

El Pequeño Libro de la Perfilometría

**Información Básica sobre Medición e Interpretación
de Perfiles de Elevación en Caminos**

Septiembre de 1998

Michael W. Sayers

Steven M. Karamihas

© Copyright 1998 El Regente de la Universidad de Michigan

Reservados todos los derechos

Traducción por



Esta traducción no ha sido autorizada por el autor. Se hace disponible como una ayuda a quienes operan perfilómetros y utilizan datos de perfilometría. Todo el crédito corresponde a los autores, y el documento original se puede encontrar en

<https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/21605/90151.pdf>

Se ha intentado mantener el formato del documento original. Cuando el original en inglés dice “*profiler*” se ha traducido como “perfilómetro” y no como “perfilador” pues estos equipos miden el perfil, no es que hagan el perfil. Para cualquier sugerencia que pueda mejorar este documento por favor usar el formulario de contacto en el pavmnts.com

Versión de la traducción febrero 2025

Tabla de Contenidos

Introducción.....	1
¿Qué es un perfil?	2
¿Qué es un perfilómetro?	3
¿Qué puedes hacer con los perfiles?	9
¿Qué es un perfilómetro válido?	10
¿Cuándo no es válido un generador de perfiles?	12
¿Qué es el procesamiento de señales?	12
¿Qué es el intervalo de muestra?	13
¿Qué es el filtrado?	16
¿Qué es una media móvil?	18
¿Qué son las sinusoides?	21
¿Qué es la respuesta de frecuencia?	23
¿Qué es una densidad espectral de potencia?	26
¿Cómo se relaciona la aceleración vertical con el perfil?	31
¿Cómo se relaciona calidad de rodado (ride) con la carretera?	34
¿Qué es la rugosidad del camino?	36
¿Qué son los sistemas de tipo respuesta?	38
¿Cuáles son las respuestas de frecuencia de los Dispositivos de Medición de Rugosidad?	40
¿Qué es un índice de perfil?	43
¿Qué es el IRI?	45
¿Qué son las calificaciones de panel (Panel Ratings)?	52
¿Qué es el número de rodado (Ride Number)?	55
¿Qué otros índices de rugosidad se utilizan?	60
¿Cuál es el efecto de la longitud?	66
¿Qué son las pruebas de verificación?	69
¿Qué es la calibración?	71
¿Qué es la correlación?	72
¿Qué son los errores?	77
¿Qué causa el error de creación de perfiles?	80
¿Cuál es el efecto de la velocidad?	84
¿Cuál es el efecto de la textura?	88
¿Qué pasa con las grietas?	91
¿Qué tan preciso debe ser un perfil?	92
Bibliografía	96

Introducción

La perfilometría de alta velocidad en caminos es una tecnología que comenzó en la década de 1960, cuando Elson Spangler y William Kelly desarrollaron el perfilómetro inercial en el Laboratorio General Motors Research. Algunos usuarios todavía llaman a los perfilómetros de alta velocidad por su nombre inicial: perfilómetros GMR.

En la última década, los instrumentos de perfilometría se han convertido en herramientas cotidianas para medir la rugosidad de las carreteras. La mayoría de los Estados poseen actualmente perfilómetros de carreteras. Existe un conjunto sustancial de conocimientos para el campo del diseño y la tecnología de perfilómetros.

También existen muchos métodos probados para analizar e interpretar datos similares a las medidas obtenidas de los perfilómetros. Sin embargo, no ha habido una sola fuente de información sobre lo que se puede hacer con un perfilómetro. Los usuarios cuentan con instrucciones proporcionadas por los fabricantes para operar el equipo, pero poco más con qué continuar.

Los usuarios de perfilómetros de carreteras de diferentes estados se reunieron en 1989 y formaron el Road Profilers User Group (RPUG). Desde entonces, el RPUG se reúne anualmente para proporcionar un foro para abordar cuestiones relacionadas con la medición e interpretación de perfiles de carreteras. De 1992 a 1995, los autores llevaron a cabo un proyecto de investigación en el Instituto de Investigación del Transporte de la Universidad de Michigan (UMTRI) llamado "Interpretación de datos del perfil de rugosidad de las carreteras". La investigación fue financiada por la Administración Federal de Carreteras (FHWA) y fondos estatales (pooled fund). En la reunión del RPUG de 1994, los representantes de los Estados participantes sugirieron que se necesitaba un curso breve para brindar la educación necesaria. Dave Huft, inventor del perfilómetro de Dakota del Sur, propuso un "Pequeño libro dorado de perfiles" en el espíritu de los populares libros infantiles.

El Instituto Nacional de Carreteras (NHI) de FHWA proporcionó fondos para que los autores prepararan un curso breve llamado "Medición e interpretación de perfiles de carreteras".

La primera sesión del curso se celebró en noviembre de 1995 en Ann Arbor, Michigan. El Pequeño Libro fue escrito para el curso. El libro fue revisado y ampliado en septiembre de 1996 para la segunda sesión del curso, prevista para coincidir con la reunión del RPUG de 1996 en Denver. En octubre de 1997 se celebró una tercera sesión en Overland Park, Kansas, junto con la reunión del RPUG de 1997.

En El Pequeño Libro intentamos cubrir tres preguntas básicas:

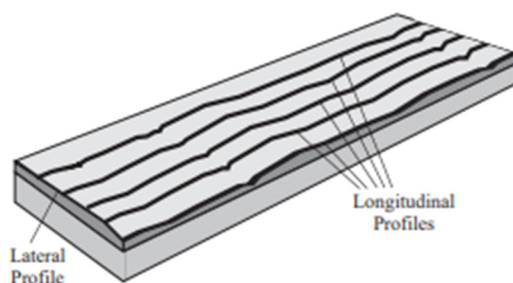
1. ¿Cómo funcionan los perfilómetros?
2. ¿Qué puedes hacer con sus medidas?
3. ¿Qué puedes hacer para reducir los errores?

El material está dirigido a los usuarios. Nuestra intención es hacer que el material no sea más técnico. de lo que se necesita para describir lo que significan las medidas que puede obtener de un perfilómetro.

¿Qué es un perfil?

- **Un perfil es un corte bidimensional de la superficie de la carretera, tomado a lo largo de una línea imaginaria.**

Los perfiles tomados a lo largo de una línea lateral muestran el peralte y la corona del diseño de la carretera, además de surcos y otros deterioros. Los perfiles longitudinales muestran el grado de diseño, la rugosidad y la textura. En este libro, nos centraremos en los perfiles longitudinales.



El perfil de una carretera, pavimento o terreno se puede medir a lo largo de cualquier línea imaginaria continua en la superficie. Si se repite una medición, sólo se puede esperar el mismo perfil si se sigue la misma línea imaginaria. (Para obtener medidas repetibles, es útil hacer que la línea sea menos imaginaria usando pintura o cinta adhesiva para marcarla físicamente).

- **Puedes tomar muchos perfiles para una carretera, cada uno a lo largo de una línea diferente.**

Es posible medir el perfil de una línea curva. Normalmente, la expectativa para una carretera es que la línea esté a una distancia constante de la línea central o de alguna otra referencia que siga la geometría de la

carretera. Con frecuencia, el perfil se mide a lo largo de dos líneas por carril, una en cada huella. Para mayor detalle se puede medir cualquier número de líneas.

- **El ancho de la línea no es estándar.**

El ancho suele estar definido por el tipo de instrumento utilizado. Por ejemplo, las medidas realizadas con un sistema láser pueden cubrir un trozo de carretera de sólo unos pocos

milímetros de espesor, mientras que las medidas realizadas con un sistema ultrasónico pueden cubrir un trozo más grueso de varios centímetros. Aún no se comprende el efecto del ancho del perfil.

Sin embargo, es más difícil repetir exactamente una medida del perfil si la línea del perfil es muy delgada.

- **Para cualquier línea en la carretera, existe un "perfil verdadero".**

El concepto de perfil es fácil de visualizar. Es fácil ver que para una línea dibujada sobre una superficie física, existe un "perfil verdadero". Sin embargo, los requisitos para medir el perfil dependen de lo que queramos hacer con los datos. Por ejemplo, considere dos usos completamente diferentes del perfil. Primero, supongamos que se va a construir un nuevo puente. Es posible que el diseñador desee el perfil de la carretera a ambos lados del sitio del puente. El perfil se describiría adecuadamente con puntos de elevación tomados a intervalos de 3 m, para varios cientos de metros, y las medidas individuales tendrían una resolución de unos pocos milímetros. Ahora, para una segunda aplicación, considere un análisis por computadora para caracterizar la textura según el perfil medido. El análisis requiere puntos de perfil espaciados 1,0 mm (0,04 pulgadas), en una distancia de 1 metro, con una resolución de 0,1 mm (0,004 pulgadas). Ambos conjuntos de números son parte del "perfil verdadero" de una línea en la carretera.

¿Qué es un perfilómetro?

Se utilizan instrumentos y métodos de prueba para producir una secuencia de números relacionados al "perfil real" de una línea imaginaria en la carretera.

- **Un perfilómetro es un instrumento utilizado para producir una serie de números relacionados de forma bien definida hasta un perfil real.**

Pronto veremos que los números obtenidos de algunos perfilómetros no son necesariamente iguales a la elevación real. Un perfilómetro no siempre mide exactamente el perfil real. Mide los componentes del perfil real que se necesitan para un propósito específico. Sin embargo, la relación entre el perfil real y los números producidos por un perfilómetro debe cumplir una especificación que se dará en breve.

- **Un perfilómetro funciona combinando tres ingredientes.**

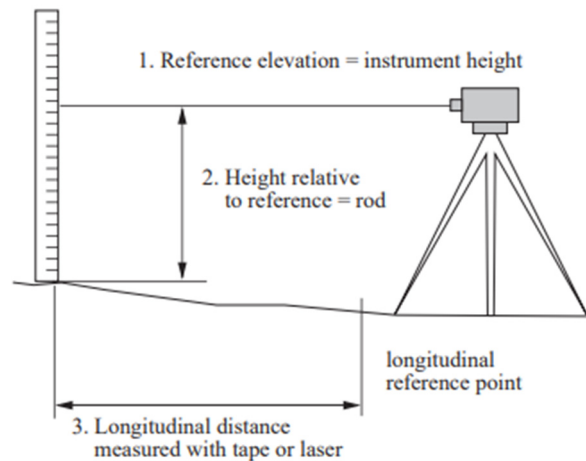
Ellos son:

1. una elevación de referencia,
2. una altura relativa a la referencia, y
3. distancia longitudinal.

Estos tres ingredientes se combinan de diferentes formas, según el diseño del perfilómetro. Veamos brevemente tres tipos de dispositivos.

Mira y nivel

La mira y el nivel son herramientas topográficas familiares. El nivel proporciona la referencia de elevación, las lecturas de la mira proporcionan la altura relativa a la referencia y una cinta métrica ubica las medidas de elevación individuales.



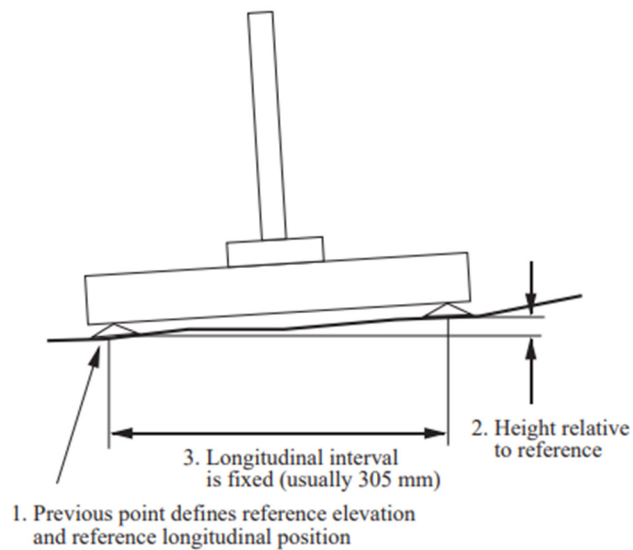
- El método de mira y nivel se llama "estático" porque los instrumentos no se mueven cuando se toman las medidas de elevación.

Aunque la mayoría de los ingenieros conocen los equipos de mira y nivel, los requisitos para obtener una medida de perfil que sea válida para calcular la rugosidad son muy diferentes a los necesarios para trazar una carretera. Debe tomar medidas de elevación a intervalos cortos de un pie o menos. Las medidas de altura individuales deben tener una precisión de 0,5 mm (0,02 pulgadas) o menos. Estos requisitos son mucho más estrictos de lo normal para la topografía. Sin embargo, la altura absoluta del instrumento no es de interés cuando se mide la rugosidad del perfil, aunque normalmente es un tema de gran preocupación cuando se utiliza mira y nivel para otras aplicaciones.

- La norma ASTM E1364 proporciona pautas para medir perfiles con un método estático.

Dipstick

El Dipstick® es un dispositivo desarrollado, patentado y vendido por Face Company. Es más rápido que la mira y el nivel para medir perfiles adecuados para el análisis de rugosidad e incluye una computadora a bordo alimentada por batería para registrar datos automáticamente y realizar la aritmética necesaria para producir un perfil.



El dispositivo se "hace caminar" a lo largo de la línea que se está perfilando. Contiene un inclinómetro de precisión que mide la diferencia de altura entre los dos soportes, normalmente separados por 305 mm. Para perfilar una línea a lo largo del suelo, inclina el dispositivo de modo que todo su peso recaiga sobre el pie delantero, levantando ligeramente el pie trasero del suelo. Luego se gira el dispositivo 180° alrededor del pie delantero, situando el otro pie (que antes estaba detrás) al frente, a lo largo de la línea que se está perfilando. La computadora monitorea el sensor continuamente. Cuando detecta que el instrumento se ha estabilizado, registra automáticamente el cambio de elevación y emite un pitido, indicando que se puede dar el siguiente paso.

En este diseño la cota de referencia es el valor calculado para el punto anterior. La altura relativa a la referencia se deduce del ángulo del dispositivo respecto a la gravedad, junto con la separación entre sus soportes. La distancia longitudinal se determina multiplicando el número de medidas realizadas con el espaciado conocido.

- **Las instrucciones para usar un Dipstick las proporciona el fabricante.**

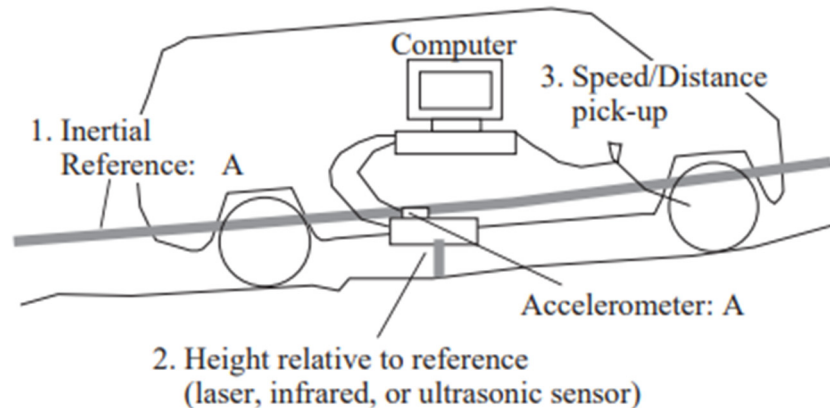
Los perfiles obtenidos con un Dipstick generalmente se corresponden estrechamente con los obtenidos con mira y nivel, si establece el valor de la primera elevación (la referencia inicial) para que coincida con la elevación utilizada en el perfil de mira y nivel.

Perfilómetro inercial (diseño GM)

En la década de 1960, un gran avance en el diseño hizo posible la elaboración de perfiles de alta velocidad para monitorear grandes redes de carreteras. Fue entonces cuando los Laboratorios de Investigación de General Motors desarrollaron el perfilómetro inercial. Las mediciones del perfilómetro inercial combinan los mismos tres ingredientes que sistema con mira y nivel y el Dipstick.

- **La referencia inercial la proporciona un acelerómetro.**

Un acelerómetro es un sensor que mide la aceleración. Los algoritmos de procesamiento de datos convierten la medida de aceleración vertical en una referencia inercial que define la altura instantánea del acelerómetro en el vehículo anfitrión. La altura del suelo con respecto a la referencia es, por tanto, la distancia entre el acelerómetro (en el vehículo) y el suelo directamente debajo del acelerómetro. Esta altura se mide con un sensor sin contacto, como un transductor láser. La distancia longitudinal de los instrumentos se registra normalmente en el velocímetro del vehículo.



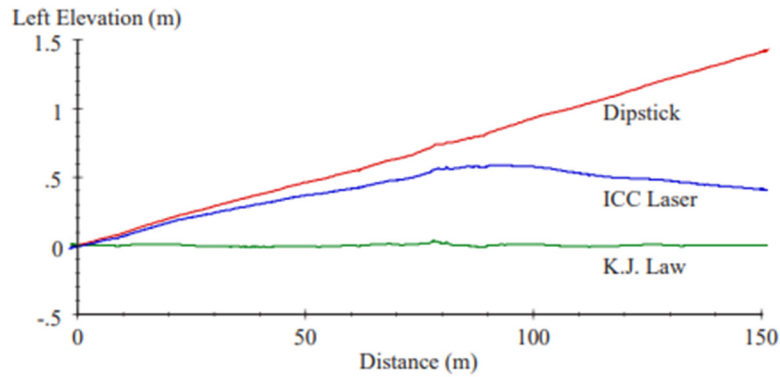
- **Un perfilómetro inercial debe estar en movimiento para funcionar.**

Este tipo de instrumento no sólo funciona a velocidad de autopista, sino que requiere cierta velocidad incluso para funcionar. Por ejemplo, incluso los mejores perfilómetros inerciales no funcionan bien a velocidades inferiores a 15 km/h.

La conexión entre el instrumento y el suelo es más difícil de ver cuando se acelera a 100 km/h que cuando se inspecciona a pie la línea imaginaria que se perfila y se toman lecturas con un dispositivo estático. Ubicar el acelerómetro y el sensor sobre la línea imaginaria adecuada es difícil y requiere un conductor experimentado.

- **El perfil de un perfilómetro inercial no parece uno medido estáticamente.**

La referencia inercial de un perfilómetro se considera útil, pero no es tan fácil de visualizar como la referencia utilizada en la mira estática y el nivel o el Dipstick. La concordancia entre el perfil obtenido con un sistema inercial y uno obtenido estáticamente es bueno en algunos aspectos, pero no en otros. Por ejemplo, la siguiente figura muestra perfiles obtenidos del Dipstick y dos perfilómetros inerciales.



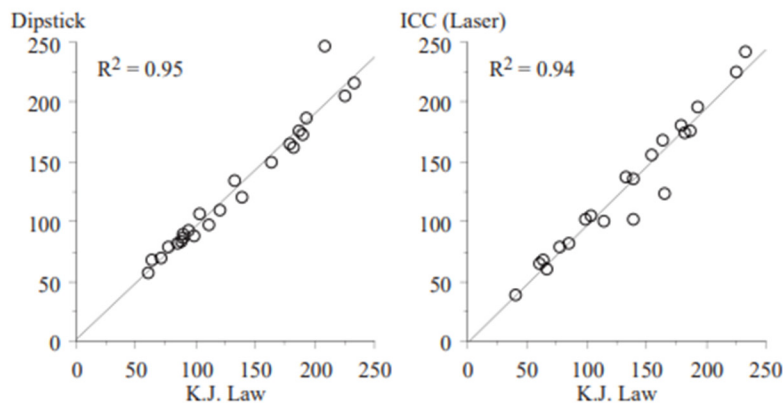
Tres perfiles medidos con diferentes dispositivos.

Los perfiles de los dispositivos inerciales se tomaron a velocidades normales de carretera, por lo que es probable que la línea del perfil no fuera exactamente la misma para las tres medidas. Pero aún así esto no explica las apariencias completamente diferentes entre los perfiles. El Dipstick muestra una pendiente positiva de aproximadamente 1 metro vertical por 100 metros longitudinales. El perfilómetro láser ICC muestra una pendiente de hasta 0,5 metros verticales por 100 metros longitudinales. El instrumento de la Ley KJ muestra un perfil bastante nivelado.

Ninguno de estos dispositivos mide necesariamente con precisión la pendiente y las largas ondulaciones que cubren cientos de metros. Los gráficos de elevación versus distancia de estos tres dispositivos no coinciden, aunque las medidas se basan en el mismo perfil real. Además, se pueden obtener diferentes gráficos para medidas repetidas del mismo perfil verdadero, si las medidas se realizan con perfilómetros inerciales fabricados por diferentes fabricantes. Incluso es posible obtener diferentes gráficos del mismo instrumento, simplemente eligiendo diferentes configuraciones antes de cada prueba.

- **Se pueden obtener estadísticas de perfil precisas a partir de perfilómetros inerciales.**

Debido a que los perfilómetros inerciales no producen el mismo trazado de perfil que un método estático como el Dipstick, al principio puede pensar que no son útiles o que no detectan el perfil real. Sin embargo, incluso si el gráfico del perfil medido por un perfilómetro inercial no se parece al perfil real, puede proporcionar una alta precisión para los números resumidos que se calculan a partir del perfil. Por ejemplo, la siguiente figura muestra gráficos de un índice de rugosidad (IRI) calculado a partir de mediciones realizadas con diferentes instrumentos. Si los dos instrumentos obtuvieran exactamente los mismos resultados, los puntos estarían en la línea de igualdad que se muestra en los gráficos. Aunque los resultados no son perfectos, los gráficos muestran que los diferentes perfilómetros obtienen esencialmente los mismos valores de IRI. (El IRI se describirá más adelante).



Estadísticas de rugosidad obtenidas por diferentes perfilómetros.

Veremos muchos ejemplos de cómo obtienen perfiles tanto estáticos como inerciales. medidas comparables de propiedades del perfil.

- **Las medidas obtenidas a partir de perfiles inerciales pueden ser más fiables que las medidas obtenidas estáticamente.**

Los sistemas inerciales están más automatizados que los métodos estáticos y, al eliminar muchas fuentes potenciales de error humano, pueden ser más precisos en muchas condiciones.

- **Se ha actualizado el diseño original con nuevos sensores y ordenadores.**

Los primeros perfilómetros inerciales detectaban la altura del vehículo en relación con el suelo utilizando una rueda seguidora instrumentada. El diseño funcionó, pero las ruedas seguidoras eran frágiles y requirieron pruebas a velocidades lo suficientemente bajas para evitar rebotes. Todos los perfilómetros que se venden hoy en día utilizan sensores sin contacto en lugar de ruedas seguidoras.

Los primeros sistemas realizaban los cálculos del perfil electrónicamente y requerían que el vehículo funcionara a una velocidad de avance constante. Los perfilómetros inerciales modernos corrigen variaciones menores en la velocidad y realizan los cálculos numéricamente con computadoras a bordo.

- **Las instrucciones para utilizar un perfilómetro inercial las proporciona el fabricante.**

Aunque la mayoría de los perfilómetros inerciales vendidos comercialmente funcionan con principios similares, los detalles específicos de su funcionamiento y mantenimiento de la calibración correcta no son estándar. El software para analizar perfiles y reducirlos a estadísticas resumidas no ha sido estándar en el pasado, pero esto está cambiando. Por ejemplo, el software RoadRuf es un paquete gratuito de análisis de perfiles basado en Windows. RoadRuf está disponible en Internet, junto con el código fuente de Fortran para calcular algunas estadísticas estándar basadas en perfiles.

¿Qué puedes hacer con los perfiles?

- **Hay al menos cuatro categorías amplias de aplicaciones de generación de perfiles.**

1. Monitorear el estado de una red vial para sistemas de gestión de pavimento (PMS),
2. evaluar la calidad de los tramos recién construidos o reparados,
3. diagnosticar la condición de sitios específicos y determinar la adecuada remedios, y
4. estudiar el estado de sitios específicos para la investigación.

Los requisitos técnicos para estas categorías cubren una amplia gama. Una red de carreteras puede requerir la medición de miles de kilómetros al año. En algunos Estados se pueden recorrer más de 10.000 kilómetros al año. En el otro extremo, un programa de investigación podría implicar mediciones frecuentes de sitios que tienen sólo varios cientos de pies de largo, con la intención de identificar formas sutiles de deterioro desde su inicio.

- **Medir un perfil es la mitad del trabajo. La otra mitad consiste en ejecutar el perfil a través de un programa informático para obtener un índice de rugosidad.**

La forma más común de interpretar la información del perfil es reducir los perfiles de la carretera a índices resumidos de rugosidad. Para obtener información de cualquier tipo de un perfil medido existen dos requisitos básicos:

el perfilómetro debe ser capaz de detectar la información relevante presente en el perfil real, y

Debe existir un software informático para procesar los valores medidos y extraer la información deseada (como un índice resumido).

Es posible que el conjunto de números obtenidos para un mismo perfil sea procesado varias veces, utilizando diferentes análisis para extraer diversos tipos de información.

Sin embargo, puede resultar complicado calcular estadísticas que sean útiles.

La tecnología para medir perfiles existe desde los años 60. Todavía estamos tratando de descubrir qué hacer con los datos. Gran parte del siguiente material en el Pequeño Libro cubrirá los análisis que se pueden aplicar a las mediciones de perfiles en bruto.

- **Una medición de perfil debe ser relevante.**

El análisis aplicado a los datos del perfil debe estar dirigido a una aplicación. El hecho de que un número pueda obtenerse de forma repetida y precisa no lo hace útil.

Una medida relevante es aquella que la investigación ha vinculado con propiedades de la carretera que los ingenieros consideran importantes.

Por ejemplo, dos análisis que se describirán más adelante son el índice de rugosidad internacional (IRI) y el Ride Number (RN). Ambos están relacionados con la rugosidad. IRI ha demostrado una fuerte compatibilidad con los equipos utilizados para desarrollar sistemas de gestión de pavimentos. El Ride Number está vinculado por correlación estadística con la opinión pública sobre la capacidad de conducción.

¿Qué es un perfilómetro válido?

La palabra "perfil" aparece desde hace varias décadas en las descripciones de los equipos de medición de carreteras. Para algunos usuarios, cualquier dispositivo que produzca una línea ondulante podría denominarse perfilómetro. Sin embargo, en este libro adoptamos una visión más restrictiva de que un perfilómetro debe producir una línea ondulada que tenga una relación establecida con el perfil real.

