el pavimento utilizando para la evaluación de la regularidad superficial el procedimiento descrito en la especificación Tex-1001-S.

La especificación Tex-1001-S indica el nivel de resolución exigido al equipo, la velocidad mínima del vehículo, la distancia del borde de la calzada, y el espaciamiento entre los neumáticos. La calidad del pavimento terminado para fines de ajustes de pago al Contratista son establecidos en base a valores de IRI medidos en secciones con intervalos de 161 m. Toda sección que tenga un IRI mayor a 1.50 m/km (95.0 pulg/milla) debe ser corregida por el Contratista estando sujeta a una penalización. El Contratista puede también recibir bonificaciones si el IRI es igual o menor que 0.95 m/Km.

El ajuste para el pago y corrección de la regularidad superficial del pavimento es categorizado en tres programas que dependen del IRI existente, la clase de vía, la velocidad mínima, y el número de oportunidades que tiene el Contratista para mejorar la rugosidad. En la Tabla 3, se muestra una guía general para los programas de ajuste y pago. El programa 1 es el más estricto exigiendo un IRI final a 1.025 m/km (65 pulg/milla), el programa 2 requiere un IRI final de 1.2 m/km (75 pulg/milla), y el programa 3 no requiere ajuste. Si no se corrige el IRI de la sección observada, se procede a aplicar una penalidad de \$3,000.

Tabla 3. Guía General para Establecer Programas de Pago basados en IRI

Descripción del Proyecto			Programa de Ajuste de Pago Recomendado	
Construcción Nueva o Rehabilitación Mayor	Pavimentos Rígidos	Pavimento de Concreto Reforzado Continuo	2	
		Pavimento de Concreto de Juntas Simple	3	
	Pavimento flexible con mezcla en caliente de grosor mayor a 38 mm		1	
Recapado con Asfalto o Rehabilitación Menor	Pavimentos rígidos ligados o no ligados y recapados con asfalto		3	
	Pavimento flexibles con mezcla en caliente de espesor menor a 38 mm		3*	
	Todas las carreteras con velocidad menor a 72.40 Km/h		3*	
	Pavimento flexible con mezcla asfáltica en caliente de espesor mayor a 38 mm	Cuando el Contratista tiene 2 oportunidades de mejorar el IRI	Todo tipo de carretera excepto carreteras de 2 carriles sin dividir	1*
			Carretera de 2 carriles sin dividir	2*
		Cuando el Contratista tiene 1 oportunidad de mejorar el IRI	Todo tipo de carretera excepto por carretera de 2 carriles sin dividir	2*
Carretera de 2 carriles sin dividir			3*	

*Dependiendo del proyecto las exigencias del programa pueden variar.

Para identificar puntos críticos localizados con valores de IRI que no cumplen con las exigencias, se calcula la media móvil en intervalos de 7.62 m (25 pies). Todas las secciones en donde se observa una desviación mayor a 3.8 mm (0.150 pulg.), tienen que ser corregidos o son sujetos a penalización si el Contratista no cumple con los programas de ajuste 1 o 2 según corresponda.

5. CERTIFICACIÓN DE PERFILÓMETROS INERCIALES

Las normas técnicas más utilizadas para la certificación de los perfilómetros son Tex-1001-S y ASTM E950/E950M. Ambas normas evalúan la precisión y exactitud de las mediciones realizadas con el perfilómetro, estableciendo requisitos mínimos para su certificación. Las agencias de transporte exigen que los perfilómetros sean certificados cada año. A continuación se describe el procedimiento de la verificación del equipo previo a la certificación, y las exigencias de precisión y exactitud para pasar las pruebas.

Verificación del Dispositivo Medidor de Distancia y Funcionamiento de sensores:

Antes de proceder a realizar las pruebas de certificación del perfilómetro, debe calibrarse el Dispositivo Medidor de Distancia (DMI), para verificar y ajustar la medición de la distancia longitudinal. Con esta finalidad el perfilómetro recorre una sección de 161 m. y para ser aceptado según la norma Tex-1001-S, debe registrar la distancia medida dentro de un rango de 0.60 m. de la distancia real.