El verdadero perfil incluye una gran cantidad de información. Indica si el camino va subir o bajar una colina. Da información de rugosidad. Tiene información de textura.

- **Un perfil verdadero contiene más información de la que podemos utilizar. Generalmente, cuanta más información capturamos, más cuesta.**

No es económico ni útil medir el perfil real con suficiente detalle para extraer información de textura y también ver características del paisaje a gran escala, como colinas y valles. La cantidad de almacenamiento de datos necesaria para capturar una milla de perfil con detalles hasta el nivel de textura llenará rápidamente las capacidades de almacenamiento de la computadora y hará que la gestión de la base de datos sea una pesadilla. En cambio, medimos sólo una parte de la información en un perfil real.

- **Un perfilómetro es válido si proporciona los mismos valores estadísticos que se obtendrían del perfil real.**

Aunque los perfilómetros válidos no miden toda la información necesaria para un perfil verdadero, sí miden la información que es de interés. Por supuesto, ningún instrumento es perfecto y el error existe. Los niveles de error se compensan con el costo de los instrumentos y el esfuerzo necesario para utilizarlos.

Un perfilómetro se considera válido para obtener una propiedad de perfil si las estadísticas obtenidas a partir de sus medidas no son ni altas ni bajas, en promedio, en comparación con las estadísticas que se calcularían a partir del perfil real.

- **Las estadísticas de dos o más perfilómetros válidos son directamente comparables, sin necesidad de conversión.**

Dado que una línea en la carretera tiene sólo un perfil verdadero en un momento dado, todos los perfilómetros válidos son, por definición, capaces de producir las mismas estadísticas de perfil. Por ejemplo, se puede obtener la misma medida IRI con mira y nivel, Dipstick o muchos de los perfilómetros inerciales disponibles actualmente.

La creación de perfiles es la única tecnología que ha demostrado permitir a los ingenieros medir directamente las mismas estadísticas de rugosidad de la carretera utilizando equipos con diferentes diseños patentados y fabricados por fabricantes competidores.

Debido a que las estadísticas calculadas a partir de las medidas de un perfilómetro válido no están sesgadas en relación con el perfil verdadero, no tenemos que convertir datos estadísticos de un perfilómetro válido para compararlos con los datos obtenidos de un perfilómetro válido diferente.

- **Las estadísticas de perfilómetros válidos son estables en el tiempo.**

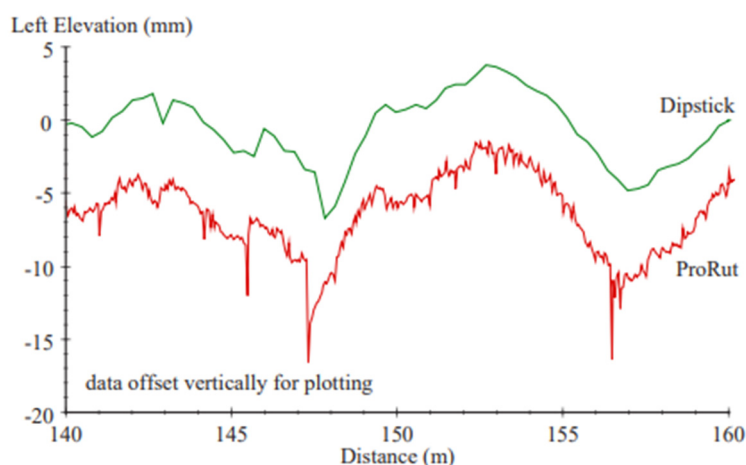
El concepto de perfil verdadero es simple y depende únicamente de la geometría.

La definición será la misma dentro de 100 años como es hoy. Por tanto, las estadísticas que se definen sobre la base del perfil real son eternas.

Es absolutamente esencial que los datos de red tomados este año sean directamente comparables con los datos del año pasado y con los del próximo. La necesidad de obtener datos sobre la condición de rugosidad que sean consistentes de año en año puede ser el factor que más contribuye a la popularidad de los perfilómetros.

- **No hay ningún dispositivo que sea la mejor referencia para todos los usos.**

La validez de un perfilómetro depende de su uso previsto. Cada perfilómetro tiene una gama limitada de aplicaciones para las que es válido. Por ejemplo, el Dipstick es válida para determinar el IRI (una estadística de rugosidad que se explicará más adelante), y también para determinar la pendiente de una carretera. Sin embargo, no puede detectar grietas ni "ver" características del perfil que son pequeñas en relación con la distancia entre sus dos pies de soporte. La siguiente figura muestra un pequeño segmento de un perfil medido con Dipstick y con un sistema inercial desarrollado por FHWA llamado ProRut. El ProRut mide el perfil en un intervalo de muestra muy corto de 50 mm (2 pulgadas). Ambos adoptan la forma básica del perfil, pero sólo el ProRut detecta las dos grietas profundas de 147 m y 156,5 m.



¿Cuándo no es válido un generador de perfiles?

¿Qué pasa si las estadísticas calculadas a partir de un dispositivo de elaboración de perfiles están sistemáticamente sesgadas en relación con una referencia aceptada? Digamos que tienden a ser un 20% altos en algunas pruebas. Podría verse tentado a definir una "constante de calibración" y reducir todos los valores de ese instrumento en un 20 %. ¡No lo hagas!

- **Un perfilómetro no es válido si sus medidas están sistemáticamente sesgadas.**

Si los resultados están sistemáticamente sesgados, entonces el dispositivo no es un perfilómetro válido para esa estadística. No debe utilizarse **para obtener esa estadística**. Simple.

Aunque los resultados pueden diferir en un 20% en las primeras pruebas, no hay forma de estimar los errores en otros tipos de carreteras. A menos que se conozca el origen del error, ni siquiera se sabe si el error es constante a lo largo del tiempo.

Un generador de perfiles que no sea válido para una estadística podría seguir siendo válido para otra. Por ejemplo, muchos perfilómetros con sensores ultrasónicos son válidos para medir la estadística IRI pero no la estadística del Número de recorrido (tanto el IRI como el RN se describirán más adelante).

- **Un perfilómetro no es válido si el error aleatorio de un individuo La medida es demasiado alta.**

¿Qué significa exactamente decir que el error es "demasiado alto"? Eso depende de la aplicación. Para monitorear una red grande, son tolerables grandes errores si son aleatorios. Para evaluar pavimentos específicos, los mismos errores aleatorios podrían ser inaceptables.

Cerca del final de este libro, volvemos al tema de la validez. describiremos perfilar las fuentes de error y discutir su importancia.

¿Qué es el procesamiento de señales?

Los ingenieros civiles utilizan la información de elaboración de perfiles para evaluar el estado de los pavimentos y los administradores y planificadores para gestionar las redes de carreteras. Sin embargo, la tecnología involucrada en la elaboración de perfiles no evolucionó a partir de los métodos de prueba de pavimentos de ingeniería civil. El perfilómetro inercial fue inventado y desarrollado por ingenieros mecánicos y eléctricos. Muchos de los métodos utilizados para procesar y analizar las medidas del perfilómetro ya habían sido bien establecidos por los ingenieros eléctricos y mecánicos y, por lo tanto, se utilizan muchos términos y técnicas que no son una parte estándar del repertorio de un ingeniero civil.

Para comprender cómo se pueden utilizar los perfiles, los usuarios del generador de perfiles deben comprender términos como **señal, procesamiento de señal, filtro y respuesta de frecuencia**.

Los resultados de los primeros perfilómetros inerciales eran voltajes que fluctuaban en una relación bien definida con las variaciones en el perfil real. En el mundo de la ingeniería eléctrica e instrumentación, un voltaje fluctuante que contiene información se llama señal.

Los perfilómetros inerciales modernos producen secuencias de números que contienen el mismo tipo de información. En los sistemas modernos, una secuencia de números se llama señal.

- **Una señal es una serie de números.**

Las salidas de los transductores en el perfilómetro se convierten en números y se procesan por computadora. Existen varias series de números en un perfilómetro inercial. Para empezar, están los valores de las variables del transductor y el perfil calculado. Cada una de estas secuencias se llama señal.

- **El procesamiento de señales es el análisis matemático y la transformación de señales.**

Las señales se procesan principalmente por dos motivos:

1. mejorar la calidad de una medición eliminando el "ruido" no deseado a partir de los datos y extraer información de interés de la señal.
2. El análisis del perfil de una carretera entra en la categoría de procesamiento de señales. También, El cálculo del perfil a partir de las señales del transductor es una forma de procesamiento de señales.

¿Qué es el intervalo de muestra?

El verdadero perfil es continuo. Es una porción del pavimento o superficie del suelo.

Los instrumentos que producen medidas continuas se denominan analógicos porque la medida es **análoga** a la variable de interés. Por ejemplo, un gráfico de tira hecho con un bolígrafo es una representación analógica. Alternativamente, una variable continua suele representarse con una secuencia de números. Esta representación se llama **digital**.

- **Casi todos los sistemas de elaboración de perfiles que se utilizan hoy en día son digitales.**

Las medidas tomadas con métodos estáticos como el Dipstick o la mira y el nivel producen una medida de elevación con cada configuración estática. Estas secuencias de números son inherentemente digitales: no existen versiones analógicas de una mira y nivel o Dipstick.

Los perfilómetros inerciales tienen computadoras conectadas a los transductores. En algún intervalo de tiempo o distancia, la computadora "muestra" las lecturas de los acelerómetros y sensores de altura individuales. Las lecturas se representan como números y se introducen en el algoritmo de cálculo del perfil de la computadora para obtener la elevación del lugar donde se tomaron las lecturas.

Los primeros perfilómetros inerciales eran analógicos. Utilizaron procesadores electrónicos y cinta magnética para almacenar el perfil como un voltaje que varía continuamente. Han sido reemplazados por versiones basadas en computadora porque las computadoras digitales ofrecen más opciones de análisis, son mucho menos costosas y requieren menos mantenimiento.

- **El intervalo de muestra es la distancia longitudinal entre los valores de elevación.**

Para el Dipstick, el intervalo de muestra es la distancia entre sus dos pies de apoyo. Para una y un nivel, el intervalo es la distancia entre las posiciones donde se coloca la mira en el suelo. Para perfilómetros inerciales de alta velocidad, el intervalo es la distancia recorrida por el vehículo entre los momentos en que la computadora "muestra" las lecturas digitales de los transductores.

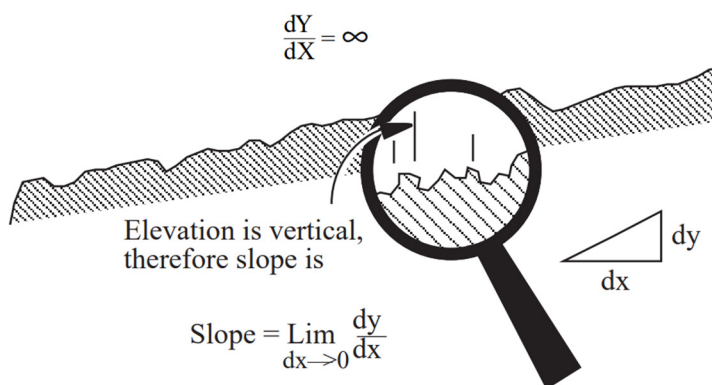
- **El intervalo de muestreo determina el número de elevaciones almacenadas por kilómetro.**

Si el intervalo de muestreo ΔX tiene unidades de metros, entonces hay $\frac{1000}{\Delta X}$ muestras por km. Un intervalo de muestra pequeño significa que se necesita más almacenamiento para registrar un perfil. También significa que el análisis del perfil llevará más tiempo, porque hay más números que procesar. Desde el punto de vista de la eficiencia, no queremos utilizar un intervalo de muestra que sea demasiado pequeño porque tendremos que procesar más números de los necesarios y asignar más almacenamiento en la computadora para guardarlos.

- **El intervalo de muestra limita la información contenida en un perfil.**

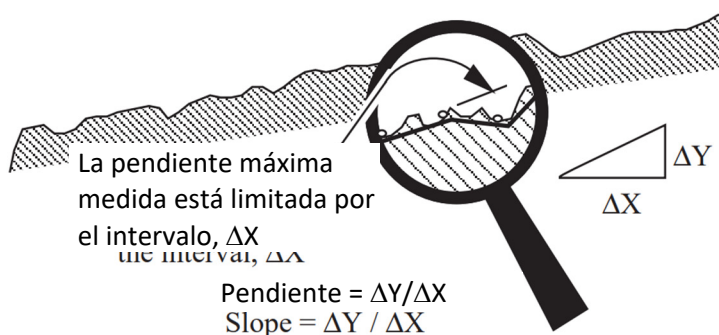
Después de realizar una medición, todo lo que sabemos sobre el perfil de la carretera son los números que componen nuestra medición. No tenemos información sobre qué está haciendo el perfil real entre muestras de la elevación. Idealmente, el intervalo de muestra es lo suficientemente pequeño como para capturar las características del perfil de interés.

Más adelante veremos que muchas estadísticas utilizadas en el pasado para representar la rugosidad de la carretera tienen unidades de pendiente, como metros/kilómetro o pulgadas/milla. Con un perfilómetro, se podría suponer que una buena medida sería la "pendiente real". Sin embargo, existe un problema teórico: ¡la verdadera pendiente de un pavimento real es infinita! Esto se debe a que si te fijas bien, a nivel de textura, encontrarás lugares donde el perfil es vertical:



Ahora considere cómo se representa el perfil con un conjunto de elevaciones muestreadas. En lugar de una elevación continua Y en función de la distancia X , tenemos valores Y_i donde i es el número de elevación en un conjunto de datos. La pendiente entre dos puntos cualesquiera se calcula como

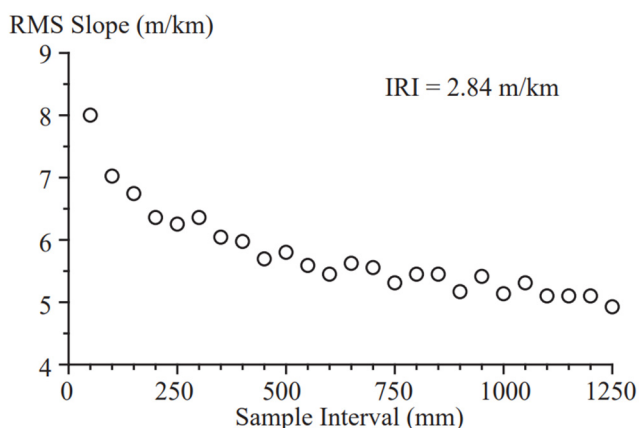
$$\frac{dY}{dX} = \frac{Y_{i+1} - Y_i}{\Delta X}$$



Resulta que el valor cuadrático medio (RMS) de la pendiente aumenta cuanto más pequeño hacemos X .

Si los usuarios del perfilómetro intentaran informar la "pendiente RMS verdadera" como índice de rugosidad, no tendría sentido a menos que el intervalo de muestra estuviera estandarizado. Si un usuario informa que una carretera tiene una pendiente RMS de 3 m/km (190 in/mi) y otro informa que una carretera diferente tiene una pendiente RMS de 4 m/km (253 in/mi), no podemos decir qué carretera es más irregular a menos que conozcamos al menos el intervalo muestra! La lectura más alta podría deberse más al uso de un intervalo de muestra corto que a la rugosidad del perfil real.

La siguiente figura demuestra el efecto. Muestra la pendiente RMS para una única medición de perfil realizada en un intervalo de muestra (X) de aproximadamente 50 mm (2 pulgadas) y la pendiente RMS para la misma medición en varios intervalos de muestra simulados. Los intervalos de muestra más grandes se obtuvieron descartando puntos de la medición original. La figura muestra que en el rango de intervalos de muestra típicos para perfilómetros, la pendiente RMS cambia muy rápidamente. Como se esperaba, la pendiente RMS disminuye al aumentar el intervalo de muestra.



¿Qué es el filtrado?

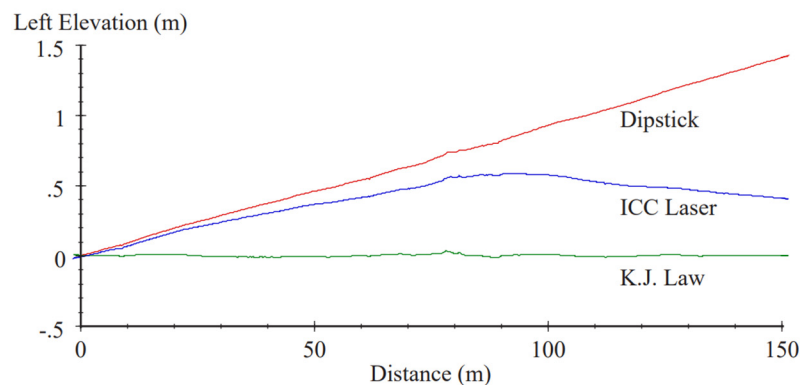
Todos estamos familiarizados con el uso de un filtro para limpiar la basura de líquidos como agua y aceite. El filtro de su grifo atrapa partículas en el agua, permitiendo que el agua pase. En electrónica, se denominan filtros a los componentes o circuitos que modifican un voltaje de forma continua. Una aplicación común es "filtrar" fluctuaciones de voltaje no deseadas de una fuente de alimentación, proporcionando una fuente de energía "limpia". Las señales electrónicas se filtran para eliminar "ruido" no deseado y extraer información de interés.

El concepto de filtro electrónico se ha extendido a las matemáticas en general, particularmente cuando una computadora procesa una serie de números.

- **Un filtro digital es un procedimiento de cálculo que transforma una serie de números (una señal) en una nueva serie de números.**

Para poder hacer un uso práctico de la medición de un perfil, es casi obligatorio filtrar la secuencia de números que componen el perfil. Como usuario del generador de perfiles, no es necesario que comprenda los detalles de la transformación, porque los cálculos los realiza automáticamente una computadora. Sin embargo, es necesario comprender la importancia del filtrado y pensar en el filtrado como parte de la medición e interpretación del perfil.

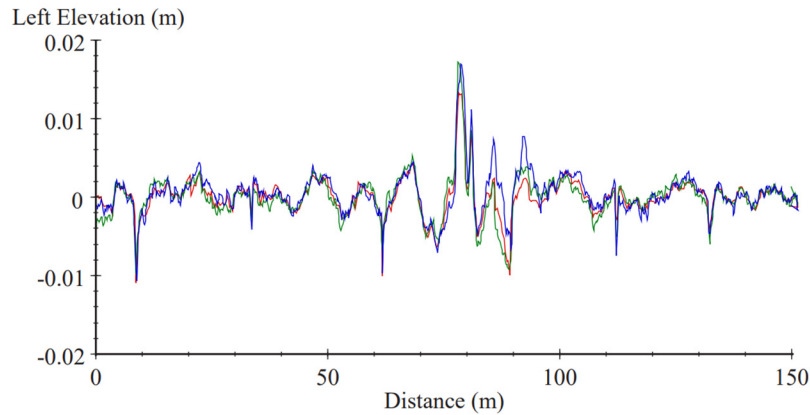
Por ejemplo, considere las tres medidas de perfil que se muestran en la siguiente figura. Detalles de la rugosidad del perfil son casi invisibles en los trazados de los perfiles sin filtrar.



Tres medidas de perfil "brutas"

- **Es necesario filtrar los datos del perfil para ver diferentes tipos de características del perfil.**

La siguiente figura muestra los mismos tres perfiles después de haberlos filtrado para eliminar la pendiente de la carretera y las ondulaciones muy largas.



Los mismos perfiles después del filtrado.

Observe el resalto a 80 m. Apenas es visible en la primera figura, porque la escala está configurada para cubrir varios pies de cambio de elevación. Cuando la pendiente y las ondulaciones largas se eliminan matemáticamente mediante filtrado, la protuberancia es mucho más fácil de ver. Con una magnitud de 20 mm, se trata en realidad de una perturbación grave en la carretera que llamará la atención de cualquiera que pase por ella.

El filtrado es particularmente importante cuando se visualizan datos de perfilómetros inerciales de alta velocidad. Esto se debe a que las características más visibles de la medición sin filtrar (la pendiente subyacente y la curvatura general) son las partes menos precisas de los datos.

- **Filtrar perfiles es una parte fundamental del proceso de medición.**

Debe tener en cuenta que cada perfilómetro inercial tiene al menos un filtro integrado. El filtrado se utiliza para convertir los datos procedentes del acelerómetro y el sensor de altura en las mismas unidades. Se agrega filtrado adicional para evitar que el "ruido" electrónico cause una gran desviación en el perfil calculado.

Algunos análisis comunes implican múltiples filtros: la salida de un filtro se convierte en la entrada del siguiente. Conceptualmente, esto es como juntar varios filtros (circuitos) eléctricos o poner varios filtros de agua (mallas de alambre) en el grifo.

- **No existe un único filtro que se utilice para todas las aplicaciones de perfil.**

Un filtro es sólo el nombre de una transformación matemática que modifica una secuencia de números. Existe un número ilimitado de filtros que se pueden imaginar y programar. Existen varios filtros estándar y algunos de ellos se aplican habitualmente a los perfiles de carreteras. Se describirán en las páginas siguientes.

¿Qué es una media móvil?

Una media móvil es un filtro simple que se usa comúnmente en el análisis de perfiles, particularmente en la creación de vistas gráficas de perfiles. Por ejemplo, los gráficos mostrados en la sección anterior se procesaron con un filtro de media móvil.

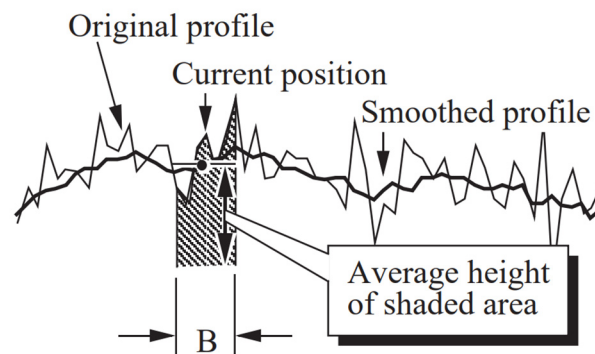
- **Un filtro de media móvil reemplaza cada punto del perfil con el promedio de varios puntos adyacentes.**

Para un perfil p que ha sido muestreado en el intervalo ΔX , un filtro de suavizado de media móvil se define mediante la suma:

$$p_{fL}(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=i-\frac{B}{2\Delta X}}^{i+\frac{B}{2\Delta X}} p(j)$$

donde p_{fL} es el perfil suavizado (también llamado "perfil filtrado de paso bajo", por razones que se explicarán más adelante). B es la longitud base del promedio móvil y N es el número de muestras incluidas en la suma.

El efecto de un filtro de media móvil se demuestra en la siguiente figura. El efecto es suavizar el perfil promediando las fluctuaciones punto por punto.



El filtro de media móvil.

- **También se puede utilizar una media móvil para eliminar el perfil suavizado.**

En la mayoría de los casos, no nos interesa mirar un perfil muy suavizado. Eso simplemente indica si el camino sube, baja o se mantiene nivelado. Con un perfilómetro inercial, la información de pendiente de larga duración ni siquiera es precisa. Más bien, nos interesan las desviaciones del perfil suavizado. Después de todo, son las desviaciones las que degradan la conducción del vehículo y molestan al público que viaja.

Una modificación simple del filtro de media móvil es restar el perfil suavizado del original:

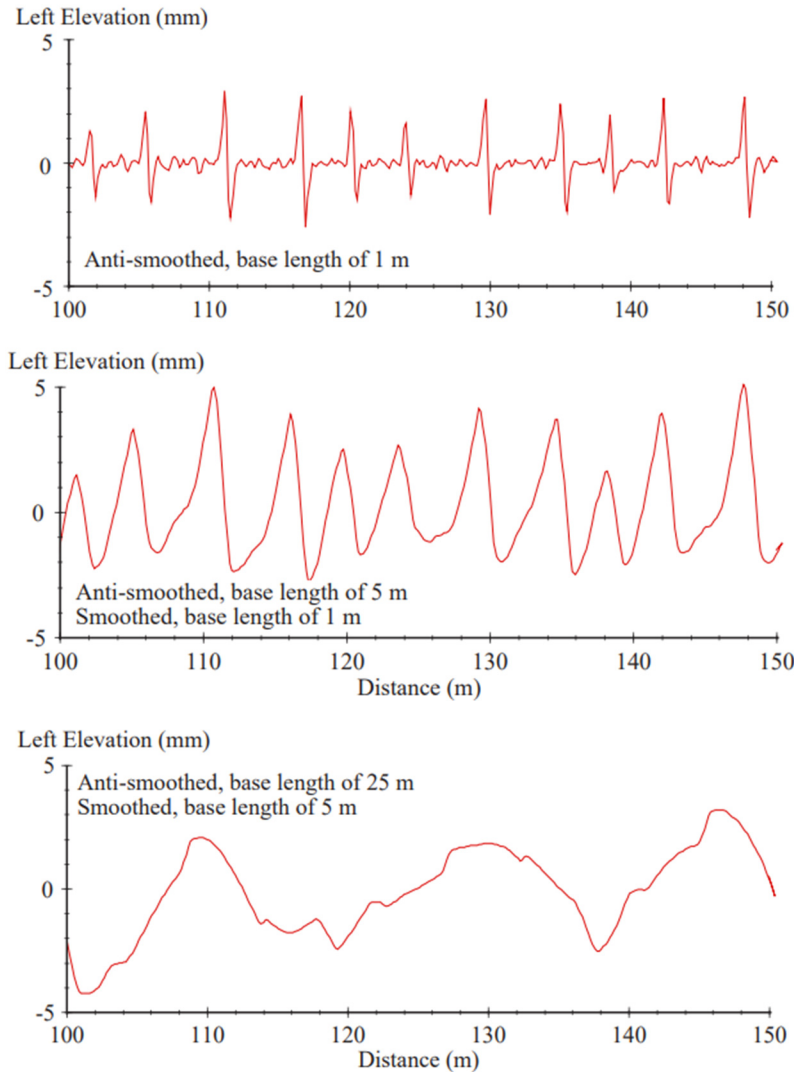
$$p_{fH}(i) = p(i) - \frac{1}{N} \sum_{j=i-\frac{B}{2\Delta X}}^{i+\frac{B}{2\Delta X}} p(j)$$

En este caso, el perfil filtrado tiene el subíndice H de "filtro de paso alto" (high-pass filter), por motivos que se explicarán más adelante.