La verificación del funcionamiento de los sensores láser y acelerómetros también se realiza para la medición de las elevaciones. Primero se coloca una placa base de espesor conocido debajo del láser y se realiza una medición con el perfilómetro la cual es utilizada como referencia. Luego se coloca una placa de 25.4 mm arriba de la placa base y se realiza una segunda medición. Finalmente, se retira la placa de 25.4 mm y la medición debe regresar a su lectura inicial, en caso contrario se debe intervenir o reemplazar el láser (generalmente los láser son intervenidos únicamente por el mismo fabricante)

Precisión de los Perfilómetros

La precisión representa el grado de repetitividad de las mediciones realizadas con el perfilómetro. Para evaluar la precisión se verifican las mediciones del perfil vertical y también los valores de IRI obtenidos en múltiples corridas realizadas en una misma sección. Para las mediciones del perfil vertical se calculan las desviaciones estándar de lecturas obtenidas en múltiples corridas para cada intervalo de registro de datos por huella a lo largo de la misma sección. De acuerdo a la Norma Tex-1001-S, el promedio de las desviaciones estándar en cada huella no debe exceder 0.889 mm (35 milésimas de pulgada) para pasar la prueba de precisión. Cabe señalar que la norma ASTM E950/E950M exige que para clasificar el perfilómetro como de Clase 1 el promedio de las desviaciones estándar no exceda 0.38 mm (0.015 pulgada)

Después de verificar la precisión de las mediciones de las elevaciones del perfil se calculan los valores de IRI por huella y la desviación estándar correspondiente. Según la norma Tex-1001-S, la desviación estándar de los valores de IRI obtenidos en corridas múltiples no debe exceder 0.047 m/Km (3.0 in/mi) para ser aceptados. Sin embargo, la norma ASTM E950/E950M no establece límites para verificar la precisión de los valores de IRI.

Exactitud de los Perfilómetros

La exactitud se refiere el grado de “cercanía” del perfil obtenido a partir de las mediciones realizadas con el perfilómetro y el perfil real del pavimento que es obtenido con una nivelación de alta precisión de acuerdo a la norma ASTM E 1364 (6). El primer paso consiste en sincronizar los dos perfiles utilizando puntos de control para definir los intervalos de registro de mediciones a lo largo del recorrido. El intervalo de registro no debe ser mayor a 69.85 mm (2.75 pulg). Se recomiendan 10 corridas múltiples para luego calcular el promedio de las mediciones por cada intervalo de registro. El promedio de las mediciones para cada intervalo de registro es comparado con los valores del perfil real. El promedio de las diferencias aritméticas de las mediciones del perfilómetro y el perfil real se le denomina μ_1 y al valor absoluto μ_2 . De acuerdo a la norma Tex-1001-S, para pasar la prueba de exactitud, μ_1 debe ser menor a 0.51 mm (20 milésimas de pulgada), y μ_2 menor a 1.52 mm (60 milésimas de pulgada). Por otro lado, para clasificar al perfilómetro como de Clase 1 la norma ASTM E950/E950M requiere que μ_2 no exceda a 1.25 mm (0.050 pulg.).

Para evaluar la exactitud del IRI se calcula el valor promedio por huella. El cálculo del IRI se realiza a partir de las mediciones realizadas con el perfilómetro y con los datos de la nivelación de precisión. Según la norma Tex-1001-S, que fue revisada en Agosto del 2012, la diferencia absoluta entre los valores IRI promedio en cada huella no debe exceder a 0.09472 m/Km (6 pulgada/milla) para ser aceptados. Cabe señalar que anteriormente la exigencia de la norma Tex-1001-S era de 0.18944 m/Km (12 pulgada/milla). Por su parte la norma ASTM E950/E950M no indica requisitos para los valores de IRI.

A manera ilustrativa, la Figura 2 muestra un certificado de calibración emitido por el Texas Transportation Institute (TTI) como resultado de la evaluación del perfilómetro Chasqui realizada en el Campo de Riverside de Texas A&M en College Station, Texas el 12 Setiembre del 2012.