Tanto la forma suavizante (paso bajo o "low-pass") como la opuesta (paso alto, anti-suavización) del filtro son útiles. Se pueden utilizar ambas versiones sobre el mismo perfil, aunque sólo tiene sentido si la longitud de base B es mayor para la versión antialisante que la longitud de base para la versión alisadora.

- **No existe una única longitud base óptima para la interpretación del perfil; la mejor configuración depende del uso que se vaya a hacer de los datos.**

Por ejemplo, los siguientes tres gráficos muestran el perfil de una sección de pavimento PCC con falla filtrada de tres maneras diferentes, cada una mostrando un tipo diferente de información.



El primer gráfico se filtró con la versión anti-suavizado de una media móvil de 1 m. (El perfil suavizado se resta del original). Este gráfico muestra sólo los resaltos de muy corta duración en el perfil. Las fallas, espaciadas unos 4,5 metros, son muy obvios.

El segundo gráfico muestra el perfil después del procesamiento con un filtro de suavizado de 1 m. y filtro anti-suavizante de 5 m. Todas las desviaciones mostradas en el primer gráfico son completamente eliminadas en el segundo. Aunque se ha eliminado la brusquedad de las fallas y la aspereza superficial, la inclinación de las losas es claramente visible.

El tercer gráfico muestra el perfil después del procesamiento con un filtro suavizante de 5 m y un filtro antisuavizante de 25 m. En este caso, todas las desviaciones mostradas en los dos primeros gráficos se eliminan mediante el suavizado de 5 m. La pendiente y las ondulaciones muy largas se eliminan con el filtro antialisado de 25 m. Estos desvíos restantes ilustran tendencias de mayor duración en la carretera, sin fallas ni formas de losas.

- **Un filtro de media móvil es computacionalmente eficiente.**

El filtro de media móvil es una forma intuitiva de suavizar un perfil que es fácil de entender y programar. También es eficiente computacionalmente, porque después de calcular el primer punto promedio, se pueden obtener valores posteriores con la relación:

$$p_{fL}(i) = p_{fL}(i-1) + \frac{1}{N} \left[p\left(i + \frac{B}{2\Delta X}\right) - p\left(i - \frac{B}{2\Delta X} - 1\right) \right]$$

Incluso si el promedio cubre cientos de puntos, sólo es necesario tener en cuenta el efecto de dos valores de perfil: uno que entra en el intervalo de obtención del promedio y el otro que sale del intervalo.

- **Hay software informático gratuito disponible para realizar trazados de perfil con media móvil.**

Las versiones suavizante y antisuavizante de la media móvil están integradas en un paquete gratuito de Windows llamado RoadRuf que está disponible en Internet. El software RoadRuf se puede encontrar en:

<http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/rr.html>

¿Qué son las sinusoides?

Las ondas seno y coseno se llaman sinusoides.

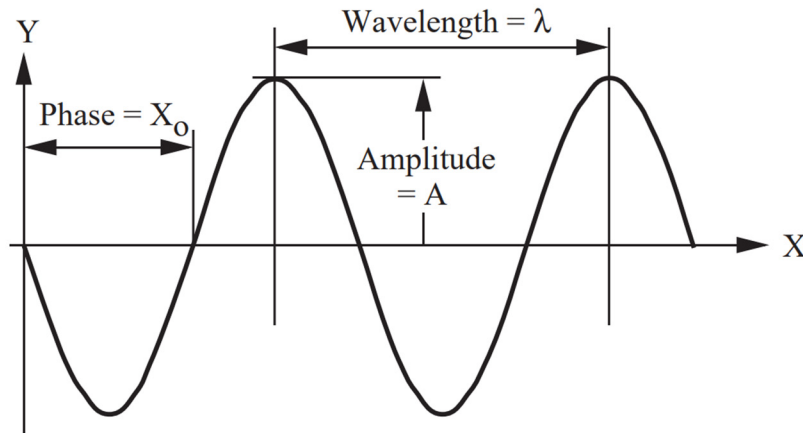
Para comprender los análisis de perfiles, es fundamental estar familiarizado con las sinusoides.

A lo largo del resto de este libro, consideraremos longitudes de onda y frecuencias cuando analicemos temas como cómo funcionan los filtros, cómo se relaciona la marcha del vehículo con la rugosidad, cómo se definen diversas medidas de rugosidad y cómo se causan los errores de medición.

- **Una senoide se define por una longitud de onda, amplitud y fase.**

La ecuación de la senoide (Y) en función de X es:

$$Y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(X - X_0)\right)$$

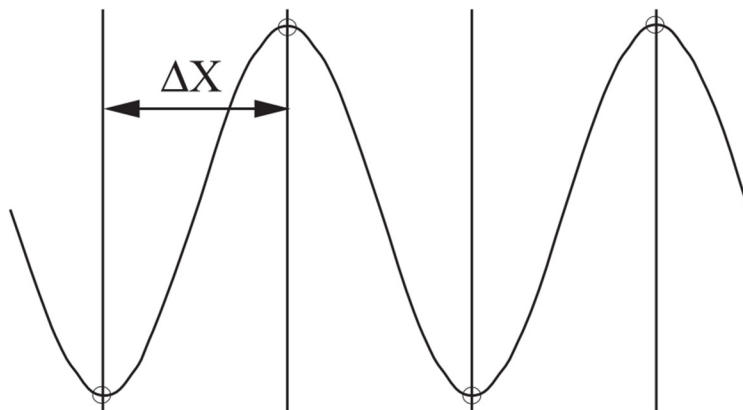


- **El número de onda es el número de ciclos por unidad de longitud.**

Una alternativa para definir la duración de un ciclo es definir cuántos ciclos ocurren en una unidad de longitud. En muchas aplicaciones de procesamiento de señales, las sinusoides se definen como funciones del tiempo, en lugar de la distancia, y la convención es definir la senoide con la frecuencia de ciclos por segundo, llamada Hertz (Hz). Cuando las sinusoides se definen como funciones de longitud, la frecuencia de los ciclos por longitud se denomina número de onda y se escribe como ν ($\nu = 1/\lambda$). El número de onda generalmente tiene unidades de ciclo/m o ciclo/pie.

- **Se necesitan al menos dos muestras por ciclo para "ver" una senoide.**

Para "ver" una senoide en una señal digital (por ejemplo, un perfil de carretera muestreado), es necesario configurar el intervalo de muestra para que no sea mayor que la mitad de la longitud de onda de la senoide, como se muestra a continuación. Esto se llama "teorema de muestreo de Nyquist". Por ejemplo, si pensamos que la información en el perfil real es de interés para longitudes de onda de dos pies o más, entonces el intervalo de muestra debe ser de un pie o menos.



¿Qué es la respuesta de frecuencia?

Es casi esencial que los usuarios de perfiles estén familiarizados con el concepto de respuesta de frecuencia, porque los análisis de perfiles casi siempre se describen con un gráfico de respuesta de frecuencia.

Los filtros, instrumentos, vehículos y otros sistemas pueden considerarse como "cajas negras" conceptuales con una entrada y una salida. La respuesta de frecuencia es una forma muy útil de describir el comportamiento de entrada/salida de cualquiera de estos sistemas.

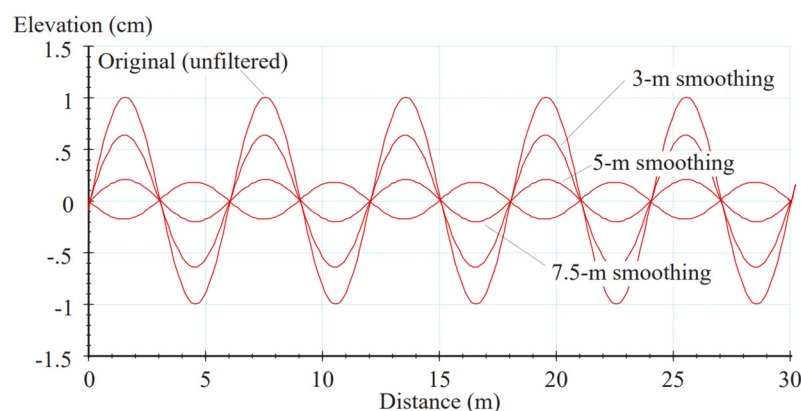
- **Un sistema lineal es aquel en el que la salida es proporcional a la entrada.**

Si tiene la respuesta de un dispositivo lineal a un bache en la carretera, entonces si el resalto se amplía en algún factor, la salida del dispositivo tiene exactamente la misma forma, pero también se amplía en la misma cantidad. Para un análisis de perfil, la prueba se aplica a conjuntos de números que son entradas y salidas del análisis. Si los números de entrada se cambian por un factor de escala, los números de salida se cambian por el mismo factor de escala si el análisis es lineal.

Todos los filtros descritos en este pequeño libro son lineales. (Algunos de los métodos utilizados para acumular los resultados después de filtrarlos implican funciones matemáticas no lineales, como elevar al cuadrado o tomar valores absolutos. Sin embargo, el proceso de filtrado, que se realiza primero, es lineal).

- **Una entrada sinusoidal a un sistema lineal provoca una salida sinusoidal con la misma longitud de onda.**

En general, la amplitud y la fase son diferentes para la entrada y la salida. Sin embargo, la longitud de onda es la misma para un sistema lineal. Por ejemplo, considere el filtro de media móvil. La siguiente figura muestra una senoide con una longitud de onda de 6 m/ciclo afectada por tres filtros de suavizado de promedio móvil con varias longitudes de base.

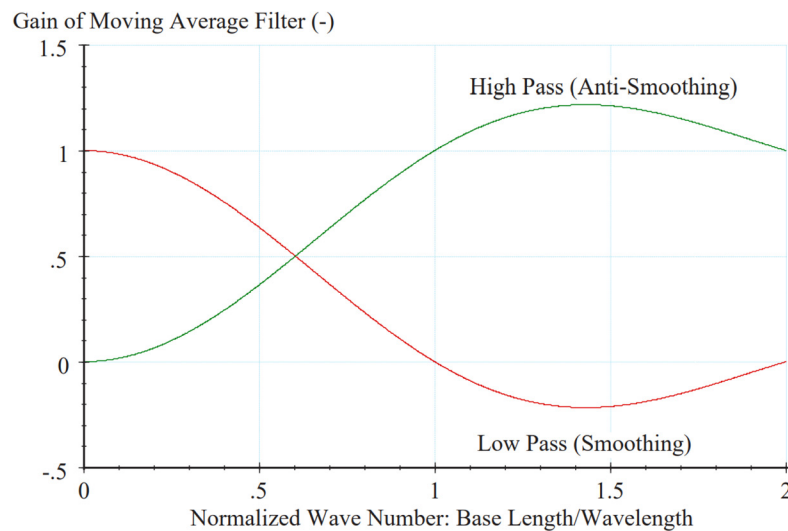


Observe que las tres salidas filtradas también son sinusoidales.

- **Un gráfico de respuesta de frecuencia muestra la relación entre salida y entrada para una senoide.**

Sabiendo que la salida de un sistema lineal es una senoide con la misma longitud de onda, la salida puede definirse completamente por la amplitud y la fase. Un gráfico de respuesta de frecuencia de amplitud muestra la relación entre la amplitud de salida y la amplitud de entrada. La relación de amplitud se llama ganancia. Un gráfico de respuesta de frecuencia de fase muestra la fase de la senoide de salida en relación con la entrada. Sin embargo, en este libro limitaremos nuestra atención a las tramas de ganancia.

La siguiente figura muestra un gráfico de la ganancia de un filtro de media móvil en función del número de onda. Compare los resultados de la figura anterior con las ganancias que se muestran en la siguiente figura (consulte la línea denominada "Paso bajo"). Para una longitud de base de 3 m, la relación entre longitud de base y longitud de onda es 0,5. El gráfico de respuesta de frecuencia muestra una ganancia de 0,64, que coincide con la amplitud mostrada anteriormente. Para la longitud de la base de 7,5 m, la relación es 1,25 y la ganancia es - 0,18, lo que también coincide.



- **Un filtro de suavizado de media móvil se denomina filtro de paso bajo ("low-pass").**

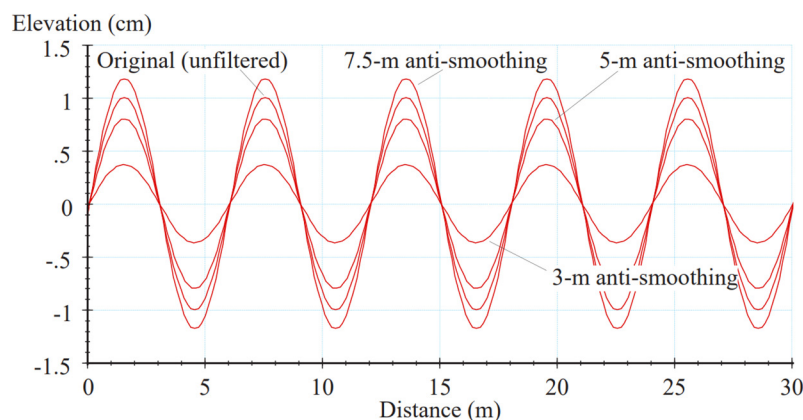
Como cualquier otro filtro, algunas cosas pasan sin cambios, otras se reducen y otras pueden eliminarse por completo. Vimos antes que la amplitud de la senoide de 6 m se reduce ligeramente con una media móvil de 3 m. Para una media móvil de 5 m, se reduce sustancialmente. Para una media móvil de 6 m, se eliminaría por completo. Para una media móvil de 7,5 m, la senoide no se elimina. La amplitud se reduce en magnitud y tiene un signo opuesto. (A veces se dice que está desfasado).

En general, el filtro atenúa las sinusoides con longitudes de onda cercanas a la longitud de la base y deja las sinusoides con longitudes de onda más largas casi intactas. En términos de números de onda, atenúa los números de onda altos y deja pasar los números de onda bajos. Por esta razón se le llama filtro de paso bajo.

- **La versión anti-suavizado de la media móvil es un filtro de paso alto.**

Recuerde que la versión anti-suavizado de una media móvil implica restar un perfil suavizado del original. Eso significa que la ganancia de respuesta de frecuencia para la versión anti-suavizado se puede derivar tomando uno (1.0) menos la ganancia de la versión suavizante. La figura anterior muestra ambas funciones de respuesta. En cualquier relación de número de onda dada, las dos ganancias suman la unidad.

Los filtros también pueden amplificar las señales. Tenga en cuenta que la versión de paso alto (anti-suavizado) de la media móvil amplifica las sinusoides cuando la relación entre longitud de base y longitud de onda está entre 1 y 2. La siguiente figura muestra cómo la versión de paso alto de la media móvil afecta a una frecuencia de 6- m sinusoide. Si lees las amplitudes de los tres gráficos filtrados, deberías encontrar que coinciden con las ganancias mostradas en el gráfico anterior de respuesta de frecuencia.



- **Los gráficos de respuesta de frecuencia de paso alto y paso bajo se pueden volver a escalar fácilmente.**

Suponga que desea ver el efecto de un filtro de paso alto de media móvil de 30 m.

El gráfico anterior muestra el efecto de una longitud de base de 3 m sobre una sinusoide de 6 m. Si el eje X se redimensionara en un factor de 10, para pasar de 0 a 300 m, entonces la longitud de la base sería de 30 m y la respuesta mostrada sería correcta para una sinusoide de 60 m.

Las ganancias de los filtros a menudo dependen de la relación entre la longitud de onda y un parámetro del filtro. Por lo tanto, a menudo se representan utilizando frecuencia normalizada o número de onda, como se hizo en el gráfico de respuesta de frecuencia de promedio móvil.

- **Un diagrama de Bode es un diagrama de respuesta en frecuencia realizado en ejes log-log.**

Si el registro de la ganancia del filtro se traza contra el registro del número de onda o la frecuencia, el gráfico se llama diagrama de Bode. Los ingenieros eléctricos utilizan diagramas de Bode para caracterizar sistemas como ayuda para diseñar sistemas de control.

¿Qué es una densidad espectral de potencia?

El perfil típico de una carretera no tiene ningún parecido directo con una senoide pura. Como veremos en breve, el perfil típico de una carretera abarca un espectro de longitudes de onda sinusoidales. La función de densidad espectral de potencia (Power Spectral Density, PSD) es una representación estadística de la importancia de varios números de onda.

- **Los perfiles se pueden descomponer en una serie de sinusoides.**

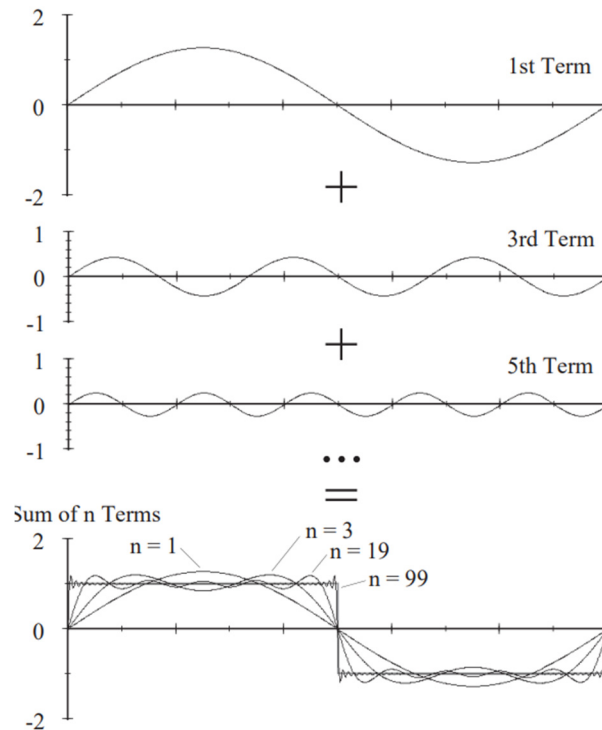
Se puede construir matemáticamente una "línea ondulada" de forma arbitraria a partir de una serie de sinusoides con diferentes longitudes de onda, amplitudes y fases. Por ejemplo, considere un cambio de paso. La siguiente figura muestra cómo se suman varios conjuntos de sinusoides para aproximar el paso.

Si se utiliza una sola senoide, cuya longitud de onda es la misma que la distancia recorrida en el gráfico, la amplitud y la fase se configuran para proporcionar solo la aproximación burda indicada para $N=1$. Resulta que para el cambio de paso que se muestra, las amplitudes de todas las sinusoides cuyas longitudes de onda son un divisor par de la longitud ($1/2$, $1/4$, $1/6$, etc.), la amplitud debe ser cero: agregando una senoide no hace que la aproximación coincida mejor con el paso. Sin embargo, para longitudes de onda que son divisores impares (1 , $1/3$, $1/5$, etc.), cada senoide adicional mejora la aproximación. El gráfico muestra que se obtiene una aproximación cercana para un gran número de sinusoides (por ejemplo, $N=99$).

El método general de "construir" un cambio de paso con sinusoides también funciona para un perfil arbitrario. Si un perfil se define con $2N$ puntos de elevación igualmente espaciados, entonces se puede duplicar matemáticamente con N sinusoides. Debido a que se agregan tantas sinusoides, sus amplitudes individuales no son grandes. Existe una transformación matemática que calcula las amplitudes de las sinusoides que podrían sumarse para construir el perfil. Se llama transformada de Fourier. La transformada de Fourier se puede escalar de manera que muestre cómo se "distribuye" la varianza del perfil en un conjunto de sinusoides. Cuando se escala de esta manera, la transformada se denomina función de densidad espectral de potencia (PSD).

- **Una función PSD muestra cómo se distribuye la varianza sobre el número de onda.**

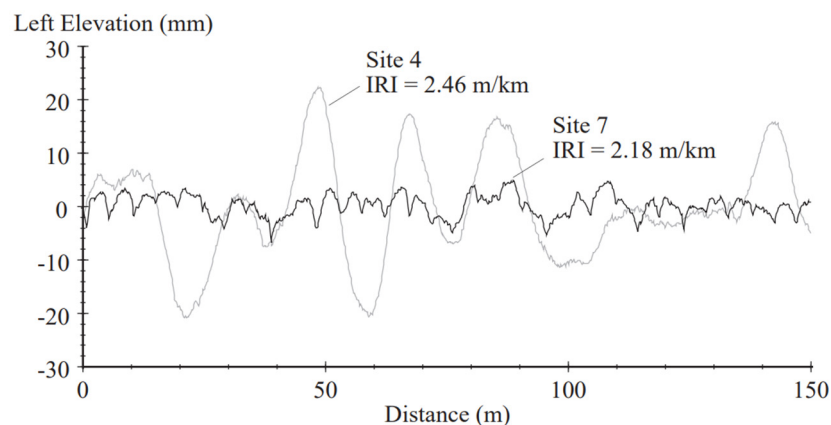
La función PSD se desarrolló originalmente para caracterizar tensiones. Los mismos cálculos matemáticos se pueden aplicar a los perfiles de las carreteras. Dos diferencias entre un PSD de perfil de carretera y uno medido para un voltaje son (1) la varianza tiene unidades de elevación al cuadrado, en lugar de voltios al cuadrado, y (2) la distribución es sobre el número de onda (ciclo/metro o ciclo/pie) en lugar de que la frecuencia (ciclo/seg).



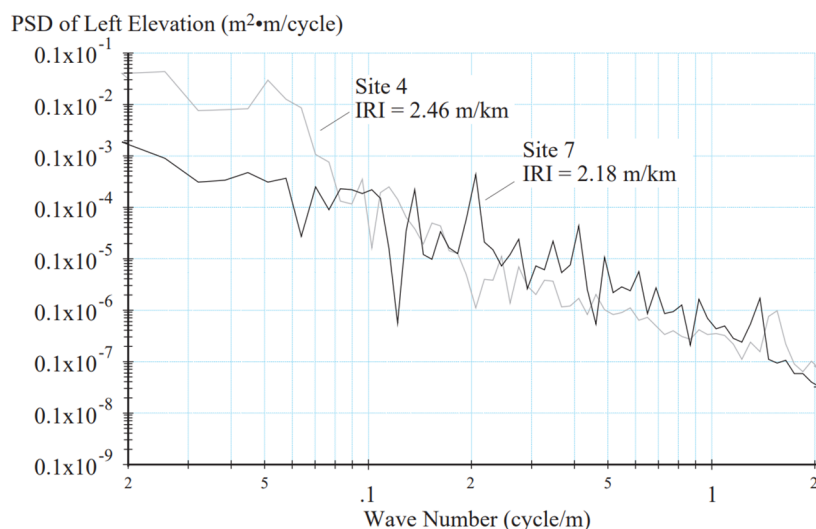
- **¡La densidad espectral de potencia no tiene nada que ver con la potencia!**

La palabra "potencia" en el nombre proviene de su aplicación inicial en electrónica, donde se aplicaba a voltajes. La variación de un voltaje es proporcional a la potencia en una resistencia, por lo que el PSD ilustró la distribución de la potencia eléctrica en función de la frecuencia. Un PSD de carretera no tiene absolutamente ninguna relación con el poder.

Considere dos perfiles de carretera con propiedades resumidas de rugosidad similares, pero obviamente con formas de perfil diferentes. (La estadística IRI utilizada para definir los niveles generales de rugosidad se describirá más adelante). Los perfiles se muestran en la siguiente figura. El sitio 4 tiene ondulaciones grandes y largas típicas de caminos bituminosos. En contraste, el Sitio 7 muestra menos variación general, pero una variación más "dura", como es típico en las carreteras del PCC.



Las funciones PSD para los dos perfiles se muestran a continuación. A primera vista, los dos Las funciones PSD tienen más en común que otras. Las amplitudes de PSD cubren muchos órdenes de magnitud. Para números de onda bajos, las amplitudes son mucho mayores que para números de onda altos. Sin embargo, incluso con estos puntos en común, las dos tramas del PSD revelar las diferencias características en los perfiles. El PSD para el Sitio 4 tiene relativamente amplitudes más altas para números de onda bajos en la vecindad de 0,03 ciclos/pie (33 m ciclos), correspondientes a las ondulaciones visibles en el gráfico anterior. Por otro lado, el Sitio 4 tiene amplitudes más bajas con números de onda más altos, cerca de 0,3 (ciclos de 3,3 m).



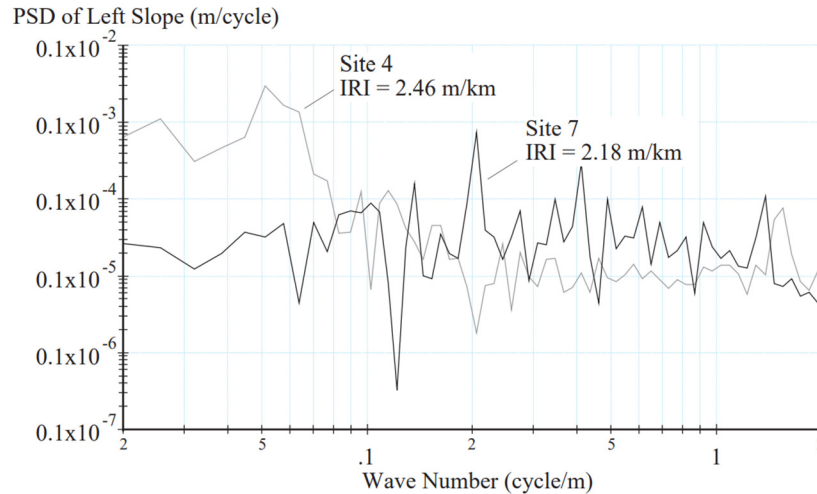
- **La amplitud en la elevación del perfil crece con las longitudes de onda.**

El gráfico anterior respalda lo que ya hemos visto en los gráficos de perfil. Hemos visto que cuando los perfiles se filtran mediante software para atenuar longitudes de onda largas, los perfiles resultantes muestran variaciones muy pequeñas. Un perfil sin filtrar puede presentar variaciones de varios metros. Cuando se filtra para eliminar las pendientes y las ondulaciones largas, el rango de variaciones puede cubrir sólo unos pocos centímetros. Así, hemos visto que las longitudes de onda largas están asociadas con grandes amplitudes de variación de elevación.

La relación exacta entre la amplitud y el número de onda (o su inversa, la longitud de onda) varía entre los diferentes perfiles. Sin embargo, todas las carreteras muestran una tendencia básica similar. En promedio, la amplitud disminuye rápidamente con el número de onda.

- **La amplitud en la pendiente del perfil es más uniforme que en la elevación.**

Las funciones PSD se pueden calcular para derivadas de la elevación del perfil, como la pendiente y la curvatura (aceleración espacial). Las funciones PSD de pendiente del perfil muestran mejor las diferencias en las propiedades de rugosidad, porque el espectro básico de rugosidad sobre el número de ondas es más uniforme. La siguiente figura muestra las funciones PSD de pendiente para los mismos dos ejemplos.



Observe que con este tipo de gráfico, las diferencias entre los dos caminos se destacan claramente: el sitio 4 es más rugoso para números de onda menores a 0,1 (ciclos de 10 m) y más suave para longitudes de onda entre 0,2 (ciclos de 5 m) y 1 (ciclos de 1 m).

- **¿Qué es el “Vehicle Ride” (calidad de rodado en vehículo)?**

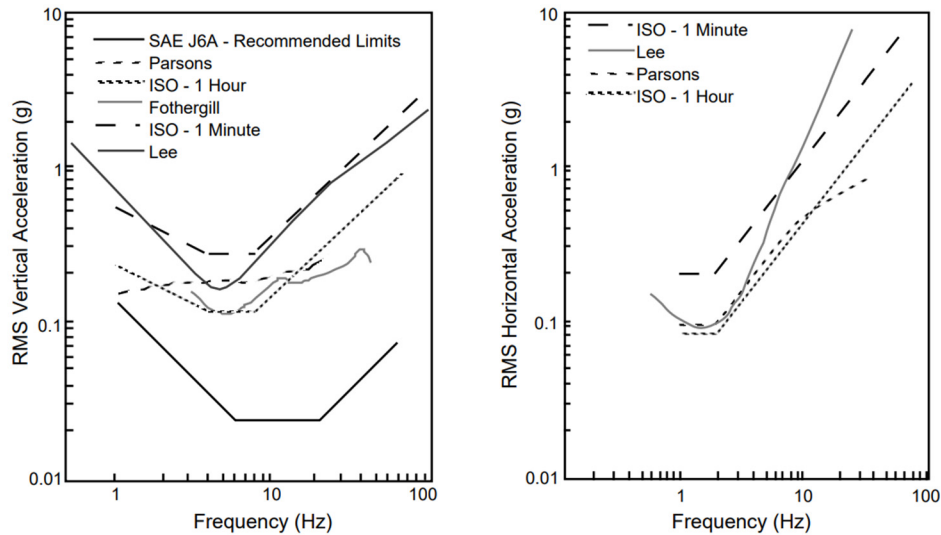
El propósito de una carretera es proporcionar una superficie para que los vehículos circulen a altas velocidades. Un objetivo principal de los perfilómetros es tratar de recopilar información sobre la carretera que sea suficiente para estimar la satisfacción del público automovilista. El juicio del público depende en gran parte del viaje que experimentan en sus automóviles al utilizar la carretera.

La calidad de rodado (“ride”) se mide como aceleraciones en la carrocería del vehículo.

Los ingenieros de calidad de rodado de automóviles miden las aceleraciones en el asiento para evaluar el rendimiento (performance) de la suspensión y la coincidencia entre la rigidez y la amortiguación de la suspensión delantera y trasera.

- **Las vibraciones del asiento se utilizan para evaluar el ajuste de la suspensión.**

La sensibilidad a las vibraciones del cuerpo humano en posición sentada ha sido cuantificada mediante numerosos estudios. Las siguientes figuras muestran la sensibilidad a la aceleración vertical y horizontal (longitudinal o lateral) obtenida de una muestra de investigación.



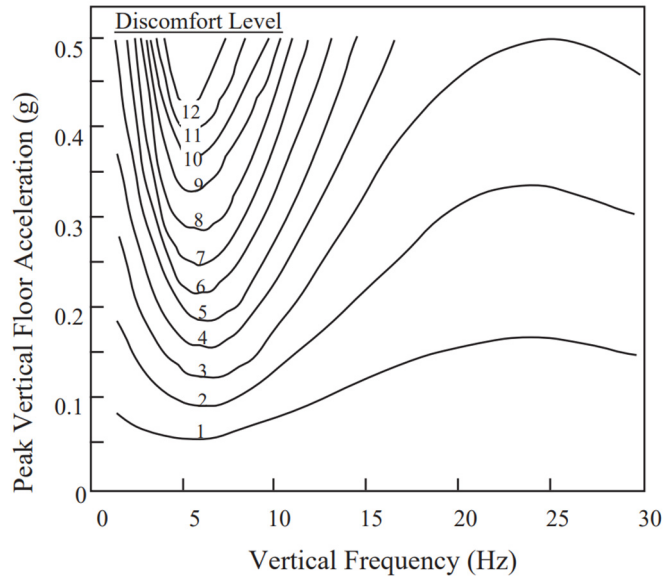
Generalmente se reconoce que el cuerpo humano tiene una tolerancia mínima a la vibración vertical de aproximadamente 5 Hz debido a la resonancia de la cavidad abdominal. Por lo tanto, los automóviles están diseñados para minimizar la transmisión de señales de la carretera a esta frecuencia colocando las frecuencias de rebote y de inclinación de la carrocería en 1-2 Hz y la resonancia del salto de las ruedas en 10-15 Hz. (Los diferentes niveles de tolerancia encontrados en los diferentes estudios reflejan variaciones en los métodos experimentales utilizados).

La tolerancia mínima para la aceleración horizontal se produce a 1 Hz. La aceleración horizontal (lateral) puede deberse al balanceo del vehículo. La mayoría de las carreteras primarias no producen mucha excitación de balanceo, aunque puede ser significativa en algunas carreteras secundarias deterioradas.

Los efectos sobre el conductor son más pronunciados en vehículos altos como furgonetas, vehículos utilitarios y camiones.

La aceleración horizontal (longitudinal) puede resultar del cabeceo de los vehículos que colocan al conductor muy por encima del suelo (furgonetas, vehículos utilitarios y camiones). Los ingenieros de conducción normalmente ajustan las suspensiones delantera y trasera para minimizar el cabeceo; sin embargo, no siempre es posible en las camionetas. Por lo tanto, los conductores de camiones experimentan más vibraciones longitudinales inducidas por el cabeceo debido a las irregularidades de la carretera que los ocupantes de vehículos de pasajeros.

En condiciones con menor vibración vertical (por ejemplo, automóviles de lujo, carreteras lisas), la sensibilidad de 5 Hz es menos pronunciada. A bajos niveles de aceleración, la sensibilidad humana se vuelve más amplia en frecuencia, como se muestra en la siguiente figura.

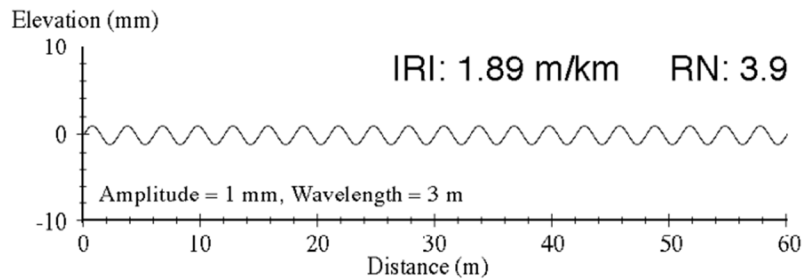
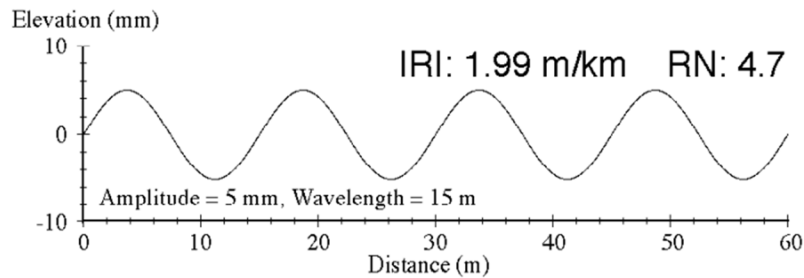
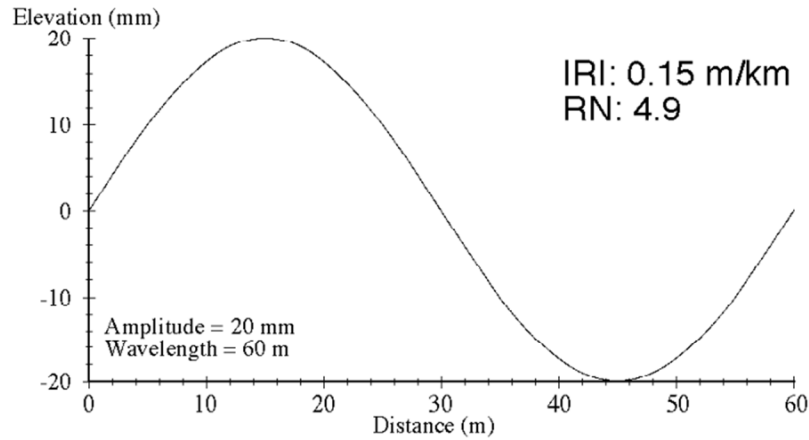


- **Se producen vibraciones importantes además del asiento.**

La calidad de rodado en el vehículo no se juzga únicamente por las vibraciones del asiento. Los ingenieros automotrices reconocen que las vibraciones que sienten las manos y los pies también influyen en la percepción de la conducción. Dedicar considerables esfuerzos de ingeniería a intentar aislar el volante de las vibraciones provocadas por la carretera o de las sacudidas de la carrocería del vehículo. También trabajan duro para evitar que la excitación de la carretera haga vibrar el suelo.

¿Cómo se relaciona la aceleración vertical con el perfil?

Dado que la aceleración vertical es de gran interés para resumir la conducción de un vehículo, es importante comprender la relación entre la elevación del perfil y la aceleración. Considere las tres sinusoides que se muestran a continuación. (Las estadísticas de IRI y RN proporcionadas en la figura se definirán más adelante).



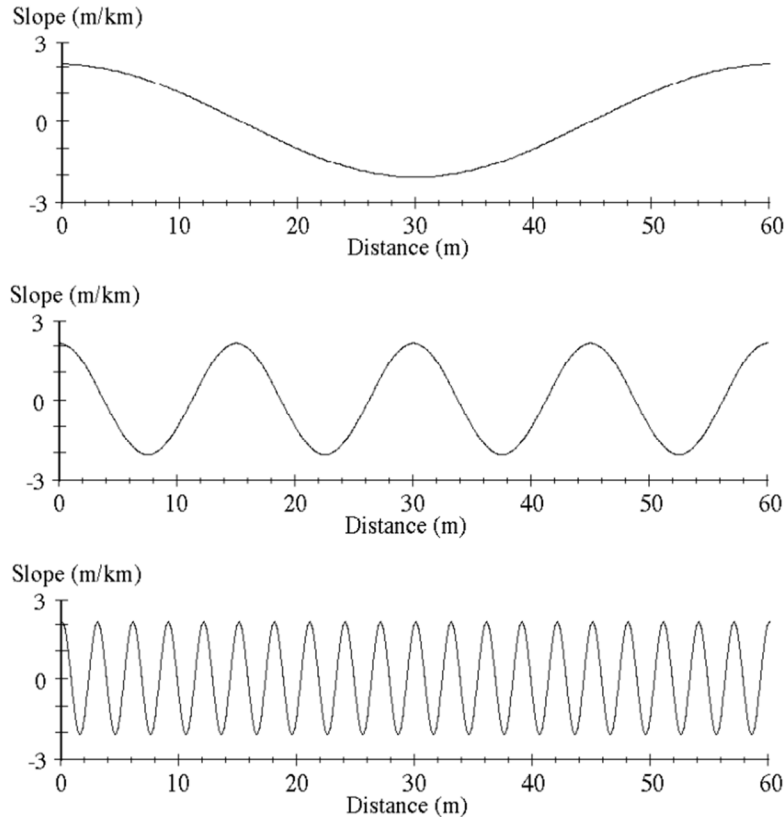
- **La derivada de una senoide es una senoide con la misma longitud de onda.**

La amplitud de la derivada de una senoide es

$$\text{Amplitud de pendiente} = \frac{2\pi A}{\lambda}$$

La amplitud A y la longitud de onda λ deben tener las mismas unidades (p. ej., pies, m). Multiplique m/m por 1000 para obtener m/km, o multiplique por 12•5280 para obtener in/mi (pulgadas por milla).

Por tanto, las derivadas de las tres sinusoides del ejemplo también son sinusoides con las mismas longitudes de onda (60, 15 y 3 m). La fórmula anterior proporciona amplitudes derivadas idénticas para las tres sinusoides, como se muestra en la siguiente figura. (La amplitud en la pendiente adimensional es 0,002094, que es lo mismo que 2,094 m/km y 132,7 in/mi.)



El proceso de tomar una derivada se puede repetir una segunda vez para obtener una representación. senoide de aceleración espacial.

- **La velocidad de desplazamiento afecta la forma en que los vehículos ven las sinusoides en la carretera.**

Un vehículo que circula por la carretera "ve" una senoide a una frecuencia

$$f = \frac{V}{\lambda} = V v$$

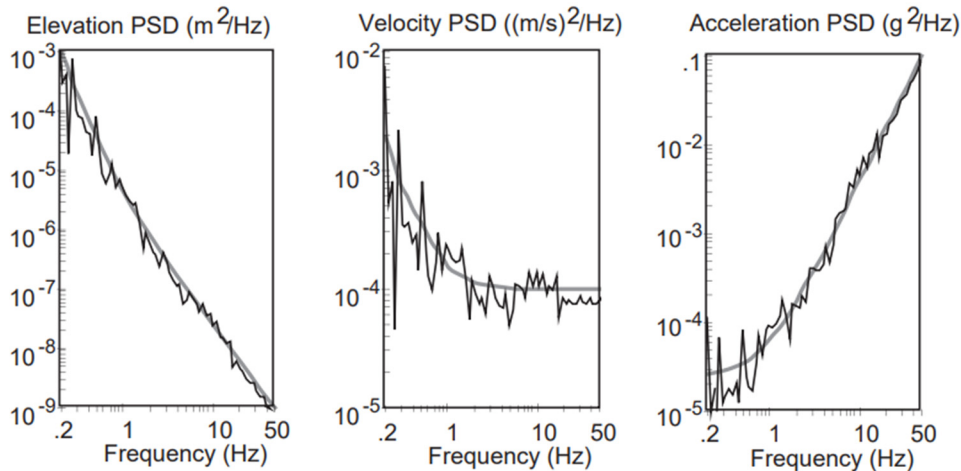
donde la frecuencia f tiene unidades de ciclo/seg, la velocidad V tiene unidades de distancia/tiempo (por ejemplo, m/seg), la longitud de onda λ tiene unidades de longitud (por ejemplo, m/ciclo) y el número de onda v tiene unidades de 1/longitud (por ejemplo, ciclo/m).

La siguiente tabla resume algunas características de las tres sinusoides de ejemplo. para una velocidad de 108 km/h (67 mi/h). Aunque el primero tiene la mayor elevación amplitud, el tercero produce la mayor aceleración vertical.

Longitud de onda	Amplitud	Pendiente Amplitud	Frecuencia (108 km/h)	Aceleración (108 km/h)
60m	20 mm	2,09 m/km	0,5 Hz	0,02 g
15m	5 mm	2,09 m/km	2,0 Hz	0,08 g
3m	1 mm	2,09 m/km	10,0 Hz	0,40 g

- Las funciones de PSD de caminos se pueden mostrar como aceleraciones.

La información obtenida al observar los tres ejemplos de sinusoides se puede extender a el amplio espectro de frecuencias (números de onda) en las carreteras típicas. La figura a continuación muestra la carretera como una entrada PSD de elevación (consulte el gráfico de la izquierda) cuando la velocidad de viaje es de 80 km/h (50 mi/h). Diferenciar una vez produce el espectro de excitación de velocidad, y diferenciar nuevamente produce la aceleración PSD. Tenga en cuenta que la aceleración es mayor en frecuencias altas, correspondientes a longitudes de onda cortas en la carretera.



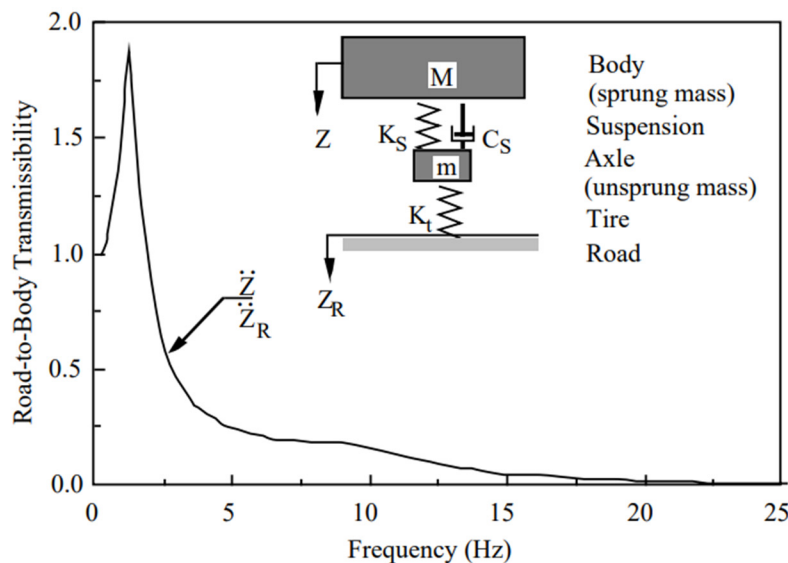
La velocidad de viaje supuesta actúa para escalar las funciones PSD. Sin embargo, la forma básica de la función PSD de la carretera es la misma que cuando se calcula en función del número de onda. La PSD de elevación con unidades de longitud $2/\text{Hz}$ tiene la misma forma básica que las PSD de elevación mostradas anteriormente como funciones del número de onda. Sólo se cambian las unidades, para implicar tiempo más que distancia. La PSD de velocidad tiene la misma forma que la PSD de pendiente. Aunque no se ha mostrado, la aceleración PSD corresponde a una aceleración espacial PSD.

¿Cómo se relaciona calidad de rodado (ride) con la carretera?

Aunque las irregularidades de la carretera son una fuente dominante de vibraciones en un vehículo de motor, el público puede separar el papel del automóvil del de la carretera. Un experimento del DOT de Michigan hace algunos años demostró que cuando se pide a las personas que califiquen el viaje de un vehículo en la carretera, están influenciadas por el tipo de automóvil (de lujo o compacto) en el que viajan. Sin embargo, si se les pide que califiquen el camino, tienden a mirar más allá del vehículo y califican la aspereza del camino de manera comparable, independientemente del tipo de vehículo en el que viajan.

- **Las suspensiones de los automóviles aíslan al conductor de las fuertes aceleraciones del camino.**

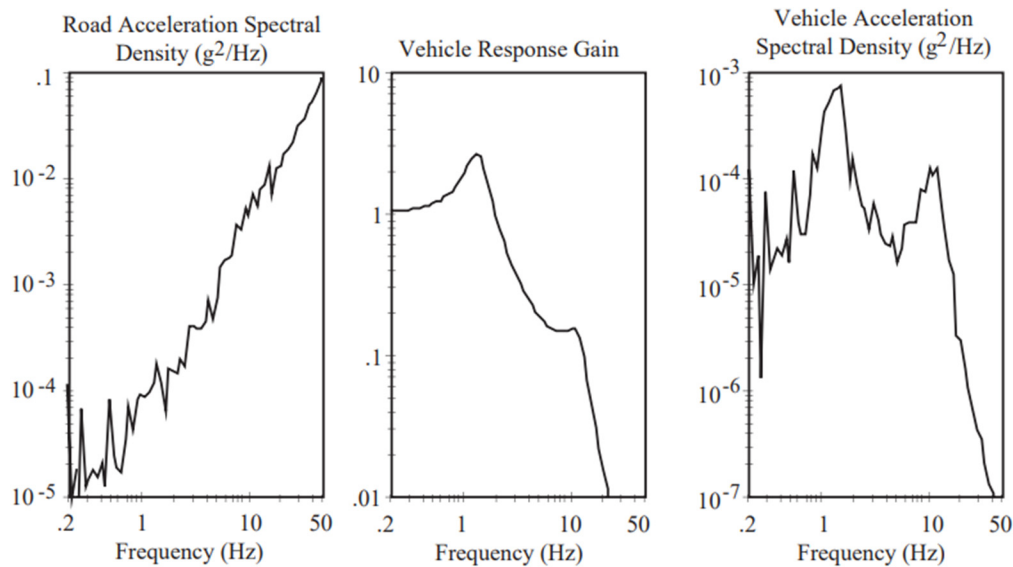
En el nivel más básico, los vehículos de motor son dinámicamente similares al modelo de un cuarto de automóvil. La suspensión que soporta la carrocería (masa suspendida) y la elasticidad del neumático ayudan a aislar la carrocería de las excitaciones de alta frecuencia de la carretera. La siguiente figura muestra las características dinámicas.



A muy baja frecuencia, el cuerpo se mueve hacia arriba y hacia abajo exactamente como lo hace el suelo. Aproximadamente a 1 Hz, la carrocería resuena en la suspensión, amplificando la entrada de la carretera en un factor de 1,5 a 3,0 para los coches típicos. A frecuencias más altas, la suspensión absorbe las influencias de la carretera, aislando la carrocería de la carretera. Aproximadamente a 10-15 Hz, la rueda resuena, rebotando hacia arriba y hacia abajo con movimientos mayores que los proporcionados por la carretera. Esto disminuye un poco el aislamiento en este rango de frecuencia, pero es un fenómeno inevitable.

- **Un vehículo es un filtro mecánico, con una función de respuesta de frecuencia.**

El rendimiento de "aislamiento" de una suspensión se muestra en la siguiente figura. El espectro de aceleración de las irregularidades del camino a la izquierda pasa a través del filtro del sistema de suspensión del automóvil para producir un espectro de aceleración en la carrocería como se muestra a la derecha. El gráfico del medio es la respuesta de frecuencia del vehículo, con la ganancia representada en unidades apropiadas para PSD.



Aunque la aceleración de aproximadamente 1 Hz se amplifica en el proceso, las que están por encima de esta frecuencia se atenúan fuertemente. El segundo pico de aceleración alrededor de 10 Hz se debe a la resonancia del salto de la rueda. Sin embargo, observe cómo el aislamiento de la suspensión reduce las vibraciones cercanas a los 5 Hz, la frecuencia a la que el cuerpo humano es más sensible a la aceleración vertical.

- **¿Es así de sencilla la dinámica de la calidad de rodado del vehículo?**

No exactamente. La dinámica del cuarto de automóvil descrita anteriormente es básica para todos los vehículos y representa aproximadamente el 75% de las vibraciones presentes en el vehículo. Los modelos de vehículos de cuatro ruedas que pueden cabecear y rodar añaden un poco más al panorama, pero en general los automóviles se pueden "ajustar" para que este tipo de vibraciones sean mucho menos significativas.

Más importantes son las entradas de adelante - atrás a través de las ruedas y los modos estructurales de la carrocería que contribuyen a las vibraciones de marcha en toda la carrocería del automóvil. Estos contribuyen a la calidad de marcha percibida del vehículo, pero son muy específicos de cada modelo.

¿Qué es la rugosidad del camino?

Por lejos la principal aplicación de los perfilómetros de carreteras es cuantificar la rugosidad de los pavimentos.

- **No existe una definición única y estándar de rugosidad de la carretera.**

Aquí está la definición de la Sociedad Estadounidense de Ensayos y Materiales (ASTM) (E867):

"Las desviaciones de la superficie de un pavimento de una superficie plana verdadera con dimensiones características que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de marcha, las cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, longitudinal. perfil, perfil transversal y pendiente transversal".

Esto cubre los factores que contribuyen a la rugosidad de la carretera. Sin embargo, no proporciona una definición cuantitativa ni una escala estándar de rugosidad. También es muy amplio e incluye cualidades como el drenaje y la calidad de marcha que generalmente no están relacionadas entre sí.

- **La suavidad ("smoothness") es la falta de rugosidad ("roughness").**

Algunos ingenieros prefieren considerar la suavidad como una visión más optimista del estado de la carretera. Debido a que la suavidad es una falta de rugosidad, primero habría que determinar la rugosidad y luego transformar el número. En Estados Unidos, la convención es abordar la aspereza más que la suavidad.

Para el público viajero, el concepto de aspereza es sencillo:

"Lo sé cuando lo siento".

- **Algunos ingenieros piensan que la rugosidad es el resultado de un dispositivo específico.**

La rugosidad ha sido de interés desde que existen las vías públicas. Los usuarios a menudo consideran que los métodos antiguos para medir la rugosidad son estándares. Algunos de los instrumentos utilizados en el pasado se describen en la siguiente sección. Desafortunadamente, a menos que una medida de rugosidad se base en el perfil, no se puede reproducir. (La mayoría de los dispositivos considerados "estándares" históricos han sido descartados o yacen oxidados y abandonados en patios traseros).

- **La rugosidad implica una variación en la elevación de la superficie que induce vibraciones en los vehículos que circulan.**

Hay muchos tipos de vibración, que van desde las repugnantes arcadas debidas a las longitudes de onda largas, hasta los rápidos impactos que hacen temblar los dientes y los ruidos irritantes causados por las longitudes de onda cortas. Cualquier característica de la carretera que provoque una aceleración no deseada del vehículo será denominada "aspereza" por las personas interesadas en esa forma de respuesta.

- **La rugosidad se define en un intervalo de perfil.**

No tiene sentido hablar de la aspereza de un punto. En cambio, se debe considerar la rugosidad como un resumen de las desviaciones que ocurren en un intervalo entre dos puntos.