El perfilómetro Chasqui es del tipo HSP (High Speed Profiler) Clase 1, desarrollado con dispositivos y sensores de última generación, con alto grado de confiabilidad y de fabricantes como ACUIITY, NATIONAL INSTRUMENTS, INDUCODER y DYTRAN, entre otros. Las características principales del equipo Chasqui son las siguientes:

1. Cumple con las especificaciones establecidas para la clase 1 en la norma internacional ASTM-950-98 (revisado 2004); Tex-1001-S y recomendaciones del Banco Mundial publicación técnica Nro. 46.
2. Muestreo simultaneo de dos perfiles longitudinales.
3. Velocidades de operación: 25 a 120 Km/h.
4. Información del perfil longitudinal cada 25 cm de muestreo.
5. Cálculo del IRI con medias variables (50 m, 300 m etc.).
6. Información de marcas GPS.
7. Sistema de procesamiento de datos digital.
8. Capacidad de almacenamiento del perfil longitudinal es de 314 Kbytes de información por cada kilómetro recorrido.



Profiler Certification Test Results

Profiler Operator : Franck P. Vasquez Perez
Wheelpath(s) Tested : LR
Profiler Tested : Chasqui
Profiler Serial No. : 01
Profiler VIN : 1FMPU5L24LA31696
Test Date : 09122012

Test Administered By : E. Fernando & G. Harrison
Filter Type : Chasqui filter
Filter Program : filtro CHASQUI.Exe
Version No : June 15, 2012

Overall Test Result: PASS

PROFILER REPEATABILITY AND ACCURACY (Smooth Section)

Repeatability

Left Ave.STDV 13

Right Ave.STDV 24

Equipment Accuracy

Left u1 : 0.01
Left u2 : 15.50

Right u1 : -2.28
Right u2 : 33.54

IRI

Left STDV of IRI: .83 (PASS)

Right STDV of IRI: .70 (PASS)

Average IRI (in/mile)

Wheel Path Abs. Difference

Left 1.53 (PASS)
Right .15 (PASS)

**Figura 2. Certificado de Calibración del Perfilómetro Láser Chasqui
(cortesía de HOB Consultores, S.A.)**

El perfilómetro Chasqui cumplió con las exigencias de certificación con holgura como se observa en los resultados de la prueba.

La configuración y componentes de los perfilómetros inerciales influye en forma significativa en la precisión y exactitud de las mediciones. La configuración del perfilómetro láser Chasqui se observa en la Figura 3.

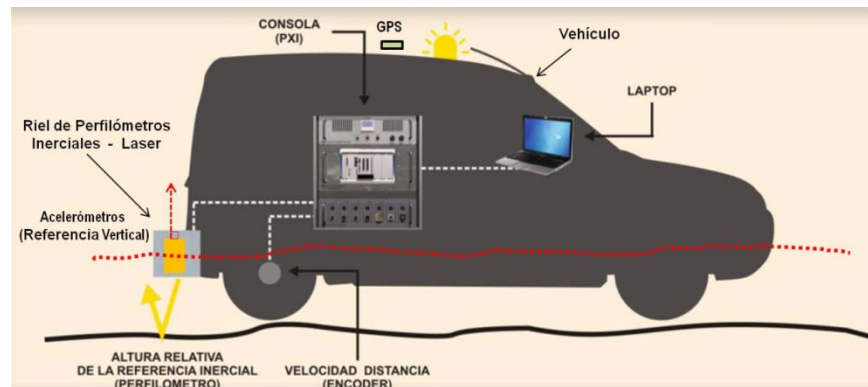


Figura 3. Esquema Simplificado del Perfilómetro "CHASQUI" (cortesía de HOB Consultores, S.A.)