- **Existen muchos tipos de asperezas.**

Los usuarios de la carretera pueden identificar diferentes tipos de irregularidades, como las diversas formas de vibración no deseada del vehículo. Es razonable calcular más de un índice de rugosidad a partir de un perfil, si los diferentes índices proporcionan información independiente sobre el estado de la carretera. No todos los tipos de rugosidad son únicos. Muchos de los índices de rugosidad que se han calculado a partir de perfiles están tan fuertemente correlacionados que uno es estadísticamente suficiente. Es de dudosa utilidad calcular dos índices que digan esencialmente lo mismo.

- **Los diferentes tipos de rugosidad están asociados con diferentes longitudes de onda.**

Por ejemplo, los fabricantes de vehículos se preocupan por diferentes aspectos de la marcha, que van desde los movimientos bruscos que implican principalmente el movimiento de la suspensión, hasta el ruido audible que implica la acústica de la carrocería. Estos son causados por rangos de longitud de onda muy diferentes. (Los movimientos de la carrocería del vehículo se deben a longitudes de onda del orden de 15 metros, mientras que el ruido involucra longitudes de onda inferiores a 1 metro).

Los análisis de rugosidad se pueden comparar en función de cómo procesan una senoide. La mayoría de los análisis filtran longitudes de onda muy largas y longitudes de onda muy cortas.

- **La rugosidad no se identifica tan fácilmente como una propiedad unidimensional.**

La longitud, el peso y otras medidas implican propiedades físicas estáticas de los objetos.

La rugosidad involucra al menos dos dimensiones de manera compleja: involucra la variación de la altura de un perfil a lo largo de su longitud. Ni siquiera se puede hablar de la rugosidad de un único punto del perfil: hay que considerarlo a lo largo de cierta longitud.

La rugosidad es análoga al nivel sonoro del ruido. Aunque la presión del aire es una propiedad estática, el nivel de ruido implica cambios en la presión del aire a lo largo del tiempo. La medición del ruido se ha estandarizado hasta el punto de que podemos comprar sonómetros económicos que combinan la medición de la presión del aire en el tiempo con un análisis matemático (implementado electrónicamente) para procesar las variaciones y producir un único nivel de salida. Hay varios métodos de análisis estándar para elegir, que se pueden seleccionar mediante un interruptor en el sonómetro. Los estándares permiten a las personas que se preocupan por el sonido comunicarse utilizando medidas con la confianza de que tendrán el mismo significado.

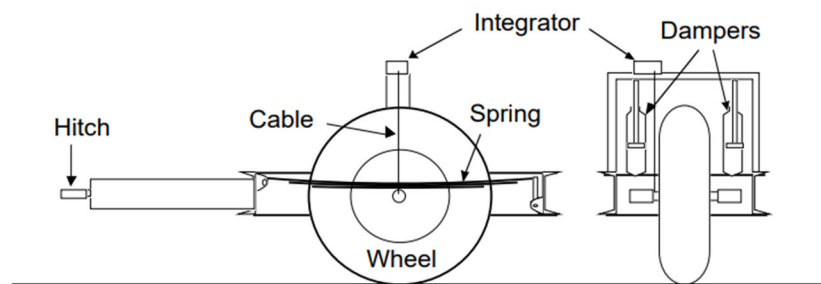
Quizás en unos años la rugosidad de la carretera sea tan estándar como el nivel de sonido.

¿Qué son los sistemas de tipo respuesta?

Aunque este libro trata sobre perfilómetros, debemos reconocer que históricamente se han utilizado otros tipos de sistemas para definir la rugosidad de las carreteras. Muchos ingenieros hoy en día tienen un concepto intuitivo de rugosidad que se basa en el comportamiento de sistemas más antiguos.

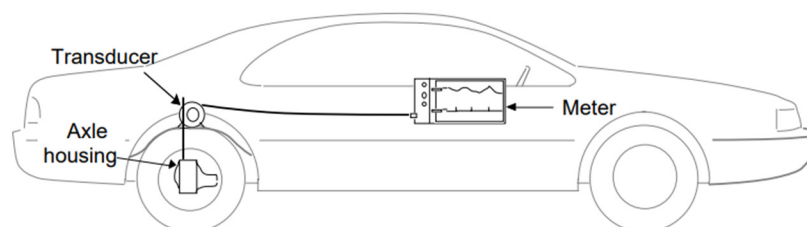
Ya en la década de 1920, los ingenieros de carreteras instalaron dispositivos en los automóviles para registrar la carrera de la suspensión como medida de rugosidad. Estos se denominaban medidores de carreteras y tenían varios nombres genéricos. entre ellos: sistemas de medición de rugosidad de carreteras de tipo respuesta (RTRRMS), sistemas de tipo respuesta y sistemas de medidores de carreteras. En estos sistemas, el vehículo es un turismo, una furgoneta, un camión ligero o un remolque especial. Un medidor de carretera es un transductor que acumula los movimientos de la suspensión. Algunas de las marcas populares fueron Mays Ride Meter, el medidor PCA, el medidor Cox y varios modelos caseros.

Casi todos los diseños de medidores de carreteras siguen el concepto del Roughometer de la Oficina de Carreteras Públicas (BPR) y acumulan deflexiones de la suspensión del vehículo a medida que avanza por la carretera. El BPR Roughometer es un remolque de una sola rueda con un mecanismo de embrague unidireccional que acumula la carrera de la suspensión en una dirección. (El trazo total es el doble de ese valor).



El rugosímetro BPR.

Los medidores de carretera se utilizan más comúnmente en automóviles de pasajeros, como se muestra en la siguiente figura. La medida de rugosidad que se obtiene es "pulgadas" de carrera de suspensión acumulada, normalizada por la distancia recorrida. La medida generalmente se informa con unidades de ingeniería como pulgadas/mi o m/km, aunque a veces se utilizan unidades arbitrarias basadas en el hardware de instrumentación, por ejemplo, "cuentas/mi". Aunque no es obvia, esta medida de la respuesta del vehículo es muy similar en su contenido de frecuencia a las aceleraciones en la carrocería del vehículo, por lo que está altamente correlacionada con la vibración de la marcha.



Un automóvil con un medidor Mays meter.

- **Las medidas de los sistemas de tipo respuesta están sujetas a todas y cada una de las variables que influyen en las características de respuesta del vehículo.**

Incluso cuando el vehículo está estandarizado, persisten diferencias entre vehículos que podría pensar que son idénticos. Para agravar aún más el problema, las propiedades de respuesta de los vehículos cambian con el tiempo. El hecho de que el sistema de tipo respuesta dependa de la dinámica del vehículo anfitrión tiene dos efectos no deseados:

1. Los métodos de medición de rugosidad no han sido estables en el tiempo. Las medidas tomadas hoy con los medidores de carreteras no se pueden comparar con confianza con las tomadas hace varios años.
2. Las mediciones de rugosidad no han sido transportables. Las medidas de los metros de carretera realizadas por un sistema rara vez son reproducibles por otro.

Estos problemas existen en parte porque los medidores de carreteras suelen ser inventos diseñados para ser económicos, resistentes y fáciles de usar. No existió una comprensión rigurosa de cómo funcionan junto con un vehículo hasta 1980, cuando las variables fueron estudiadas en un proyecto de investigación financiado por el Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras (NCHRP).

- **El Informe 228 del NCHRP describe cómo funcionan los sistemas de tipo respuesta.**

Una segunda fuente de dificultad que involucra los sistemas de tipo respuesta ha sido la falta de una escala de rugosidad estándar. Con una escala de rugosidad estándar, algunos de los problemas inherentes a un sistema de tipo respuesta se pueden superar mediante la calibración. Al principio, muchos de los usuarios de instrumentos de rugosidad no consideraron que la falta de una medida estándar fuera un problema grave. Los datos de rugosidad de una ciudad, condado o estado podrían tener unidades arbitrarias, siempre que la base de datos fuera internamente consistente. Sin embargo, incluso la repetibilidad de los instrumentos fue un problema.

- **Las medidas "in/mi" (pulgadas por milla) de sistemas de tipo respuesta son útiles.**

Aunque existen problemas relacionados con la reproducibilidad y portabilidad de los datos tomados con sistemas de tipo respuesta, una de las razones por las que han sido tan populares durante los últimos 50 años es que funcionan. Los ingenieros consideran que las medidas que producen coinciden con su experiencia para determinar la calidad del pavimento de una manera significativa. Si se pudiera lograr que dieran resultados reproducibles entre vehículos y, con el tiempo, es posible que hoy en día no haya tanto interés en los métodos de elaboración de perfiles.

¿Cuáles son las respuestas de frecuencia de los Dispositivos de Medición de Rugosidad?

Los primeros dispositivos de rugosidad actúan como filtros mecánicos lineales. Dada una senoide como entrada, producen una senoide con el mismo número de onda, que luego es procesada por la instrumentación a bordo para producir un índice resumido.

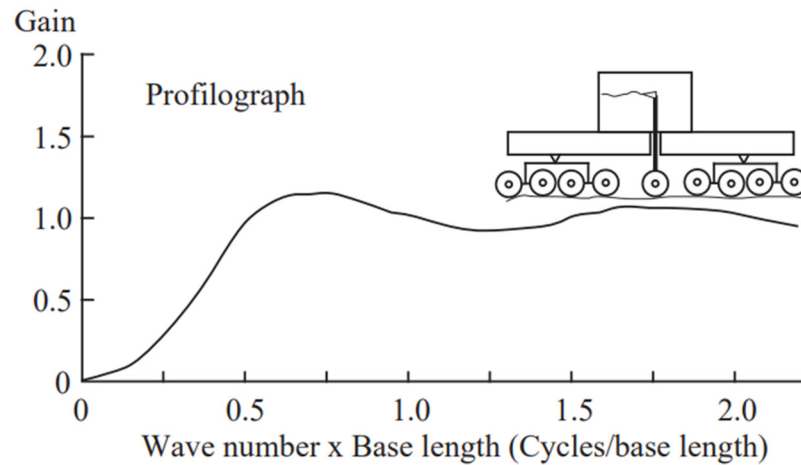
- **Los sistemas de medición de rugosidad son filtros paso banda o paso alto.**

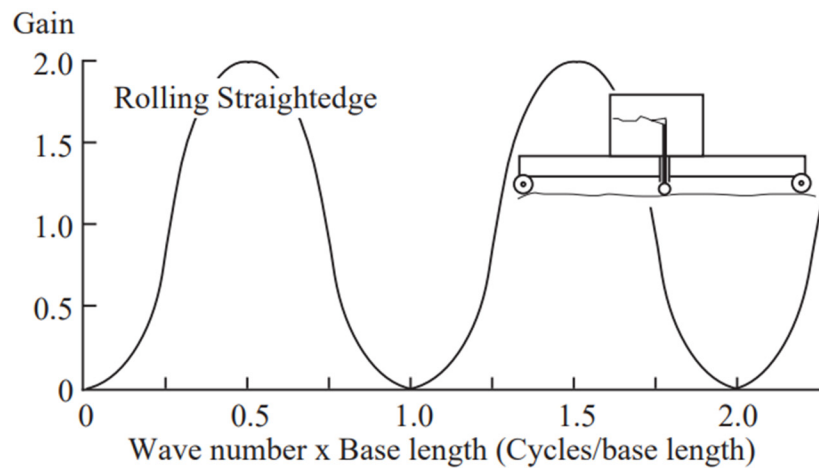
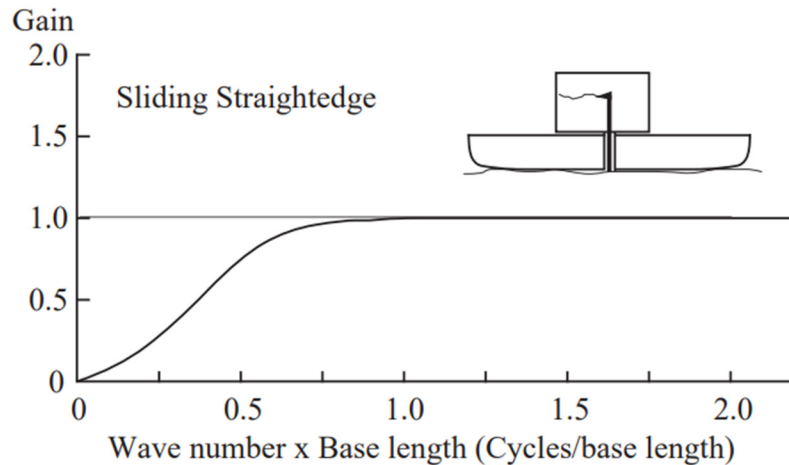
Ya hemos visto con el ejemplo que en un perfil sin filtrar predominan la pendiente de la carretera y las ondulaciones de longitud de onda larga. Casi todos los dispositivos para las irregularidades de la carretera han funcionado como filtros mecánicos, para eliminar las longitudes de onda largas y centrarse en las longitudes de onda que afectan la marcha del vehículo.

- **Los dispositivos de baja velocidad de rodado filtran el perfil a través de su geometría.**

Tal como los números de onda fueron normalizados por la longitud de la base promedio móvil, algunos de los gráficos que siguen tienen el número de onda normalizado por una dimensión característica del dispositivo.

El perfilógrafo es un sistema físico que en realidad tiene un concepto cercano a un promedio móvil de paso alto. El promedio lo establecen las numerosas ruedas y las desviaciones se miden en relación con ese promedio.

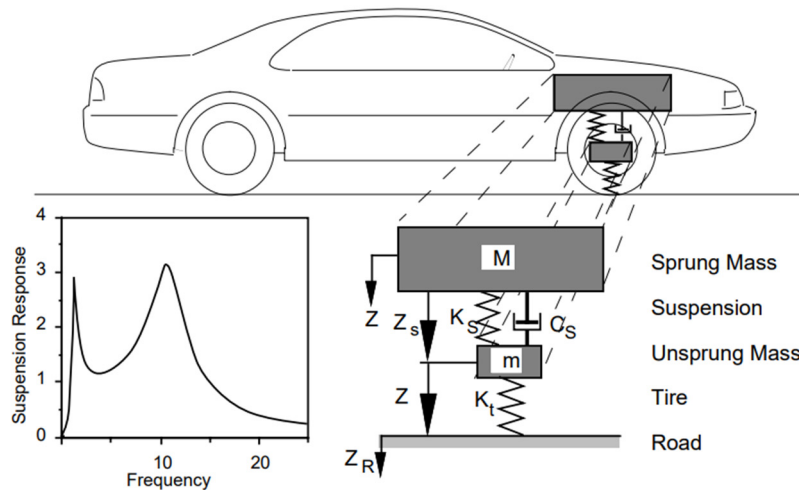




- **Los sistemas de tipo respuesta filtran el perfil a través de la dinámica del vehículo.**

Como se mostró anteriormente, los automóviles y otros vehículos diseñados para el uso en carreteras utilizan suspensiones y neumáticos para aislar a los conductores y la carga de las aceleraciones de gran amplitud asociadas con la superficie de la carretera. La dinámica del vehículo filtra la entrada, amplificando la respuesta en algunas frecuencias y atenuándola en otros.

Resulta que la respuesta de frecuencia para la entrada del medidor de carretera (velocidad entre el eje y la carrocería del vehículo) es cualitativamente muy similar al de la aceleración vertical en el cuerpo. Tanto la aceleración del pasajero como el movimiento del medidor de carretera se ven afectados en partes aproximadamente iguales por la resonancia del cuerpo (1 a 2 Hz) y el eje resonancia (aproximadamente 10-15 Hz), con cierto aislamiento cerca de 5 Hz y para frecuencias por encima de 15 Hz.



A diferencia de los dispositivos de baja velocidad, el filtrado asociado a un vehículo en movimiento no depende de la geometría. Más bien, depende de una dinámica basada en el tiempo. La respuesta de frecuencia de un automóvil es aproximadamente independiente de la velocidad, cuando la frecuencia se define en unidades de ciclo/seg. Sin embargo, si se trata como una función de la frecuencia espacial (número de onda), entonces la respuesta depende de la velocidad, debido a la relación que

$$f = V v = \frac{V}{\lambda}$$

donde f es la frecuencia en ciclo/s, V es la velocidad en pies/s, v es el número de onda en ciclo/pie y λ es la longitud de onda en pies/ciclo.

¿Qué es un índice de perfil?

Una medida de perfil es una serie de números que representan la elevación relativa a alguna referencia. Hay miles de números por milla de perfil medido. Puede que se perfilen uno, dos o más "tramos" de la carretera mientras conduce el generador de perfiles. En poco tiempo, puedes acumular literalmente millones de números. ¿Cómo se pueden reducir esos millones de números para proporcionar información que pueda utilizar?

- **Un índice de perfil es un número resumido calculado a partir de los muchos números que componen un perfil.**

Los detalles del cálculo determinan la importancia y el significado del índice. El número podría estar relacionado con el movimiento de un modelo matemático de vehículo, un resumen de requisitos de rectificado, algún índice utilizado en el pasado, o a un concepto abstracto de rugosidad. O puede que no esté vinculado a nada en absoluto.

- **El índice calculado sólo es válido si los datos del perfil son válidos.**

Si el perfilómetro no funciona correctamente o no es adecuado para el índice de interés, no es posible obtener el mismo valor numérico que se obtendría del perfil real. No todos los perfilómetros son capaces de medir todos los índices de rugosidad posibles. La precisión de un índice calculado está limitada en última instancia por errores en el perfil medido.

- **Existe un valor verdadero para cualquier índice dado.**

El verdadero valor de un índice es el valor que se obtendría aplicando el método de cálculo al perfil real.

- **Un índice de perfil es portátil y reproducible.**

Si se puede calcular un índice a partir del perfil real, cualquier perfilómetro válido puede medir la propiedad que representa. Por lo tanto, un índice basado en perfiles es portátil: puede medirse mediante diferentes tipos de instrumentos perfilómetros, siempre que sean válidos para ese índice.

Algunos análisis de perfiles no son tan portátiles como otros. Por ejemplo, si un análisis requiere un intervalo de muestra específico, un generador de perfiles es válido para su cálculo solo si el intervalo de muestra coincide.

- **Un índice de perfil es estable en el tiempo.**

Dado que el concepto de perfil verdadero tiene el mismo significado año tras año, de ello se deduce que una transformación matemática del perfil verdadero también es estable en el tiempo.

- **Todos los índices de rugosidad utilizados se calculan con un método básico de 4 pasos.**

Las transformaciones matemáticas utilizadas para calcular casi cualquier índice de rugosidad del perfil se pueden organizar en cuatro pasos. Los detalles de los cálculos realizados en cada paso definen el índice. Los pasos son los siguientes.

1. ¿Cuántos perfiles se necesitan para capturar las condiciones de la superficie de interés?

La mayoría de los índices se calculan a partir de un único perfil. Si su perfilómetro mide el perfil de las huellas de las ruedas izquierda y derecha en un carril, podrá obtener índices de rugosidad separados para cada una. Sin embargo, algunos índices requieren dos perfiles.

2. ¿Cómo se filtra el perfil?

Todos los índices de rugosidad basados en perfiles que se utilizan actualmente implican al menos un filtro, para "filtrar" longitudes de onda que no son de interés. Algunos análisis implican varios filtros aplicados en secuencia.

3. ¿Cómo se acumula (y reduce) un perfil filtrado?

La secuencia de números transformados debe reducirse a un único índice. Esto comúnmente se hace acumulando los valores absolutos de los números o acumulando los valores al cuadrado. El resultado es un único número acumulativo.

4. ¿Cómo se escala el número de resumen?

El último paso es convertir el número acumulado a una escala adecuada. Esto casi siempre implica dividir por el número de puntos del perfil o la longitud del perfil, para normalizar la rugosidad por la longitud recorrida. Por ejemplo, muchos índices de rugosidad históricos han tenido unidades de pulgadas/milla. Se puede utilizar un factor de escala para obtener unidades estándar. Se puede utilizar una ecuación de transformación para convertir de una escala basada en perfil a una escala arbitraria.

- **A partir de un único perfil se pueden calcular muchos índices de rugosidad.**

Una ventaja de utilizar perfilómetros para determinar la rugosidad, además de la portabilidad, es la flexibilidad. Puedes obtener varias estadísticas de un mismo perfil. Cada estadística puede potencialmente describir una característica diferente del perfil.

¿Qué es el IRI?

Casi todos los sistemas automatizados de elaboración de perfiles de carreteras incluyen software para calcular una estadística llamada Índice Internacional de Rugosidad (IRI). A través del Grupo de Usuarios de Perfilómetros de Carreteras (RPUG) y el Sistema de Monitoreo del Desempeño de Carreteras (HPMS) de la Administración Federal de Carreteras (FHWA), los usuarios de perfiles han compartido experiencias en la medición del IRI. Las medidas IRI de diferentes Estados son en gran medida compatibles. Incluso las medidas IRI de diferentes países se pueden comparar directamente.

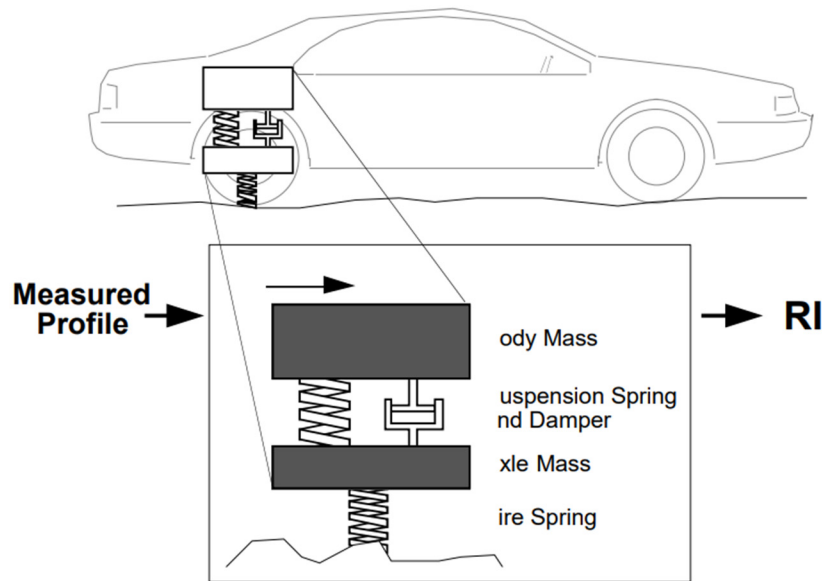
Antecedentes

- **El IRI es una continuación de la estadística de rugosidad "in/mi" que se utiliza desde que se desarrolló el automóvil.**

Aunque la medida "in/mi" de sistemas de tipo respuesta ha sido popular desde la década de 1940, no era posible obtener los mismos valores de diferentes vehículos, ni siquiera del mismo vehículo a lo largo del tiempo. Varios estados solicitaron investigaciones y, a finales de la década de 1970, los sistemas se estudiaron en el marco del Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras (NCHRP). Los resultados se informaron en el Informe 228 del NCHRP.

- **La mayor parte de la investigación subyacente al IRI se encuentra en el Informe 228 del NCHRP.**

Para calibrar los sistemas de tipo respuesta se definió un sistema ideal para la computadora. Se desarrollaron y probaron modelos matemáticos del vehículo y del medidor de carretera, y se demostró que proporcionan el mismo tipo de índice "in/mi" que la función matemática del perfil longitudinal.



Algoritmo informático

Debido a que los sistemas de medición de rugosidad de las carreteras de tipo respuesta eran comunes, el índice de perfil se diseñó para correlacionarse bien con el resultado de estos sistemas. El filtro se basa en un modelo matemático llamado cuarto de coche. El filtro Quarter-car calcula la desviación de la suspensión de un sistema mecánico simulado con una respuesta similar a la de un turismo. El movimiento de suspensión simulado se acumula y se divide por la distancia recorrida para obtener un índice con unidades de pendiente (m/km, in/mi, etc.). La forma de reducción de datos emula un medidor de carretera perfecto.

La investigación del NCHRP condujo a un conjunto específico de parámetros para un sistema de respuesta computarizado de un cuarto de automóvil, llamado *The Golden Car*. El nombre pretendía transmitir que esta representación por computadora era una referencia de calibración, como una barra de oro de 1,0000 m guardada en una bóveda y sacada de vez en cuando para calibrar otras medidas de longitud.

El IRI es esencialmente un "sistema de tipo respuesta virtual" basado en computadora. Se dedicaron varios años de investigación reportados en el Informe 228 del NCHRP para desarrollar un índice de perfil que se basó en los 50 años de experiencia acumulada por los Estados y otros utilizando índices de rugosidad "in/mi".

- **El Banco Mundial continuó con el desarrollo y las pruebas del IRI.**

El Banco Mundial patrocinó varios programas de investigación a gran escala en la década de 1970 que investigaron algunas opciones básicas que enfrentan los países en desarrollo: ¿deberían los gobiernos pedir dinero prestado para construir carreteras buenas y costosas, o deberían ahorrar dinero con carreteras malas y baratas? Resulta que las carreteras en mal estado también son costosas para el país en su conjunto, debido a costos para el usuario, como daños a los vehículos. La rugosidad de la carretera se identificó como un factor principal en los análisis y compensaciones entre la calidad de la carretera y el costo para el usuario. El problema era que no se podían comparar los datos de rugosidad de diferentes partes del mundo. Incluso los datos del mismo país eran sospechosos porque las medidas se basaban en hardware y métodos que no eran estables en el tiempo.

En 1982, el Banco Mundial inició un experimento de correlación en Brasil para establecer una correlación y un estándar de calibración para las mediciones de rugosidad. Al procesar los datos, quedó claro que casi todos los instrumentos de medición de rugosidad utilizados en todo el mundo eran capaces de producir medidas en la misma escala, si esa escala se seleccionaba adecuadamente. Se probaron varios métodos y se encontró que la referencia de calibración "in/mi" del Informe 228 del NCHRP era la más adecuada para definir una escala universal.

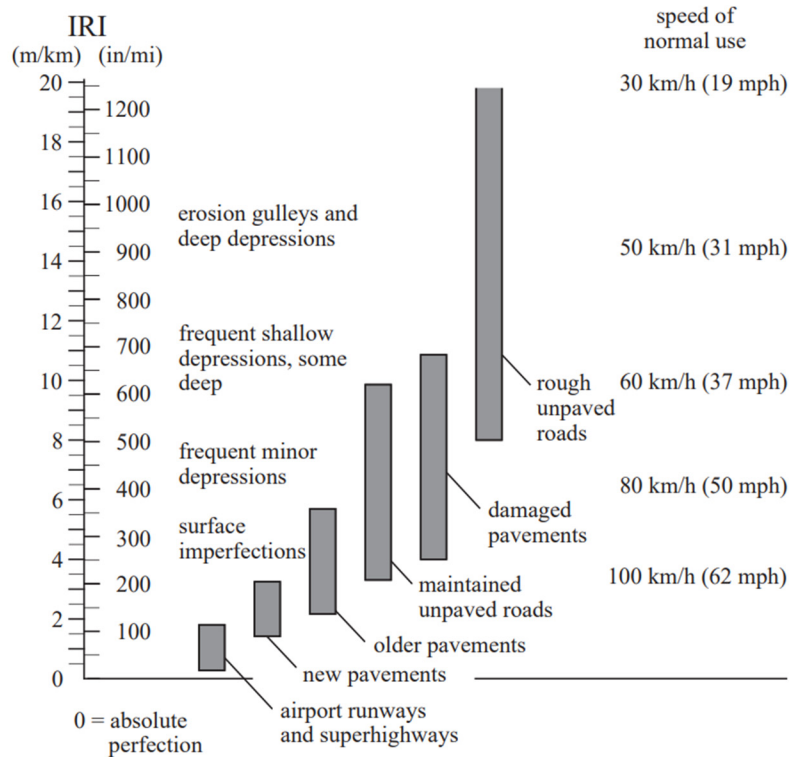
Se dedicaron varios años de desarrollo adicional a probar métodos de cálculo para una variedad de métodos de creación de perfiles y tamaños de paso. Se publicaron ejemplos de algoritmos informáticos y se escribieron, revisaron y publicaron directrices para definir una medida de referencia que se denominó Índice Internacional de Rugosidad (IRI). Las directrices publicadas por el Banco explicaban cómo medir el IRI con una variedad de equipos.

- **El IRI es reproducible, portátil y estable en el tiempo.**

El IRI fue el primer índice de perfiles ampliamente utilizado cuyo método de análisis pretende funcionar con diferentes tipos de perfilómetros. El IRI se define como una propiedad del perfil verdadero y, por lo tanto, se puede medir con cualquier perfilómetro válido. Las ecuaciones de análisis se desarrollaron y probaron para minimizar los efectos de algunos parámetros de medición del perfilómetro, como el intervalo de muestra.

- **El IRI es un indicador general del estado del pavimento.**

El IRI resume las cualidades de rugosidad que impactan la respuesta del vehículo y es más apropiado cuando se desea una medida de rugosidad relacionada con: costo operativo general del vehículo, calidad general de conducción, cargas dinámicas en las ruedas (es decir, daños a la carretera por camiones pesados y frenado), y límites de seguridad en curvas disponibles para turistas y el estado general de la superficie. La siguiente figura muestra los rangos de IRI representados por diferentes clases de carreteras.



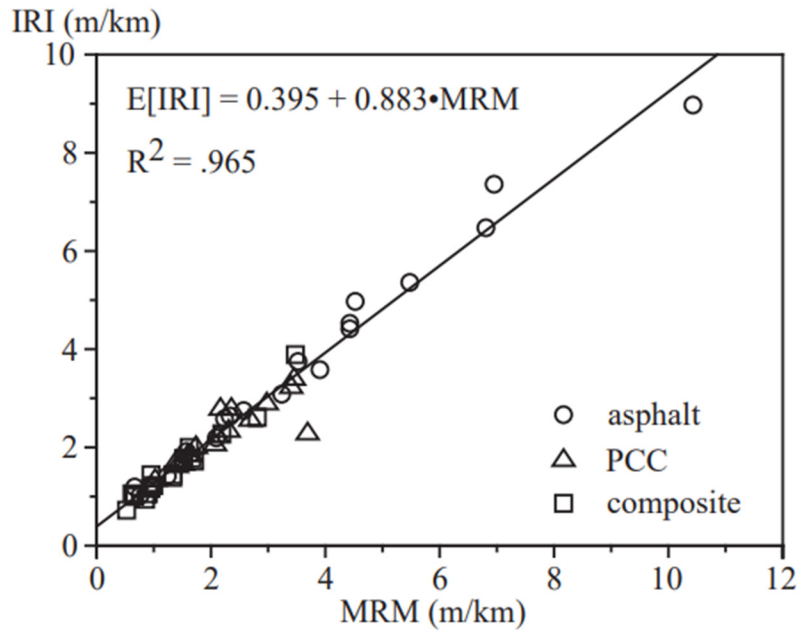
Propiedades del análisis IRI

El modelo de un cuarto de automóvil utilizado en el algoritmo IRI es exactamente lo que su nombre implica: un modelo de una esquina (un cuarto) de un automóvil. El modelo se muestra esquemáticamente en una figura anterior: incluye un neumático, representado con un resorte vertical, la masa del eje soportado por el neumático, un resorte de suspensión y un amortiguador, y la masa de la carrocería soportada por la suspensión para ese neumático.

- **El modelo de un cuarto de automóvil se ajustó para maximizar la correlación con Sistemas de medición de rugosidad de carreteras de tipo respuesta.**

Esta simulación de un cuarto de automóvil pretende ser una representación teórica de los sistemas de tipo respuesta en uso en el momento en que se desarrolló el IRI, con las propiedades del vehículo del "automóvil dorado" ajustadas para obtener la máxima correlación con la salida de esos sistemas. Las consideraciones en su diseño se describen en el Informe 228 del NCHRP.

Los parámetros del automóvil dorado le dan al cuarto de automóvil un comportamiento típico de la mayoría de los vehículos de carretera con una excepción: la amortiguación es mayor que la de la mayoría de los automóviles. Esto evita que el IRI se "sintonice" con ciertas longitudes de onda y degrade la correlación con otros vehículos. La siguiente figura muestra cómo los valores de IRI de los datos del perfil se relacionan con las medidas sin procesar de un sistema de tipo respuesta.



- **El IRI describe la rugosidad del perfil que provoca vibraciones en el vehículo.**

La respuesta del IRI a las sinusoides es intencionalmente muy similar a las respuestas físicas medidas de los vehículos de carretera. Se desarrolló principalmente para igualar las respuestas de los turismos, pero investigaciones posteriores han demostrado una buena correlación con los camiones ligeros y pesados. El IRI ha sido reconocido como un índice de rugosidad de propósito general que está fuertemente correlacionado con la mayoría de los tipos de respuesta de vehículos que son de interés. Específicamente, el IRI está muy correlacionado con tres variables de respuesta del vehículo que son de interés:

1. respuesta del medidor de carreteras (para continuidad histórica),
2. aceleración vertical del pasajero (para calidad de conducción), y
3. carga de neumáticos (para control y seguridad del vehículo).

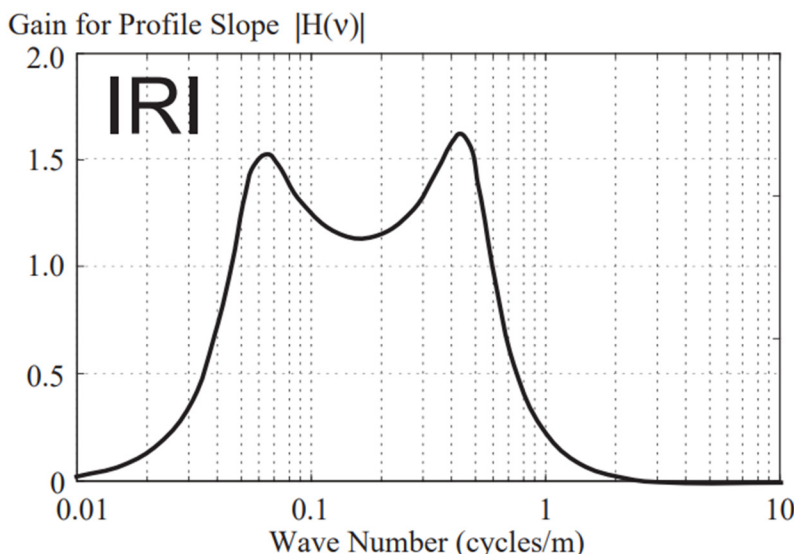
El IRI no está relacionado con todas las variables de respuesta del vehículo. Por ejemplo, no se correlaciona bien con la posición vertical del pasajero, o la aceleración de los ejes.

El hecho de que el IRI se correlacione bien tanto con la respuesta de los medidores de carretera como con la aceleración de los pasajeros no es una coincidencia; La correlación entre la respuesta del medidor de carretera y la aceleración de los pasajeros fue ciertamente un factor en las décadas de aceptación del medidor de carretera como una herramienta útil para medir la rugosidad.

- **El IRI está influenciado por longitudes de onda que oscilan entre 1,2 y 30 metros.**

La respuesta del número de onda del filtro IRI de un cuarto de vagón se muestra en la siguiente figura. La amplitud de la sinusoide de salida es la amplitud de la entrada, multiplicada por la ganancia que se muestra en la figura. La ganancia que se muestra en la figura no tiene dimensiones. Por lo tanto, si la

entrada es una senoide con una amplitud pendiente, la salida es el producto de la amplitud de entrada y el valor tomado del gráfico.



El filtro IRI tiene una sensibilidad máxima a las sinusoides inclinadas con números de onda cercanos a 0,065 ciclos/m (una longitud de onda de aproximadamente 15 m) y 0,42 ciclos/m (una longitud de onda de aproximadamente 2,4 m). La respuesta se reduce a 0,5 para 0,033 y 0,8 ciclos/m. Números de onda m que corresponden a longitudes de onda de 30 m, aproximadamente 1,25 m, respectivamente. Sin embargo, todavía hay cierta respuesta para longitudes de onda fuera de este rango.

- **La escala IRI es linealmente proporcional a la rugosidad.**

Si todos los valores de elevación en un perfil medido aumentan en algún porcentaje, entonces el IRI aumenta exactamente en el mismo porcentaje. Un IRI de 0,0 significa que el perfil es perfectamente plano. No existe un límite superior teórico para la rugosidad, aunque los pavimentos con valores de IRI superiores a 8 m/km son casi intransitables excepto a velocidades reducidas.

- **El IRI fue el primer índice de rugosidad altamente portátil y estable en el tiempo.**

El IRI no es el primer índice de rugosidad basado en perfiles. Cuando se introdujo, se utilizaron perfilómetros de diferentes países y diferentes fabricantes con análisis de perfiles desarrollados para su hardware específico. La mayoría de los análisis no estaban destinados a trabajar con el perfil real. Aquellos que lo hicieron tenían requisitos específicos para el intervalo entre medidas de elevación, y dio errores significativos cuando se aplicó a perfiles que tenían un intervalo diferente.

El software publicado por el Banco Mundial fue probado por nuevos usuarios, quienes descubrieron que, bajo pruebas de investigación controladas, podían obtener valores IRI casi idénticos usando diferentes perfilómetros.

Definición del IRI

Las descripciones anteriores de los antecedentes y las propiedades del IRI pretenden dar una idea de lo que el software informático IRI pretende simular y cómo se puede interpretar la escala del IRI. Sin embargo, el IRI se define rigurosamente como una transformación matemática específica de un perfil verdadero. Los pasos específicos que se siguen en el programa informático para calcular el IRI se enumeran a continuación.

- **El IRI se calcula para un único perfil.**

Si su generador de perfiles mide varios perfiles simultáneamente, podrá obtener el IRI para cada uno. El estándar IRI no especifica cómo ubicar la línea en una carretera que define el perfil. Cualquier línea posible en el terreno tiene una estadística IRI asociada.

La norma no especifica cómo se combinan los valores IRI para diferentes perfiles tomados para la misma carretera. Se pueden promediar, pero el resultado no es el IRI, sino el promedio de varios IRI.

- **El perfil se filtra con una media móvil de 250 mm (9.85 pulg) de longitud de la base.**

La media móvil es un filtro de paso bajo que suaviza el perfil. El programa informático no aplica el filtro a menos que el intervalo del perfil sea inferior a 167 mm (6,6 pulgadas).

- **El filtro de media móvil de 250 mm debe omitirse para perfiles obtenidos con algunos sistemas.**

Este paso debe omitirse si (1) el perfil ya ha sido filtrado por una media móvil o con un filtro anti-aliasing que atenúa longitudes de onda inferiores a 0,5 m, y (2) el intervalo de muestra es inferior a 167 mm (6,6 pulgadas). Por ejemplo, los perfilómetros de KJ Law detectan valores de elevación a intervalos de 25 mm, aplican un filtro de media móvil de 300 mm y almacenan el resultado a intervalos de 150 mm. El filtro utilizado antes de almacenar el perfil es idéntico al utilizado en el IRI (para un intervalo de muestra de 150 mm) y, por lo tanto, la media móvil en el IRI no debe aplicarse una segunda vez.

- **El perfil se filtra aún más con una simulación de un cuarto de coche.**

Los parámetros del cuarto de automóvil se especifican como parte de la estadística IRI y la velocidad de viaje simulada se especifica en 80 km/h (49,7 mi/h). Los parámetros del Golden Car son:

$$\frac{k_s}{m_s} = 63.3 \quad \frac{k_t}{m_s} = 653 \quad \frac{c}{m_s} = 6 \quad \frac{m_u}{m_s} = 0.15$$

donde k_s es la tasa de resorte, m_s es la masa suspendida, k_t es la carrera del resorte del neumático, c es la tasa de amortiguación y m_u es la masa no suspendida.

La salida del filtro representa el movimiento de suspensión del cuarto de coche simulado.

- **El perfil filtrado se acumula sumando valores absolutos y luego se divide por la longitud del perfil.**

La estadística IRI resultante tiene unidades de pendiente. Como usuario, puedes expresar la pendiente en cualquier unidad apropiada. Las opciones más comunes son in/mi (multiplicar la pendiente por 63,360) y m/km (multiplicar la pendiente por 1000).

- **Los detalles del IRI se manejan en software de computadora.**

El resumen anterior ilustra cómo el IRI se ajusta a la descripción anterior de un índice de perfil genérico. El análisis se aplica a un solo perfil, el perfil se filtra (dos veces), el resultado filtrado se acumula y finalmente se divide por la longitud del perfil. El IRI está relacionado linealmente con las variaciones de perfil, en el sentido de que, si se duplican todos los valores de elevación del perfil, el IRI resultante también se duplicará.

Una referencia para más información sobre el método de cálculo del IRI es:

MW Sayers, "Sobre el cálculo del índice de rugosidad internacional a partir del perfil de la carretera longitudinal", Registro de investigación de transporte 1501, (1995) págs. 1-12.

- **Software gratuito disponible para calcular el IRI.**

El código fuente de Fortran está disponible en Internet para que lo utilicen los desarrolladores. El análisis también se incluye en un paquete gratuito de Windows llamado RoadRuf. El software RoadRuf y el código fuente de ejemplo se pueden encontrar en:

<http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/rr.html>

¿Qué son las calificaciones de panel (Panel Ratings)?

En 1960, F.N. Hveem señaló: "Desde que se construyeron carreteras y autopistas, las personas que las utilizan han sido muy conscientes del grado relativo de comodidad o incomodidad que se experimenta al viajar". Mucho antes de que existiera la tecnología de perfilado de alta velocidad, los ingenieros intentaron estimar la opinión general del público viajero sobre carreteras específicas.

Quizás el método más directo sea conducir a la gente por tramos de carretera y preguntarles qué piensan.

- **Las calificaciones del panel son subjetivas.**

Las calificaciones de las personas reflejan sus opiniones y son subjetivas. Además de reflejar el estado de la carretera, la calificación de una persona está influenciada por sus estándares, creencias y estado de ánimo en el momento de dar la opinión. Por el contrario, las medidas obtenidas del análisis de los datos del perfil se consideran objetivas.

- Las escalas de calificación subjetiva de las carreteras suelen ir de 0 a 5.

La siguiente figura muestra un formulario de calificación en el que una persona califica una carretera en una escala de 0 a 5. La escala de 0 a 5 se utilizó para una prueba de carretera a gran escala realizada por AASHO en la década de 1950, en la que las carreteras fueron sometidas a pruebas mixtas. El tráfico y los investigadores rastrearon el estado del pavimento. Un panel de expertos en pavimentos realizó sus mejores evaluaciones de las condiciones de los pavimentos de prueba basándose en una inspección minuciosa, la experiencia de conducir sobre ellos y el uso de medidas tomadas con varios instrumentos en uso en ese momento.

Las calificaciones de la prueba AASHO original se denominaron PSR.

Acceptable ?

Yes ☐

No ☐

Undecided ☐

5 — Very Good

4 — Good

3 — Fair

2 — Poor

1 — Very Poor

0 — Rating

Section Identification _____

Rater _____ Date _____ Time _____ Vehicle _____

Las calificaciones del panel de expertos fueron procesadas para asignar a cada pavimento un único número que representaba su capacidad de servicio, definido como:

"... la capacidad de una sección específica de pavimento para atender tráfico mixto (de camiones y automóviles) de alta velocidad y gran volumen en su condición actual".

El número de resumen se denominó calificación de capacidad de servicio actual (Present Serviceability Rating, PSR). Los investigadores también pidieron a personas que no eran ingenieros que calificaran los pavimentos. Se obtuvieron casi los mismos resultados.

El significado actual de PSR no es estándar. Algunos ingenieros consideran que la PSR es una medida única que se aplicó sólo para las pruebas realizadas en la década de 1950. Dado que las cifras se basaron en la opinión humana de la época, no hay manera de confirmar o negar la relación de las calificaciones tomadas hoy con la escala PSR original. Con este concepto ya no se puede utilizar la báscula.

Otros ingenieros utilizan el nombre PSR para referirse cualquier estudio en el que se toman calificaciones para carreteras en una escala de 0 a 5.

- **Las predicciones de PSR se denominaron PSI.**

Además de las clasificaciones obtenidas del panel de evaluadores en las pruebas originales de AASHO, se tomaron varias medidas de los pavimentos con instrumentos en uso en ese momento. Utilizando las medidas del instrumento, el PSR podría estimarse mediante una ecuación obtenida a partir de análisis estadísticos de los datos. La estimación de la calificación de servicio actual (PSR) se denominó índice de servicio actual (PSI).

- **El procesamiento estadístico se utiliza para calcular la calificación media del panel (MPR).**

Investigaciones anteriores han demostrado que las opiniones de una sola persona tienden a ser poco confiables, en relación con medidas objetivas, y también en relación con las opiniones de otras personas. Sin embargo, cuando se toma en conjunto un grupo de calificaciones, la calificación promedio puede ser bastante consistente. Después del procesamiento estadístico, los resultados se procesan para generar una calificación única para el panel en su conjunto, generalmente denominada calificación media del panel (MPR). En la mayoría de los estudios, las calificaciones se modifican antes de promediarlas. Por tanto, la TPM no es necesariamente el valor medio de las calificaciones originales de los miembros del panel.

Esto lo vemos todos los días, en la naturaleza de las encuestas de opinión donde un pequeño grupo de Las personas son encuestadas para indicar las opiniones de una mayor parte de la población.

Los experimentos de calificación de panel están diseñados con la intención de estimar la opinión del "público" del pequeño grupo que compone el panel. El tamaño típico de un panel es de aproximadamente 30 personas, pero se pueden obtener resultados razonables con grupos más pequeños. En el período transcurrido desde que se llevó a cabo la prueba práctica de AASHO, el concepto de calificación del panel ha evolucionado considerablemente. Se han identificado distorsiones estadísticas en la escala de calificación como tendencia central, error de lenidad y otras. Se han establecido métodos de análisis estadístico para minimizar sus efectos.

- **Las calificaciones subjetivas dependen de preguntas e instrucciones.**

Las calificaciones subjetivas del panel dependen en gran medida de las instrucciones dadas a los miembros del panel para definir qué propiedad física o calidad se está juzgando. Las instrucciones deben "entrenar" al evaluador. Sin embargo, en un programa de investigación, las propiedades físicas no se conocen completamente; ese puede ser el objetivo de la investigación. La NCHRP patrocinó dos proyectos de investigación en la década de 1980 para desarrollar una metodología para obtener calificaciones válidas, lo que dio como resultado el concepto de número de recorrido que se describe en la siguiente sección.

Sin embargo, incluso hoy en día, los procedimientos no son estándar para obtener calificaciones de panel.

- **Las clasificaciones medias del panel no son prácticas para uso en red.**

Existen dos problemas al utilizar datos MPR directamente para evaluar el estado de una red de carreteras:

1. La escala de calificación no es una medida del estado de la carretera que sea estable en el tiempo. Por ejemplo, las carreteras que un panel considera "buenas" hoy podrían ser consideradas de otra manera dentro de 50 años.

2. Es costoso obtener habilitaciones de paneles debido a la cantidad de personas requeridas y la necesidad de transportarlas a las carreteras que se califican.

¿Qué es el número de rodado (Ride Number)?

Durante décadas, los ingenieros de carreteras han estado interesados en estimar la opinión del público viajero sobre la rugosidad de las carreteras. La escala PSI del AASHO Road Test ha sido de interés para los ingenieros desde su introducción en la década de 1950. El número de recorrido es un índice de perfil destinado a indicar la capacidad de conducción en una escala similar a la PSI.

Antecedentes

La recopilación directa de opiniones subjetivas en forma de calificación media del panel es demasiado cara y no proporciona continuidad de un año a otro.

- **Ride Number es el resultado de la investigación del NCHRP en la década de 1980.**

El Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras (NCHRP) patrocinó dos proyectos de investigación realizados por el Dr. Michael Janoff en la década de 1980 que investigaron el efecto de la rugosidad de la superficie de la carretera en el confort de marcha, como se describe en los informes NCHRP 275 y 308. El objetivo de esa investigación fue determinar cómo las características de los perfiles de las carreteras se vinculaban con la opinión subjetiva sobre la carretera por parte del público. Durante dos estudios, espaciados en un intervalo de aproximadamente 5 años, se determinaron experimentalmente las calificaciones medias del panel (MPR) en una escala de 0 a 5 para sitios de prueba en varios estados. Se obtuvieron perfiles longitudinales para las huellas de las ruedas izquierdas y derechas de los carriles calificados.

En el momento en que se realizaron los estudios del NCHRP, el IRI no era muy conocido. Sin embargo, los investigadores realizaron un análisis de un cuarto de automóvil casi idéntico al IRI y encontraron una correlación significativamente menor entre el índice de un cuarto de automóvil y la calificación del panel que entre un índice de perfil basado en longitudes de onda cortas. (Estudios posteriores han demostrado que se obtiene una mayor correlación con IRI si se realiza una transformación no lineal adecuada).

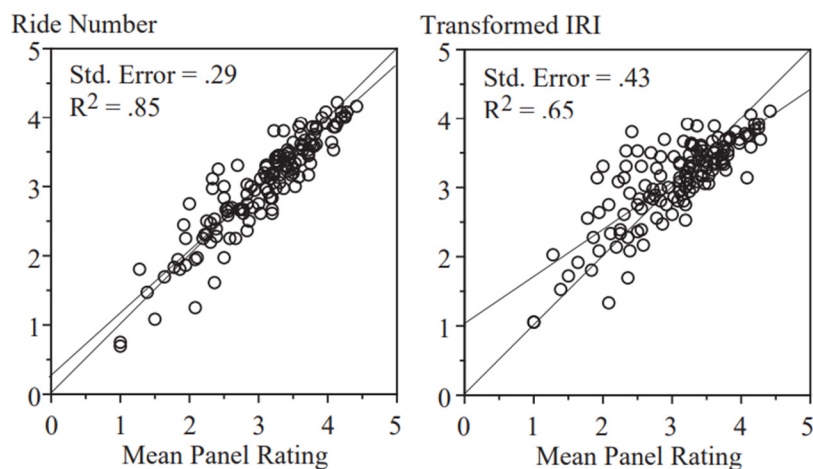
Se desarrollaron análisis basados en perfiles para predecir la MPR. Se desarrolló un método en el que se calcularon funciones PSD para dos perfiles longitudinales y se redujeron para proporcionar una estadística resumida llamada PI (índice de perfil). Luego, los valores de PI para los dos perfiles se combinaron en una transformación no lineal para obtener una estimación de MPR.

- **El número de rodado (RN) es una estimación de la calificación media del panel.**

El procedimiento matemático desarrollado para calcular RN se describe en el Informe 275 del NCHRP, pero no con todo detalle. El software para calcular RN con el método PSD nunca se desarrolló para uso general.

En 1995, algunos de los datos de los dos proyectos del NCHRP y un estudio de panel realizado en Minnesota fueron analizados nuevamente en un estudio iniciado por la Administración Federal de Carreteras. El objetivo fue desarrollar y probar un proceso matemático práctico para la obtención de RN. El método se proporcionaría como un software portátil similar al disponible para el IRI, pero para predecir MPR en lugar de IRI. Los datos del perfil en la investigación original se obtuvieron de varios instrumentos. La mayoría se midieron con un perfilómetro KJ Law propiedad del Departamento de Transporte de Ohio y se cree que son precisos. Algunos otros sitios de prueba fueron perfilados con instrumentos cuya validez ha sido cuestionada. Los nuevos análisis se limitaron a 140 sitios de prueba que habían sido perfilados con el sistema de Ohio.

Se desarrolló un nuevo método de análisis de perfiles que es portátil. El software se probó en perfiles obtenidos de diferentes sistemas en los mismos sitios y se obtuvieron valores similares de RN. Predice MPR ligeramente mejor que los algoritmos publicados anteriormente. La siguiente figura muestra la correlación para el nuevo RN. A modo de comparación, la figura muestra una correlación que implica una transformada de IRI.



Correlación entre el RN (Ride Number) y el MPR.

Propiedades del análisis del número de viajes

El nuevo método de análisis del número de viajes comparte características con el IRI. Utiliza el mismo método de filtrado, que se ha demostrado que funciona con intervalos de muestra que van desde cero hasta aproximadamente un pie.

- **El número de viaje utiliza la escala de 0 a 5 del PSI.**

Se utilizó la escala de 0 a 5 para la capacidad de servicio actual porque es muy familiar para la comunidad de carreteras. Sin embargo, los métodos utilizados en la investigación del NCHRP no fueron los mismos que los utilizados en las pruebas más antiguas. (Los métodos más nuevos se basan en una mejor comprensión de la escala psicológica que la que existía cuando se realizaron las primeras pruebas).