La configuración del perfilómetro Chasqui ha permitido realizar mediciones continuas de perfil y cálculo del Índice Internacional de Rugosidad (IRI), hasta velocidades de 120Km/h. en terrenos muy diversos, desde los desiertos costeros hasta zonas de altura en los Andes (5,000 metros sobre el nivel medio del mar) y en la selva amazónica del Perú. Chasqui ha sido acondicionado y climatizado para operar adecuadamente en condiciones muy singulares, como por ejemplo en zonas ubicadas a distinta altitud (cambios de presión atmosférica y efecto de la gravedad), temperaturas, humedad, estática, tormentas eléctricas, de caminos sinuosos. Este acondicionamiento otorgan al Chasqui capacidades operativas que usualmente no brindan otros equipos de medición, al adaptarse con gran facilidad a las condiciones específicas donde se ubican los sectores a medir, teniendo como resultado un mejor en cuanto precisión y exactitud.

4. VALIDACIÓN DE PERFILOMETROS INERCIALES EN CAMPO

La certificación de los perfilómetros inerciales se realiza en una pista de prueba bajo condiciones controladas. Sin embargo, hay diversos factores que afectan los resultados de las mediciones en el campo. En la literatura se mencionan diversos factores que inciden en los resultados de las

mediciones efectuadas con perfilómetros laser, siendo las más relevantes las relacionadas al diseño del equipo (sensores utilizados), las características propias de los pavimentos, el medio ambiente, y el desempeño del conductor y operador del sistema (7).

La experiencia del Chasqui como resultado de operar en los caminos desérticos de la costa, el ande y la Amazonía del Perú, permiten confirmar algunos y destacar otros: a) la correcta altura de los sensores laser, asegurando que se encuentren en el rango dinámico de operación, b) pavimentos muy dañados con baches pueden generar sesgos y errores de medición afectando los cálculos de IRI, c) zonas lluviosas y de mucha humedad, d) pavimentos contaminados y/o con residuos de agua u otras sustancias, e) el desplazamiento lateral del vehículo generando variaciones transversales de los perfiles medidos en forma continua, afectando seriamente la repetitividad del equipo medidor f) variaciones bruscas de velocidad, g) la precisión del dispositivo medidor de distancia (rango de 0.01% de error), puesto que en mediciones de largas distancias se pueden acumular errores y sesgos, en tal sentido es conveniente controlar los pesos periódicamente, la amortiguación y la presión de las ruedas del vehículo medidor, g) curvas pronunciadas(carreteras sinuosas) causan aceleraciones laterales que pueden hacer perder la referencia vertical del acelerómetro, h) carreteras en alturas extremas en las cuales las mediciones ven afectados por la presión atmosférica y la aceleración de la gravedad, alterándose los efectos físicos que ocurren al nivel del mar. El factor altitud es relevante en las mediciones, sin embargo es poco mencionado en la literatura existente. En los perfilómetros inerciales, los componentes y el diseño mismo del equipo tienen un rol preponderante en la exactitud de las mediciones realizadas aún más en zonas en altura.

Por los factores anteriormente expuestos, es necesario validar los resultados de los perfilómetros inerciales mediante pruebas en campo y test estadísticos. Para ilustrar ese proceso, a continuación se describe el procedimiento de validación seguido por el Centro de Sistemas de Infraestructura de Transportación (CTIS) de la Universidad de Texas en El Paso (UTEP) para el perfilómetro Chasqui.

Para realizar las mediciones se seleccionaron dos secciones de pavimento 300 m. que representan pavimento con rugosidad baja y media rugosidad.

La sección 1 está compuesta por un pavimento de asfalto y está ubicada en la carretera SH 130 en Austin, Texas. Las coordenadas de esta sección son Lat - 30°26'40.28" Norte y Long - 97°35'39.22" Oeste. En la Figura 4 se puede observar esta sección que es representativa de un pavimento con rugosidad baja.



Figura 4. Carretera SH 130 (Carril Sur)

La sección 2 está compuesta por un pavimento de asfalto y está ubicada en la carretera E. Pflugerville Pkwy. Las coordenadas de esta sección son Lat -30°26'20.83" Norte y Long - 97°34'40.68" Oeste en Austin, Tx. La Figura 5 muestra esta sección que es representativa de un pavimento con rugosidad media.



Figura 5. Carretera Pflugerville Pkwy (Carril Este)

Los valores de IRI promedio para cada sección se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. IRI Promedio obtenido con Datos de Chasqui

Sección	Huella	Promedio IRI	
		in/mi	m/km
1	Izquierda	45.04	0.71
	Derecha	53.18	0.84
2	Izquierda	113.14	1.79
	Derecha	163.63	2.58

Para investigar la precisión y exactitud de las mediciones realizadas con el perfilómetro y de los valores de IRI, para cada huella se calcularon parámetros estadísticos para compararlos con las exigencias de la norma Tex-1001-S. Las tablas 5, 6 y 7 muestran los resultados de precisión y exactitud para longitudes de tramo de 161 y 300 m.

Tabla 5. Validación de Precisión de las Mediciones del Perfil

Longitud (m)	Sección	Huella	Precisión		Pare ser Aceptado		Resultado
			mm	Pulg 10 ⁻³	mm	pulg x 10 ⁻³	
161	1	Izquierda	0.34	13.39	< 0.89	<35	Aceptado
		Derecha	0.51	20.08	< 0.89	<35	Aceptado
	2	Izquierda	0.70	27.56	< 0.89	<35	Aceptado
		Derecha	0.74	29.13	< 0.89	<35	Aceptado
300	1	Izquierda	0.32	12.60	< 0.89	<35	Aceptado
		Derecha	0.52	20.47	< 0.89	<35	Aceptado
	2	Izquierda	0.55	21.65	< 0.89	<35	Aceptado
		Derecha	0.64	25.37	< 0.89	<35	Aceptado

Tabla 6. Validación de Precisión para el IRI

Longitud (m)	Sección	Huella	Precisión		Pare ser Aceptado		Resultado
			Pulg/milla	m/Km	pulg/milla	m/Km	
161	1	Izquierda	0.84	0.01	< 3.00	< 0.047	Aceptado
		Derecha	1.00	0.02	< 3.00	< 0.047	Aceptado
	2	Izquierda	1.08	0.02	< 3.00	< 0.047	Aceptado
		Derecha	2.28	0.04	< 3.00	< 0.047	Aceptado
300	1	Izquierda	0.40	0.01	< 3.00	< 0.047	Aceptado
		Derecha	1.04	0.02	< 3.00	< 0.047	Aceptado
	2	Izquierda	0.58	0.01	< 3.00	< 0.047	Aceptado
		Derecha	1.05	0.02	< 3.00	< 0.047	Aceptado

Tabla 7. Validación de Exactitud para el IRI

Longitud (m)	Sección	Huella	Exactitud		Pare ser Aceptado		Resultado
			Pulg/mi	m/km	Pulg/mi	m/km	
161	1	Izquierda	0.51	0.008	< 6.00	< 0.095	Aceptado
		Derecha	0.51	0.008	< 6.00	< 0.095	Aceptado
	2	Izquierda	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
		Derecha	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
300	1	Izquierda	0.51	0.008	<6.00	< 0.095	Aceptado
		Derecha	1.77	0.028	< 6.00	< 0.095	Aceptado
	2	Izquierda	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
		Derecha	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)

(*) No se obtuvo el perfil real en esta sección

5. TESTS ESTADÍSTICOS DE PRECISIÓN Y EXACTITUD

Para verificar estadísticamente la precisión y exactitud de los perfilómetros inerciales se utilizan análisis de correlación, test de hipótesis de contraste Z, test de hipótesis de contraste T, y análisis de varianza con el modelo ANOVA.

Correlación de la Mediciones en Múltiples Corridas

Para las mediciones del perfil y para el IRI se realizaron correlaciones con la finalidad de evaluar la repetitividad de las mediciones en múltiples corridas. Una correlación alta, con valores cercanos a 1 o -1, implica que hay alto nivel de repetitividad, es decir que la diferencia en las mediciones de múltiples corridas no es estadísticamente significativa.