- El número de rodado, Ride Number, es una transformación no lineal de una estadística llamada PI.

Siguiendo la convención de nomenclatura de Janoff y otros, el índice de perfil utilizado en el análisis del número de viajes se denomina PI, que significa "índice de perfil". Al igual que otros índices de perfiles, PI generalmente oscila entre 0 (un perfil perfectamente liso) y valores positivos proporcionales a un tipo de rugosidad. PI se transforma a una escala que va de 5 (perfectamente liso) a 0 (la máxima rugosidad posible). Los datos experimentales validan la escala para valores de 1 a 4,5.

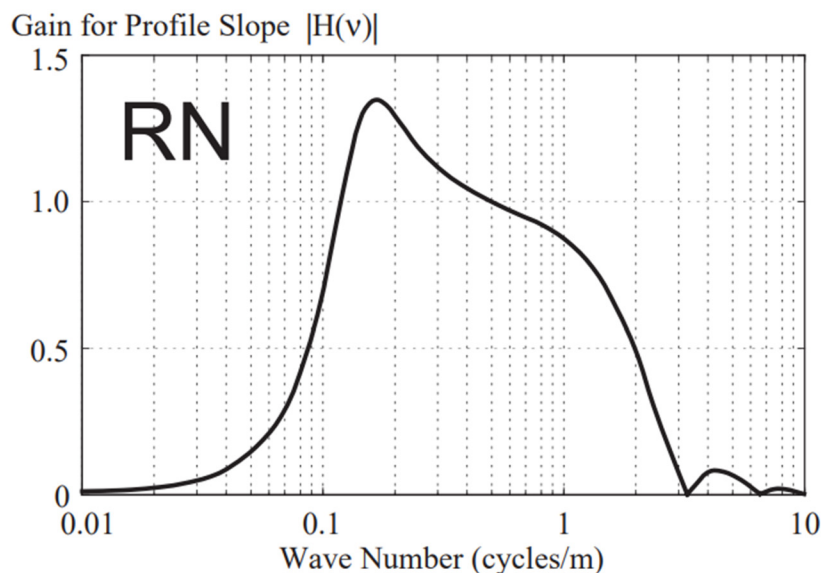
La elección de la escala crea una relación altamente no lineal entre las variaciones del perfil y el RN. Si el RN es conocido para un perfil y todos los valores de elevación se duplican para aumentar la rugosidad en un factor de 2, el RN disminuirá. Sin embargo, la cantidad que disminuye RN no se puede determinar de manera sencilla.

- La no linealidad limita algunas aplicaciones del Ride Number.

La no linealidad no plantea ningún problema para la recopilación de información de rugosidad para describir el estado de una red de carreteras. Para la rugosidad recopilada por milla (o cualquier longitud estándar), los índices de perfil se convierten a la escala de 0 a 5 y se ingresan en la base de datos.

Algunas capacidades avanzadas del IRI, como los perfiles de rugosidad que se mostrarán más adelante, son difíciles de aplicar. El problema es que los valores RN para secciones adyacentes del perfil no se pueden promediar de la misma manera que el IRI. Por ejemplo, si una milla tiene un valor RN de 3 y la siguiente tiene un RN de 4, el RN para el segmento de dos millas no es 3,5. (Son alrededor de las 3.37.)

- PI y RN son sensibles a longitudes de onda más cortas que el IRI.



La figura anterior muestra la sensibilidad de PI. Como en la sección anterior sobre IRI, esto muestra la respuesta del índice de perfil para una pendiente senoide. Si se le da una senoide como entrada, el filtro PI produce una senoide como salida. La amplitud de la senoide de salida es la amplitud de la

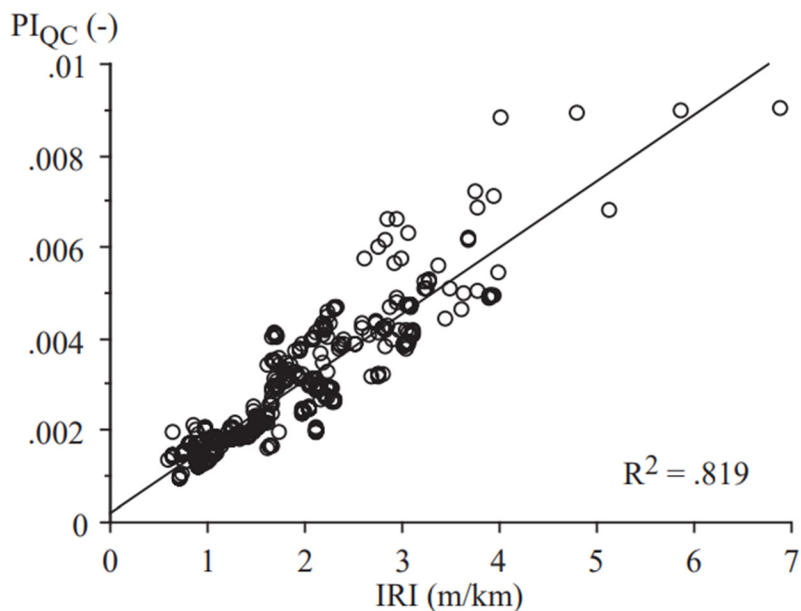
entrada, multiplicada por la ganancia que se muestra. La máxima sensibilidad es para un número de onda de 0,164 ciclos/m (0,05 ciclos/pie), que es una longitud de onda de aproximadamente 6 metros (20 pies). Recordemos que el IRI tenía una gran sensibilidad a las sinusoides con una longitud de onda de 16 metros (número de onda de 0,065 ciclos/m). La figura muestra que el análisis del número de recorridos tiene una sensibilidad baja para esa longitud de onda y una sensibilidad aún menor para longitudes de onda más largas.

- **Los perfilómetros ultrasónicos no son válidos para obtener el número de viaje.**

Ride Number es portátil, pero no tanto como el IRI. Aunque todavía no tenemos la misma experiencia con RN que con IRI, las investigaciones hasta la fecha muestran que la mayoría de los perfiles obtenidos con sistemas ultrasónicos dan resultados incorrectos. Los valores de PI son demasiado altos, lo que lleva a valores de RN demasiado bajos.

- **El Ride Number está correlacionado con el IRI, pero los dos no son intercambiables.**

El contenido de un perfil de carretera que afecta a RN es diferente al contenido que afecta a IRI. Cada uno proporciona información única sobre la aspereza del camino, aunque existe una correlación. Por ejemplo, la siguiente figura muestra la correlación entre IRI y la estadística PI utilizada para determinar RN.



Correlación entre PI (utilizado para definir RN) e IRI.

Definición de Ride Number o número de rodado

Las descripciones anteriores de los antecedentes y las propiedades de RN pretenden dar una idea de cómo interpretar la escala de RN. Tal como se implementa en el nuevo software, RN se define rigurosamente como una transformación matemática específica de un perfil real. Los pasos específicos que se siguen en el programa informático para calcular RN se enumeran a continuación.

- **El Ride Number se calcula a partir de uno o dos perfiles.**

El número de recorrido se calcula idealmente a partir de los perfiles en las trayectorias izquierda y derecha de los automóviles. Cada perfil se procesa de forma independiente y los resultados se combinan en el último paso. El RN también se puede calcular para un único perfil si solo hay uno disponible.

- **El perfil se filtra con una media móvil de 250 mm (9,85 in) longitud de la base.**

La media móvil es un filtro de paso bajo que suaviza el perfil. El programa informático no aplica el filtro a menos que el intervalo del perfil sea inferior a 167 mm (6,6 pulgadas).

- **El filtro de media móvil de 250 mm debe omitirse para perfiles obtenidos con algunos sistemas.**

Este paso debe omitirse si (1) el perfil ya ha sido filtrado por una media móvil o con un filtro anti-aliasing que atenúa longitudes de onda inferiores a 0,5 m, y (2) el intervalo de muestra es inferior a 167 mm (6,6 pulgadas}. Por ejemplo, los perfilómetros de KJ Law detectan valores de elevación a intervalos de 25 mm, aplican un filtro de media móvil de 300 mm y almacenan el resultado a intervalos de 150 mm. El filtro utilizado antes de almacenar el perfil es idéntico al utilizado en RN (para un intervalo de muestra de 150 mm) y, por lo tanto, la media móvil en RN no debe aplicarse una segunda vez.

- **El perfil se filtra adicionalmente con un filtro de paso de banda.**

El filtro utiliza las mismas ecuaciones que el modelo de un cuarto de automóvil en el IRI. Sin embargo, se utilizan diferentes coeficientes para obtener la sensibilidad al número de onda que se muestra en la última figura. Los parámetros de un cuarto de vagón para el filtro RN son:

$$\frac{k_s}{m_s} = 390 \quad \frac{k_t}{m_s} = 5120 \quad \frac{c}{m_s} = 17 \quad \frac{m_u}{m_s} = 0.036$$

- **El perfil filtrado se reduce para dar PI.**

El perfil filtrado se reduce para producir un valor cuadrático medio (RMS) llamado PI, que debe tener unidades de pendiente adimensional (pies/pies, m/m, etc.}.

- **PI se transforma en RN.**

RN se define como una transformada exponencial de PI según la ecuación:

$$RN = 5e^{-160(PI)}$$

Si se está procesando un solo perfil, su PI se transforma directamente. Si se procesan dos perfiles para las huellas de las ruedas izquierda y derecha, los valores de los dos se promedian con la siguiente ecuación y luego se aplica la transformación.

$$PI = \sqrt{\frac{PI_L^2 + PI_R^2}{2}}$$

- **Los detalles del número de viaje se manejan en un software de computadora.**

El resumen anterior ilustra cómo el RN se ajusta a la descripción anterior de un índice de perfil genérico. El análisis se aplica a dos perfiles. el perfil se filtra (dos veces). el resultado filtrado se acumula y se proyecta en la conocida escala PSI.

Una referencia para obtener más información sobre RN es:

Sayers. MW y Karamihas. SM. "Estimación de la transitabilidad mediante el análisis del perfil longitudinal de la carretera". Registro de investigación de transporte 1536, (1996) págs. 110-116.

Todo el desarrollo se describe en:

Sayers, MW y Karamihas, SM, "Interpretación de datos del perfil de rugosidad de la carretera". Informe de la Administración Federal de Carreteras FHWA RD-96-101.

- **Software gratuito disponible para calcular RN.**

El código fuente de Fortran está disponible en Internet para que lo utilicen los desarrolladores. El análisis también se incluye en un paquete gratuito de Windows llamado RoadRuf. El software RoadRuf y el código fuente de ejemplo se pueden encontrar en:

<http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/rr.html>

¿Qué otros índices de rugosidad se utilizan?

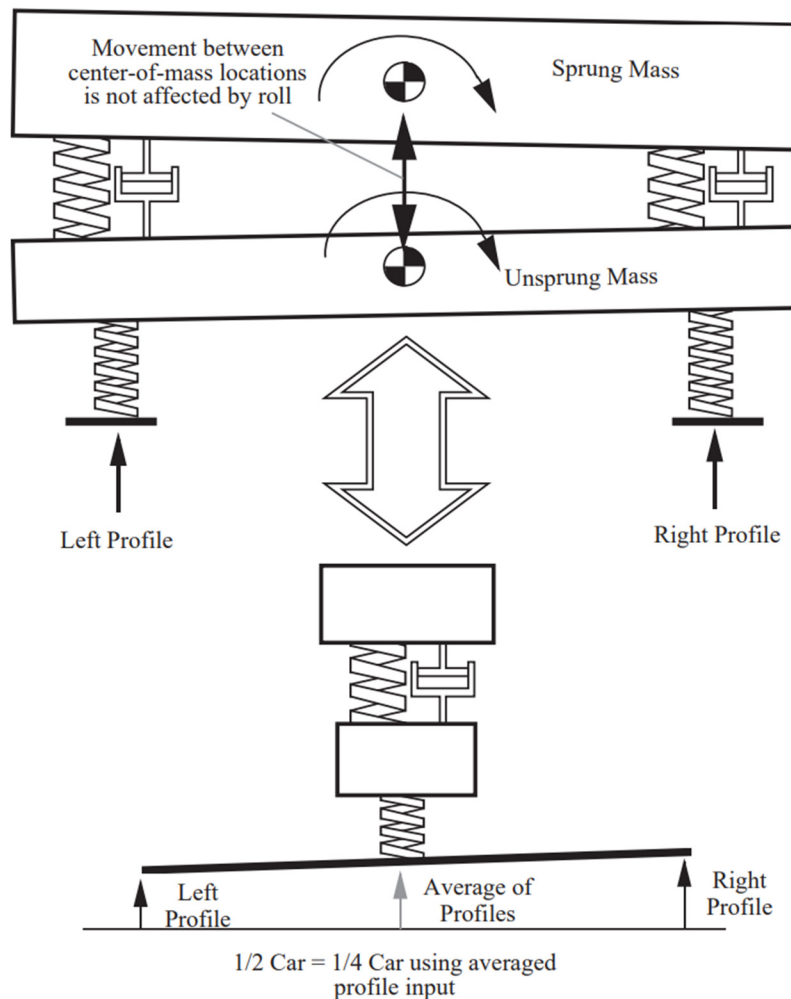
En este pequeño libro sólo se describen en detalle algunos análisis de perfiles: media móvil, PSD, IRI y RN. Sin embargo, como se señaló anteriormente. existe un número ilimitado de análisis que potencialmente pueden aplicarse. La mayoría de los análisis que se han probado en el pasado no han recibido una amplia aceptación por una de dos razones:

1. No están ampliamente disponibles en forma de software que funcione con perfiles obtenidos con equipos de diferentes fabricantes.
2. Se correlacionan tan altamente con el IRI que hay pocas razones para utilizarlos si ya se está calculando el IRI.

- **El índice de rugosidad del medio vehículo (HRI) es el algoritmo IRI aplicado al promedio de dos perfiles.**

Antes del desarrollo del IRI. se utilizaba la simulación de vehículos con perfiles medidos para calibrar sistemas de tipo respuesta. La respuesta de un modelo de medio auto se puede obtener con las mismas ecuaciones que se usan para el cuarto de auto. El truco consiste en tomar primero un promedio punto por punto de los dos perfiles (uno de la vía izquierda y otro de la vía derecha) y luego procesar el perfil promediado con un filtro de un cuarto de vagón, como se muestra en la siguiente figura.

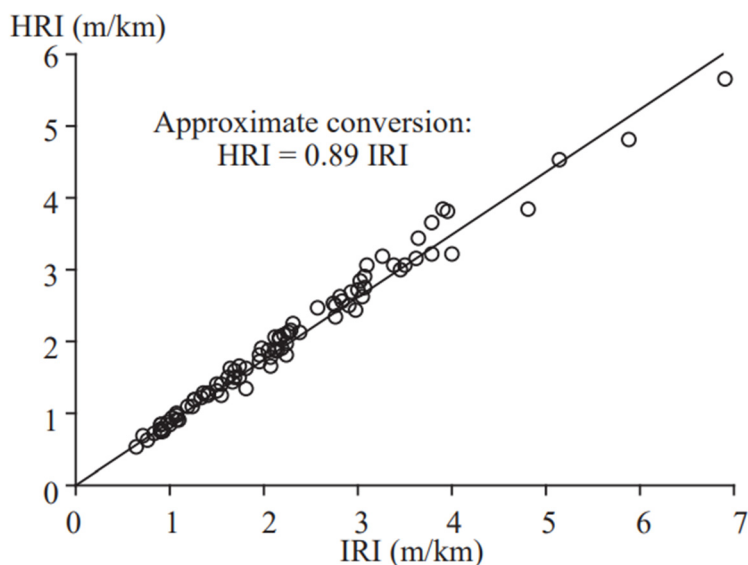
La ventaja del análisis de medio coche es que se asemeja más a la manera en que los contadores de resaltos se instalan en los vehículos. Hay una sutil diferencia en la forma en que el vehículo responde.



Considere una entrada sinusoidal. Si ambos lados reciben la misma senoide, en fase, luego todo el vehículo rebota en respuesta. No rueda en absoluto. Sin embargo, si ellos están desfasados, de modo que el lado izquierdo sube cuando el lado derecho baja, el vehículo rota pero no rebota. Con el medidor de carretera instalado en el centro del eje, se siente el rebote pero no el balanceo. En las carreteras reales, hay una mezcla de rebote y balanceo. La parte que rebota pasa, pero la parte que rueda, no. En consecuencia, la rugosidad calculada con un análisis HRI debe ser menor o igual al resultado obtenido del análisis IRI.

Una desventaja del análisis de medio coche es que para que funcione, los dos perfiles deben estar perfectamente sincronizados antes de promediarlos. Para los perfilómetros que miden perfiles en dos huellas de ruedas simultáneamente, las dos están sincronizadas correctamente y esto no es un problema. Sin embargo, para los perfilómetros que perfilan solo una línea, sería extremadamente difícil y consumiría mucho tiempo hacer dos pasadas (midiendo los perfiles de las huellas de las ruedas izquierda y derecha) y luego alinear los dos perfiles dentro de un pie, según sea necesario para el análisis. En la práctica, el análisis HRI sólo se puede utilizar en sistemas que perfilan dos huellas de ruedas simultáneamente.

Los datos de perfil tomados en algunos proyectos de investigación en la década de 1980 se analizaron en ambos sentidos. Los valores de HRI, calculados a partir del promedio de los perfiles izquierdo y derecho, se compararon con los valores promedio de IRI calculados por separado para los perfiles izquierdo y derecho. La correlación entre el HRI y las estadísticas promediadas del IRI fue muy alta, lo que indica que el HRI proporciona poca o ninguna información adicional.



Para obtener más información sobre las diferencias entre HRI e IRI, consulte el documento de TRB:

Sayers, MW "Dos modelos de cuarto de automóvil para definir la rugosidad de la carretera: IRI y HRI". Registro de investigación de transporte 1215, (1989) págs. 165-172.

- **El medidor de respuesta Mays (MRM) en algunos perfilómetros entrega HRI con Velocidad del vehículo simulada ajustable.**

La investigación descrita en el Informe 228 del NCHRP investigó la correlación y calibración de sistemas de tipo respuesta y describió un modelo estándar de un cuarto de automóvil llamado Golden Car. KJ Law, Inc. participó en la investigación y proporcionó mediciones de perfil sobre las cuales se probaron los análisis. El modelo desarrollado en la investigación se incluyó con el software en Perfilómetros fabricado por Law. La simulación Mays Ride Meter (MRM) era el nombre de la versión Law del modelo de medio coche. Si se configura para una velocidad simulada de 80 km/h (49,7 mi/h), la simulación MRM es la misma que el análisis HRI.

- **RMSA es una salida alternativa de un modelo de un cuarto de automóvil.**

Los ingenieros interesados en el rendimiento de los vehículos generalmente caracterizan la conducción utilizando datos que se miden en un vehículo en movimiento. La marcha se describe más fácilmente utilizando la aceleración vertical, que se puede medir con un acelerómetro. El modelo de cuarto de automóvil utilizado para los cálculos de IRI y HRI también puede proporcionar una aceleración vertical simulada como resultado. Como estadística basada en el perfil, la aceleración vertical simulada proporciona una medida de marcha estable en el tiempo. La aceleración se resume con un valor

cuadrático medio (RMS), lo que lleva al acrónimo RMSA. El análisis se llamó originalmente RMSVA, pero se cambió para evitar confusión con un índice con ese nombre recomendado por el Prof. WR Hudson y que se describe a continuación.

Estadísticamente, el RMSA se correlaciona casi perfectamente con HRI e IRI si se utiliza una velocidad de simulación estándar. Por lo tanto, proporciona poca información adicional sobre el perfil si ya se están calculando los valores de IRI.

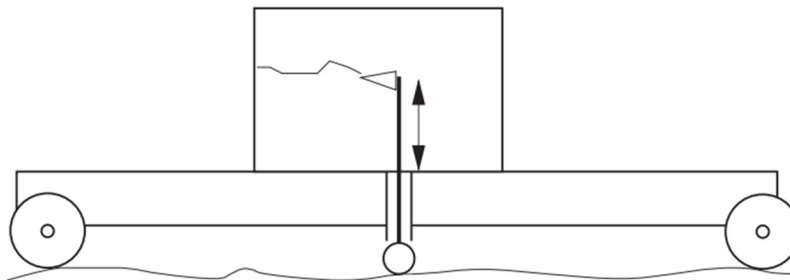
- **RMSVA es casi lo mismo que una regla rodante.**

A finales de la década de 1970, W.R. Hudson y otros probaron varios análisis de perfiles simples para utilizarlos en la calibración de sistemas de tipo respuesta y como estadísticas resumidas de rugosidad basadas en perfiles. Propusieron un filtro simple para procesar la elevación del perfil, con la forma:

$$A_i = \frac{Y_{i+2k} - 2Y_{i+k} + Y_i}{B^2}$$

donde Y_i es la i ésima elevación del perfil, k es un parámetro entero para el filtro y B es la longitud de la base ($B = k \cdot \Delta X$).

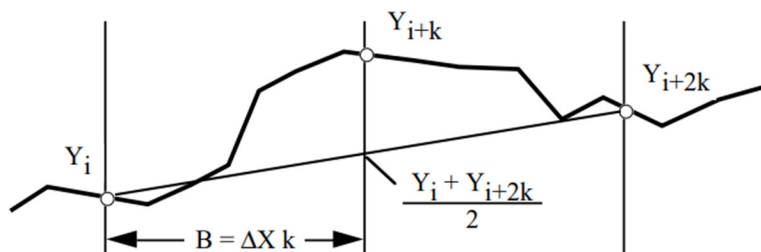
Ahora considere una regla rodante, como se muestra a continuación. Este dispositivo detecta la desviación en el centro de una regla que está apoyada en cualquiera de sus extremos.



La ecuación para la salida de una regla rodante es

$$SE_i = \frac{1}{2} (Y_i - 2 Y_{i+k} + Y_{i+2k})$$

Esto se muestra geométricamente a continuación.



Por lo tanto, RMSVA es proporcional a la salida de una regla rodante cuya distancia entre ejes total es 2B. También hay un factor de escala entre los dos:

$$A = \frac{2 SE}{B^2}$$

Hudson y otros propusieron que se calculen y combinen las estadísticas RMSVA para diferentes longitudes de base para proporcionar un índice de rugosidad como el MO. que se describe a continuación.

A pesar del nombre. RMSVA tiene poco que ver con la aceleración vertical del perfil.

Hay dos problemas técnicos con RMSVA. Una es que requiere que el intervalo de muestra se divida uniformemente entre la longitud de la base de interés para obtener el número entero k para las ecuaciones anteriores. Por ejemplo, si la longitud de la base es 4,0 pies, un intervalo de muestra de 1,14 pies da como resultado k=3,5. Establecer k en 3 o 4 cambia la longitud efectiva de la base y proporciona resultados diferentes. Estrictamente hablando, un dispositivo de creación de perfiles no es válido para el análisis RMSVA a menos que el intervalo de muestra esté configurado para dividirse uniformemente en la longitud de base especificada. Por tanto, RMSVA es un índice de perfil que no es transportable.

Un segundo problema es que los valores de RMSVA son ligeramente más bajos que los de los perfilómetros inerciales que de dispositivos estáticos, debido a los filtros anti-aliasing en los sistemas inerciales.

- **Texas MO y Brasil QI se basan en RMSVA.**

Hudson y otros propusieron un índice con el mismo propósito general que el IRI. Fue definido como:

$$MO = -20 + 23 RMSVA_4 + 58 RMSVA_{16}$$

donde los valores de RMSVA se calcularon con longitudes de base de 4 y 16 pies. El símbolo MO se refería a un vehículo específico con un Mays Ride Meter. La ecuación predijo la producción de ese dispositivo durante un período de unos pocos años a principios de los años 1980. Al ser una transformación de RMSVA, tiene los mismos límites que RMSVA.

César Queiroz y otros de Brasil propusieron un índice de rugosidad similar para calibrar sistemas de tipo respuesta. QI significaba índice de cuarto de automóvil y se desarrolló una ecuación para predecir la salida de uno de los primeros perfilómetros GMR con una simulación electrónica de un cuarto de automóvil:

$$QI = 8,54 + 6,17 RMSVA_{1,0} + 19,38 RMSVA_{2,5}$$

donde los valores de RMSVA se calcularon con longitudes de base de 1,0 m y 2,5 m.

Las investigaciones han demostrado que MO y QI se correlacionan altamente con IRI. Si IRI ya está se está calculando, entonces no hay información adicional proporcionada por MO y QI.

- **En la literatura se han descrito varios índices de número de rodado.**

Tan pronto como General Motors Research desarrolló el perfilómetro inercial, fue probado y evaluado por el Departamento de Transporte de Michigan.

Las pruebas psicológicas realizadas por el Dr. Holbrook del Departamento de Transporte de Michigan (DOT) vincularon la opinión de los usuarios con las longitudes de onda en las funciones de densidad espectral de potencia (PSD) de rugosidad a finales de los años 1960. Basado en el trabajo de Holbrook, John Darlington del Michigan DOT desarrolló un filtro electrónico para producir una estadística basada en perfiles llamada Ride Quality Index (RQI). El RQI ha sido revisado varias veces desde entonces y los detalles de su implementación actual aún no se han publicado.

Como se describió anteriormente en la sección sobre Número de viajes, el Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras (NCHRP, por sus siglas en inglés) patrocinó dos proyectos de investigación realizados por el Dr.

Michael Janoff en la década de 1980 que investigó el efecto de la rugosidad de la superficie de la carretera en la comodidad de marcha, como se describe en los informes NCHRP 275 y 308. Simultáneamente, el Departamento de Transporte de Ohio (DOT) financió una investigación realizada por Elson Spangler y William Kelly de Surface Dynamics, Inc. sobre el mismo tema. Como parte de esos programas de investigación, se obtuvieron calificaciones medias de panel (MPR) para carreteras que también fueron perfiladas. Se desarrollaron análisis basados en perfiles para predecir la MPR. Janoff describió un método en el que se calcularon funciones PSD para dos perfiles longitudinales y se redujeron para proporcionar una estadística resumida para cada perfil llamada PI (índice de perfil). Luego, los valores de PI para los dos perfiles se combinaron en una transformación no lineal para obtener el número de recorrido en una escala de 0 a 5. La transformación matemática se describe en el Informe 275 del NCHRP, pero no con todo detalle. El software para calcular RN con el método PSD no ha sido desarrollado para uso general.