La tabla 8 muestra la correlación entre las mediciones de múltiples corridas registradas en los primeros 161 m. De los resultados se observa que la correlación es alta para las mediciones del perfil vertical y para los valores de IRI obtenidos.

Tabla 8. Análisis de Correlación para las Mediciones del Chasqui

Sección	Huella	Correlación de Mediciones del Perfil	Correlación de IRI
1	Izquierda	0.99	0.72
	Derecha	0.99	0.77
2	Izquierda	0.99	0.98
	Derecha	0.99	0.97

Test de Hipótesis de Contraste Z

Las mediciones del perfil obtenidas en múltiples corridas se sometieron al test de hipótesis de contraste Z para evaluar si los promedios de mediciones en las huellas muestran diferencias estadísticamente significativas. La “hipótesis nula” (H_0) y la “hipótesis alternativa” (H_1) son las siguientes:

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = \Delta_0$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq \Delta_0$$

μ_1, μ_2 = Promedio de las mediciones

Δ_0 = La diferencia es 0 entre los dos promedios

Si el valor p es más mayor que 0.05, entonces la “hipótesis nula” es aceptada, esto implica que la diferencia de los promedios de las mediciones obtenidas en las múltiples corridas no es estadísticamente significativa. La Tabla 9 provee un resumen de los resultados del test de hipótesis Z. En todos los casos, las mediciones obtenidas con Chasqui pasaron el test al confirmarse la hipótesis nula.

Tabla 9. Resultados del Test de Hipótesis de Contraste Z.

Longitud (m)	Sección	Huella	Porcentaje de Intervalos de Medición que pasaron el Test (%)
161	1	Izquierda	100
		Derecha	100
	2	Izquierda	100
		Derecha	100
300	1	Izquierda	100
		Derecha	100
	2	Izquierda	100
		Derecha	100

Test de Hipótesis de Contraste T

Se realizó el test de hipótesis de contraste de T por pares para verificar si existe una diferencia estadísticamente significativa en los promedios de IRI. La hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_1) son las siguientes:

$$H_0 : \mu_D = \Delta 0$$

$$H_1 : \mu_D \neq \Delta 0$$

μ_D = Promedio de medida

$\Delta 0$ = La diferencia es 0 entre los dos promedios

Si el valor p es mayor que 0.05, entonces la hipótesis nula es aceptada, esto implica que la diferencia de los IRI promedios obtenidos en las múltiples corridas no es estadísticamente significativa. Los resultados de las pruebas de T por pares realizado para los valores de IRI se muestran en la tabla 10. Siendo los porcentajes de valores de IRI con $p > 0.05$ mayores al 80%, se concluye que Chasqui satisface los requerimientos de este test.

Tabla 10. Resultados del Test de Hipótesis de Contraste T.

Longitud (m)	Sección	Huella	Porcentaje de Valores de IRI con $p > 0.05$
161	1	Izquierda	100
		Derecha	100
	2	Izquierda	90
		Derecha	80
300	1	Izquierda	100
		Derecha	100
	2	Izquierda	100
		Derecha	90

Análisis de la Varianza (ANOVA)

El análisis de la varianza se realizó mediante un modelo ANOVA con la finalidad de comparar en forma simultánea los promedios de las mediciones de múltiples corridas por huella. Si la hipótesis es aceptada, se concluye que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las mediciones realizadas en las múltiples corridas.

La hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_1) para el modelo ANOVA son las siguientes:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = 0$$

$$H_1 : \mu_i \neq 0 \text{ tan siquiera un } i.$$

$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ and μ_5 = Promedio de la medición

Si el valor p es mayor que 0.05 entonces la hipótesis nula es aceptada, esto implica que la diferencia de las mediciones e IRIS promedios obtenidos en las múltiples corridas no es estadísticamente significativa. Los resultados de ANOVA para las mediciones del perfil vertical y de los valores de IRI se muestran en la Tabla 11. En todos los casos, las mediciones obtenidas con Chasqui pasaron el test al confirmarse la hipótesis nula.

Tabla 11. Resultados del Análisis de la Varianza con el Modelo ANOVA

Datos	Sección	Huella	Hipótesis
Perfil	1	Izquierda	Aceptada
		Derecha	Aceptada
	2	Izquierda	Aceptada
		Derecha	Aceptada
IRI	1	Izquierda	Aceptada
		Derecha	Aceptada
	2	Izquierda	Aceptada
		Derecha	Aceptada

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- a. Es indispensable la certificación de los perfilómetros inerciales puesto que las mediciones de IRI realizadas con estos equipos son usadas en el control de calidad de los pavimentos terminados y en desarrollo de estrategias de gestión de mantenimiento y rehabilitación. Si bien es cierto que los requerimientos de precisión y certificación para la certificación de los perfilómetros inerciales establecidos en la norma Tex-1001-S son muy exigentes, es posible cumplir con las exigencias como lo demuestran los resultados obtenidos con el equipo Chasqui.
- b. Las normas que rigen el control de calidad de los pavimentos terminados deben establecer en forma específica las acciones, penalidades, y bonificaciones a que está sujeto el Contratista cuando no se cumplen con los valores de IRI exigidos en las especificaciones.
- c. Puesto que la certificación de los perfilómetros inerciales se realiza en una pista de prueba bajo condiciones controladas, es necesario validar los resultados de estos equipos en condiciones reales de campo. Para este efecto se utilizan procedimientos estadísticos que incluyen análisis de correlación, test de hipótesis de contraste Z, test de hipótesis de contraste T, y análisis de varianza con un modelo ANOVA.
- d. El nivel de precisión y exactitud de las mediciones realizadas con los perfilómetros inerciales depende de los componentes que lo integran y las condiciones del pavimento donde se realizan las mediciones. Es por este motivo que la precisión y exactitud de los sensores láser tiene una gran influencia en los resultados de las mediciones del perfilómetro, así como la variabilidad en la regularidad del perfil transversal que influye en la repetitividad de las lecturas cuando se realizan múltiples corridas en la misma sección.
- e. Para incrementar la precisión y exactitud de las mediciones se recomienda seguir las siguientes pautas:
 - Efectuar un reconocimiento de la sección a medir
 - Brindar instrucciones precisas al conductor y operador del equipo para el manejo y registro de datos

- Asegurar el buen funcionamiento de los sensores para las condiciones del terreno, velocidad de medición, sinuosidad, medio ambiente y horarios de operación en la zona de trabajo.
- Controlar los pesos, presión de ruedas del vehículo y efectuar verificaciones periódicas del rango de error del dispositivo medidor de distancia,
- Climatizar los diferentes sensores del equipo para asegurar su adecuado funcionamiento, el factor altitud es relevante en las mediciones, los componentes y el diseño mismo del perfilómetro tienen un rol preponderante en la exactitud de las mediciones realizadas.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Dr. Emmanuel Fernando del Texas Transportation Institute (TTI) por aclarar los procedimientos y metodologías utilizadas para la certificación de los perfilómetros inerciales. De igual manera a HOB Consultores por permitir utilizar los resultados obtenidos con el equipo Chasqui.

REFERENCIAS

1. ASTM Standards E950/E950M. Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference, ASTM International, Pennsylvania, U.S.
2. Texas Department of Transportation (TxDOT), Tex -1001-S, (2012). Operating Inertial Profilers and Evaluating Pavement Profiles. Texas, U.S.
3. Sayers, M.W. & Karamihas, S.M. (1998). The Little Book of Profiling. University of Michigan.
4. Sayers, M. W., Gillespie, T.D. & Paterson, W. (1996). Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. World Bank Technical Paper 46. Washington, D.C.
5. Texas Department of Transportation (TxDOT), (2004). Standard Specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets, and Bridges. Texas, U.S.
6. ASTM Standards E 1364. Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method, ASTM International, Pennsylvania, U.S.
7. Perera, R.W. & Kohn, S.D. (2002). Issues in pavement smoothness a summary report. TRB-NCHRP document 42 (Project 20-51).