Spangler y Kelly analizaron el mismo conjunto de datos y desarrollaron un análisis de perfil alternativo vinculado al MPR. Utiliza un filtro de paso alto, en lugar de PSD, para definir un índice de perfil para dos perfiles de rodadura. Los valores de PI se transforman a la escala de 0 a 5 del Ride number. Investigaciones posteriores mostraron que la ecuación predecía las calificaciones medias del panel solo para perfiles obtenidos con un intervalo de muestra de 6 pulgadas.

El análisis del número de recorrido descrito anteriormente se desarrolló después de que los dos análisis RN existentes fueran investigados y aplicados a perfiles obtenidos de una variedad de instrumentos. Los tres análisis de RN implican filtrar perfiles para obtener un índice resumido llamado PI, que luego se transforma en una escala de 0 a 5. Debido a que se utilizan diferentes transformaciones para obtener PI, los valores de PI no son compatibles para las diferentes versiones. Además, se utilizan diferentes ecuaciones de conversión para calcular RN a partir de PI. Sin embargo, el resultado general es que los valores de RN de los tres métodos son casi idénticos si los perfiles se midieron con el mismo tipo de perfilómetro utilizado en la investigación del NCHRP.

En el momento en que se editó por última vez este pequeño libro (septiembre de 1996), ninguno de los análisis del número de rodado era de uso generalizado. Sin embargo, ahora está disponible a través de Internet un software informático gratuito para realizar el análisis del número de rodado descrito en una sección anterior.

- **Índice de Serviciabilidad Actual (PSI).**

Como se describió en la discusión sobre el número de recorrido, Carey e Irick definieron el PSI y una medida del desempeño del pavimento para la prueba en carretera de AASHO. Utilizaron calificaciones de capacidad de servicio actuales (por un panel de usuarios) y análisis estadísticos para encontrar una manera

de predecir el PSI de las carreteras con una combinación de medidas objetivas del estado del pavimento, una de las cuales era una medida de rugosidad. Propusieron:

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + SV) - 1.38 RD - 0.01 J_e + P \text{ para pavimentos flexibles}$$

y

$$PSI = 5.41 - 1.78 \log(1 + SV) - 0.09 J_e + P \text{ para pavimentos rígidos,}$$

donde SV fue la varianza medía de la pendiente, RD fue la profundidad media del surco, y C y P fueron los índices de agrietamiento y parcheo, respectivamente.

Cuando Carey e Irick definieron el PSI, también sugirieron su uso como indicador de desempeño estándar para el monitoreo de la red vial. El concepto todavía se utiliza hoy en día, pero no se ha estandarizado. Agencias y consultores estatales han desarrollado de forma independiente una variedad de métodos y quizás más de cien fórmulas para calcular una versión del "Índice de capacidad de servicio". Muchos de ellos estaban vinculados directamente con el resultado de sistemas de tipo de respuesta específicos. Actualmente, varios estados calculan su propia versión del PSI que combina un índice de rugosidad del perfil con otras medidas de deterioro.

Algunos estados con perfilómetros calculan una versión del PSI utilizando ecuaciones de regresión que involucran índices de perfil como el IRI. Tenga en cuenta que, si un índice de perfil se convierte a PSI, seguirá reflejando la sensibilidad del índice original. No se proporciona información adicional. La principal razón práctica para realizar dicha transformación es hacer frente a los requisitos del software de gestión de pavimentos existente. Si el software puede actualizarse para manejar índices de perfil con diferentes unidades, entonces se debe abandonar la conversión a una pseudo estadística PSI.

Las pruebas en las que diferentes Estados midieron las mismas carreteras han demostrado diferencias en PSI por más de una unidad de PSI.

¿Cuál es el efecto de la longitud?

Para el monitoreo de la red, es suficiente determinar los niveles de rugosidad por milla (o alguna otra longitud manejable). Sin embargo, para el trabajo de diagnóstico y investigación, es útil poder señalar exactamente dónde un camino está en mal estado y dónde es suave.

- **Los índices de rugosidad se pueden calcular para varias longitudes de perfil.**

Considere la siguiente tabla que muestra los valores IRI para dos secciones de carretera que son 152 m de largo. Los valores IRI se muestran tanto para las secciones completas como también en 30 m. secciones. Por ejemplo, la rugosidad del perfil izquierdo (LElev) del Sitio 1 es 2,70 m/km en toda su longitud. Sin embargo, las cinco secciones de 30 m muestran los números IRI como mínimo como 1,35 (120-150) y tan alto como 5,66 (60-90).

Site	Start: m	End: m	IRI: (m/km) LElev. RElev.	
Site 1	.00	150.00	2.697	2.686
	.00	30.00	1.995	1.705
	30.00	60.00	1.762	1.922
	60.00	90.00	5.662	5.540
	90.00	120.00	2.762	2.938
	120.00	150.00	1.351	1.269
Site 4	.00	150.00	2.464	2.440
	.00	30.00	1.831	3.311
	30.00	60.00	3.303	3.023
	60.00	90.00	3.894	1.930
	90.00	120.00	1.492	1.426
	120.00	150.00	1.766	2.494

Ahora compare los dos sitios, mirando el perfil de la derecha (RElev). El sitio 1 tiene un rugosidad total de 2,69 m/km, y el Sitio 4 tiene un nivel comparable de 2,44 m/km.

Sin embargo, el rango de valores de rugosidad en secciones de 30 m llega a 4,27 m/km en el Sitio 1, pero sólo hasta 1,88 m/km para el sitio 4. Por lo tanto, la rugosidad es más uniforme. para el Sitio 4 que para el Sitio 1.

- **Los índices basados en perfiles se ven afectados por el lugar donde comienza y termina un perfil.**

Por ejemplo, el análisis IRI se volvió a ejecutar para el Sitio 1, comenzando los intervalos de 30 m en 20 m en lugar de 0 m . Se obtuvo la siguiente tabla.

Site	Start: m	End: m	IRI: (m/km) LElev. RElev.	
Site 1	.00	150.00	2.697	2.686
	20.00	50.00	1.596	1.747
	50.00	80.00	3.782	3.426
	80.00	110.00	4.471	4.727
	110.00	140.00	1.853	1.861
	140.00	150.00	0.974	1.178

Mire nuevamente los valores para el perfil derecho (RElev). La gran diferencia es que el mayor valor IRI para el perfil derecho es ahora 4,73 m/km, en lugar de 5,54 m/km. La rugosidad de unos 80 m dentro de la sección ahora se distribuye en dos zonas adyacentes. Tramos de 30 m, donde su influencia se diluye.

- **Un perfil de rugosidad muestra la rugosidad frente a la distancia.**

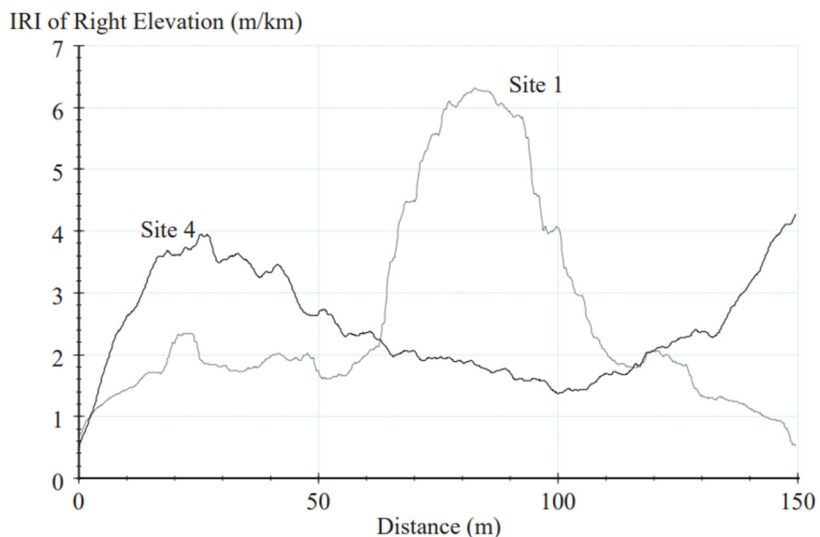
Un perfil de rugosidad añade otra dimensión a la descripción de la rugosidad del camino. En lugar de proporcionar un índice único que resuma la rugosidad de un tramo de carretera, muestra los detalles de cómo varía la rugosidad con la distancia a lo largo de un tramo de carretera. Es generado para una longitud fija L utilizada para promediar. En un punto del perfil, tome el IRI para el intervalo que comienza en -L/2

antes de la ubicación actual y termina en $+L/2$ después la ubicación actual. Por ejemplo, si la longitud promedio es 30 m, el valor IRI para los primeros 30 m se trazan en $X=15$. El IRI que cubre el rango de 1 a 31 se traza en $X=16$. La siguiente figura muestra los perfiles de rugosidad para los mismos datos utilizados en las tablas anteriores. La figura incluye todos los valores IRI enumerados en las dos tablas anteriores para el perfil de la derecha. Para la primera tabla, los valores ocurren en $X=15, 45, 75$, etc. Para la segunda, ocurren en $X=35, 65, 95$, etc. Además, la figura muestra los valores para todas las tablas posibles que se puedan hacer, utilizando un intervalo de impresión de 30 m.

Un vistazo rápido al perfil de rugosidad del Sitio 1 muestra que los 30 m más rugosos El tramo se centra cerca del punto $X=80$ con un nivel superior a 6 m/km. (El máximo es en realidad 6,31 m/km, para el intervalo centrado en $X=82,75$.)

- **La longitud afecta la variación que se observa en los índices de rugosidad.**

Para tramos muy largos, los efectos de los tramos accidentados se promedian. Si usted resumir IRI en intervalos largos, como una milla, es posible que no vea que una sección muy corta es significativamente más irregular que cualquier otra cosa en kilómetros.

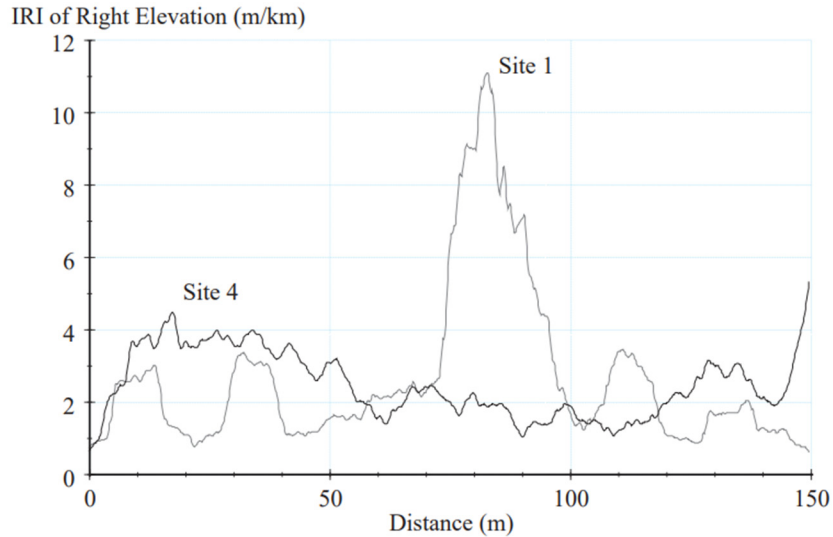


Perfil de rugosidad basado en 30 m de longitud.

El rango de valores IRI obtenidos depende de las longitudes utilizadas. Esto puede parecer sorprendente al principio porque, como la mayoría de los índices de perfil, el IRI está normalizado por longitud. La longitud no afecta el promedio; afecta los rangos de IRI que se ven por encima y por debajo del promedio. El efecto de la longitud se muestra en la siguiente figura, basándose en los mismos datos utilizados para la figura y las tablas anteriores. En este caso, el IRI se calcula para una distancia relativamente corta de 10 m. Observe que para el Sitio 1, los valores de IRI varían desde un mínimo de 0,75 m/km en $X=22$ m hasta un máximo de 11,08 m/km en $X=83$ m.

- **Los perfiles de rugosidad requieren acumulación lineal.**

Una característica del IRI es que el promedio de los valores del IRI de dos tramos de carretera adyacentes es el mismo que el IRI del total. Esto no es cierto para las funciones PSD o el número de rodado, porque las salidas no se acumulan linealmente.



Perfiles de rugosidad basados en 10 m de longitud.

¿Qué son las pruebas de verificación?

Hasta este punto, hemos cubierto lo que puede hacer con las medidas de perfil que son **válidas**. Se supone que estadísticas como IRI, RN y PSD tomadas de mediciones del perfil real son las mismas que se obtendrían analizando el perfil real.

¿Cómo sabes que las medidas de tu perfil son confiables?

Las pruebas de verificación se utilizan para confirmar que un equipo está funcionando correctamente. En general, las pruebas de verificación no determinarán si el equipo fue calibrado o diseñado adecuadamente. Las pruebas de calibración y validación son más difíciles de realizar e interpretar y normalmente las realizan investigadores y desarrolladores.

- **Antes de poner en servicio un nuevo perfilómetro, verifique que su salida parezca razonable.**

Por un lado, un generador de perfiles proporciona grandes cantidades de información que es difícil obtener de otra manera. Pero, por otro lado, los índices de rugosidad como el IRI y el RN están fuertemente vinculados a la percepción del público sobre la calidad de las carreteras. Como miembro del público, usted puede evaluar si los números que salen de la computadora tienen sentido.

Las pruebas de este tipo a veces se denominan controles de la realidad o controles de salud.

Estas pruebas simples no pueden determinar la precisión del sistema, pero si pueden verificar que esté produciendo un resultado que parezca razonable.

Por ejemplo, casi todos los perfilómetros incluyen software IRI para computadora. Los valores de IRI para carreteras suelen oscilar entre 0,7 m/km para un pavimento nuevo muy liso, 1,6-2,0 m/km para secciones

promedio y 3 m/km y más para secciones que deben considerarse para reparación. Las carreteras rara vez alcanzan niveles de rugosidad superiores a 3,5 m/km. La mayoría de las carreteras más transitadas se encuentran en el rango de 1,5 a 2,5 m/km.

- **Elija resultados que usted utilice y comprenda.**

Si está utilizando el generador de perfiles principalmente para recopilar valores IRI, verifique su funcionamiento obteniendo valores IRI. Si lo está utilizando para ver perfiles, verifique su funcionamiento inspeccionando los gráficos de perfiles.

- **Determinar la repetibilidad.**

En la práctica, ningún dispositivo de perfilado es perfecto. Los errores existen. Si perfila la misma línea imaginaria en la carretera varias veces, no obtendrás exactamente el mismo resultado cada vez. (Habrá más discusión sobre esto más adelante). Sin embargo, debería obtener casi el mismo resultado con mediciones repetidas.

La repetibilidad suele ser mejor para perfiles más largos. Si está procesando los perfiles para obtener IRI, debería poder repetir los valores medidos dentro del 5% para perfiles que tienen una milla de longitud. Con cuidado, debería poder repetir dentro del 1 o 2%. Para perfiles más cortos, se producen mayores variaciones.

- **Si el rendimiento no es razonable, ¡llame a la fábrica!**

Si obtiene resultados cuestionables del generador de perfiles, probablemente no estaría de más leer las instrucciones que vienen con el sistema y verificar que todo esté conectado correctamente.

Si sospecha que el dispositivo no es válido, que no está dando los mismos resultados que obtendría con el perfil real, entonces es poco lo que puede hacer para compensarlo. Algo en el sistema no funciona bien y hay que arreglarlo.

- **Verifique periódicamente que las medidas del perfilómetro se mantengan razonable.**

Un perfilómetro tiene muchas piezas que pueden fallar y poner en peligro la precisión de las medidas. Como cualquier sistema de medición complejo, su perfilómetro debe probarse periódicamente para garantizar que funciona según lo previsto. Debe establecer "controles de cordura" periódicos para verificar que el sistema parece estar funcionando.

Una buena práctica es establecer tramos carreteros que puedan ser utilizados como sitios de verificación. Mida el perfil periódicamente y compare las nuevas lecturas con las obtenidas en el pasado. Intente incluir un sitio que sea bastante fluido y otro que sea accidentado.

Las lecturas de estos sitios no se utilizan para ajustar resultados futuros. El instrumento es un perfilómetro válido o no lo es. Si no es así, arréglo o deje de usarlo.

¿Qué es la calibración?

Gran parte de las mediciones en ingeniería implican la conversión entre diferentes variables físicas (voltaje, pulgadas, etc.) y la conversión entre diferentes unidades de escala aplicadas al mismo tipo de medida (pulgadas, metros, etc.).

- **Las calibraciones un proceso de corrección de la escala de un dispositivo de medición.**

Para instrumentos que miden propiedades de estado estacionario, la calibración implica determinar un factor de escala comparando la salida del instrumento con una entrada conocida. Por ejemplo, la calibración del sensor de altura del láser en un perfilómetro podría verificarse estableciendo la distancia entre el láser y su objetivo en un valor conocido y luego leyendo la salida del sensor. Si la lectura es errónea, se realiza un ajuste electrónico para calibrar el sensor. La prueba generalmente se realizaría para varias distancias diferentes para garantizar que la salida del sensor sea linealmente proporcional a la altura sobre el suelo.

- **La calibración de un perfilómetro se realiza en el laboratorio.**

Un perfilómetro inercial típico incluye un acelerómetro, un sensor de altura sin contacto, un sensor de distancia longitudinal, una computadora y una variedad de componentes electrónicos para alimentar los sensores y conectarlos a la computadora. Cada sensor se calibra de forma independiente. Si alguna pieza no funciona correctamente, el generador de perfiles en su conjunto no podrá proporcionar perfiles válidos.

Dependiendo del diseño del sistema, es posible que no le sea posible calibrar los componentes individuales. Generalmente se necesita equipo especial. En la mayoría de sistemas de complejidad similar, los sensores se calibran en fábrica y permanecen calibrados durante toda su vida.

Es posible que el fabricante requiera que realice calibraciones periódicas de algunas partes del sistema. Por ejemplo, los instrumentos de medición de distancias pueden ajustarse sin equipo avanzado. Sin embargo, si el fabricante no proporciona instrucciones para calibrar las piezas del sistema, probablemente no esté destinado a que usted las ajuste.

- **No se puede calibrar un perfilómetro midiendo la rugosidad.**

Dado que usted calibra un sensor de altura dándole una entrada de altura conocida y leyendo la salida, podría suponer que un perfilómetro debería calibrarse midiendo un perfil con un nivel de rugosidad conocido (por ejemplo, IRI). Esto está mal.

Las condiciones exactas que contribuyen al índice de rugosidad de un perfil verdadero suelen ser únicas para ese perfil. Las contribuciones de varias longitudes de onda son generalmente diferentes para otro perfil verdadero incluso si tiene el mismo valor de índice resumido.

Cuando verifica el valor de una estadística de rugosidad calculada a partir de su generador de perfiles comparándola con una referencia, se trata de una prueba de verificación, que se describe más arriba. Si

el acuerdo no es satisfactorio, entonces el perfilómetro no es válido para esa condición. ¡Entonces es hora de llamar al fabricante!

- **No calibre ecuaciones ni computadoras.**

Recuerde: la mitad del proceso de medición implica el análisis realizado de los datos del perfil. La parte de análisis del proceso está fijada en el software de la computadora. Las ecuaciones se programan correctamente la primera vez o no. La parte de análisis del proceso no es algo que pueda cambiar con el tiempo y el uso, y no forma parte de la calibración.

¿Qué es la correlación?

La correlación es una relación mutua o conexión entre diferentes variables. Estadísticamente, es el grado de correspondencia entre dos conjuntos de datos.

- **El análisis de correlación describe qué parte de la variación en la variable Y está relacionado con la variación de la variable X.**

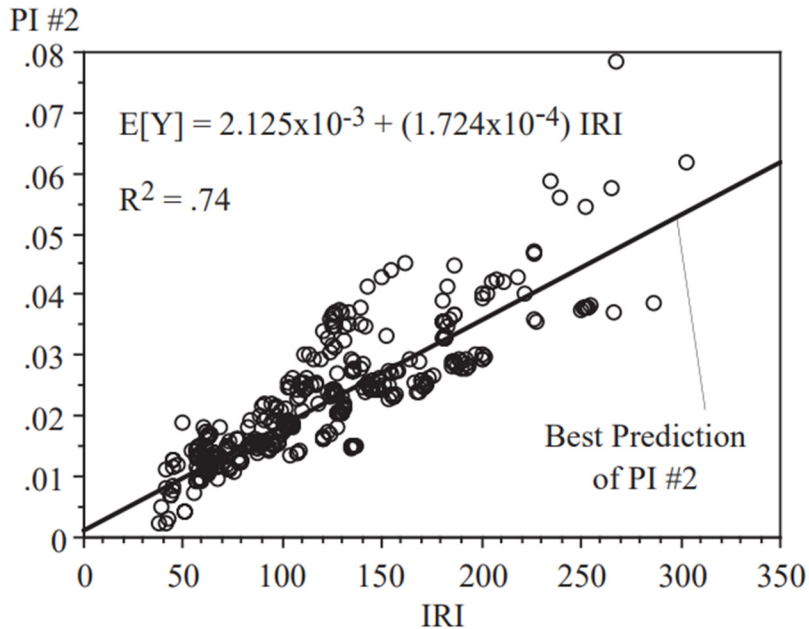
Considere los datos que se muestran en la siguiente figura. Hay dos conjuntos de datos, cada uno de los cuales representa estadísticas de rugosidad tomadas de los mismos perfiles. Los valores de una estadística {PI #2} se trazan en el eje Y frente a los valores de IRI. trazados en el eje X.

La figura muestra que, en general, los aumentos en los valores de IRI están relacionados con valores crecientes de PI #2. Sin embargo, la relación no es perfecta. Tanto IRI como PI #2 son salidas de transformaciones matemáticas que responden de manera diferente a las sinusoides según sus longitudes de onda. El IRI y el IP n.º 2 pueden clasificar dos perfiles específicos de manera diferente.

- **Un coeficiente de correlación describe la relación entre dos variables.**

El análisis de regresión ajusta una función para predecir Y como función de X. La función, $f(X)$, suele ser una ecuación lineal con un desplazamiento y una ganancia. Las constantes de la ecuación se calculan en el análisis para minimizar las diferencias al cuadrado entre los valores de Y y los valores "ajustados" $f(X)$. La ecuación de regresión se muestra en la figura. junto con un coeficiente de correlación al cuadrado:

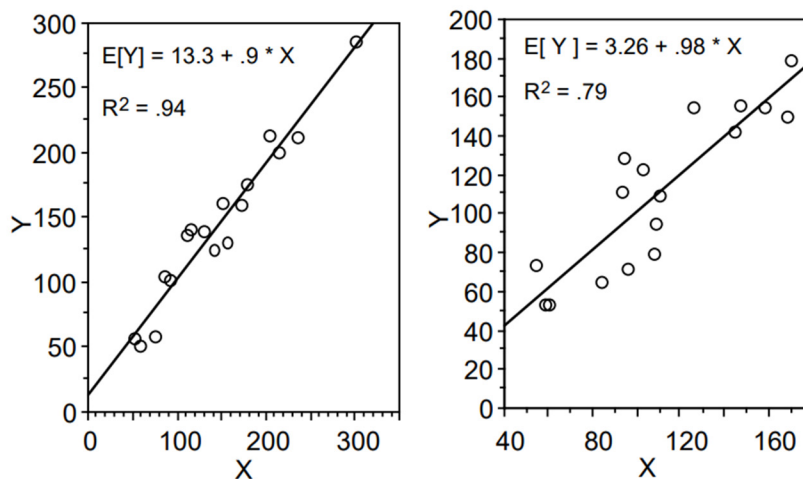
$$R^2 = \text{varianza de } f(X) / \text{varianza de } Y$$



El valor de R^2 está normalizado para permanecer en el rango entre 0 y 1. Si la ecuación ajustada predice Y perfectamente, entonces todos los puntos de datos en la figura estarían en la línea de regresión y R^2 sería igual a 1. Si R^2 es cero, significa que la forma asumida de la ecuación no puede usar los valores de X para mejorar la estimación de Y. Independientemente del valor de X, la mejor estimación de Y es su valor medio.

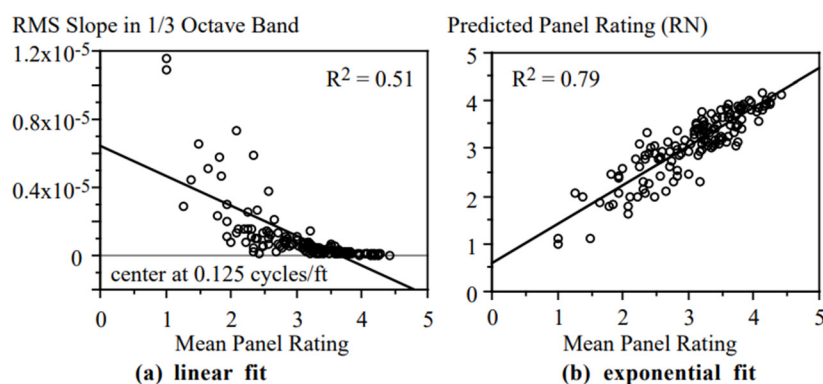
- **R^2 depende del rango de datos.**

Los dos gráficos de la siguiente figura involucran puntos tomados de un conjunto de datos más grande con propiedades estadísticas bien definidas. Y es igual a X, más un error aleatorio con una desviación estándar de 10. En el primer gráfico, los valores cubren un rango amplio y se obtiene un R^2 alto. En el segundo, los valores cubren un rango limitado. El error aleatorio es más significativo en relación con el rango de los datos y se obtiene un valor R^2 más bajo.



- **R^2 depende de la forma del modelo.**

Los dos gráficos de la siguiente figura implican la correlación entre la calificación media del panel y un índice de perfil. La escala MPR va de cero a cinco, mientras que el índice de perfil es lineal con la amplitud del perfil. La relación entre ambos resulta ser altamente no lineal. Una comparación directa (parte a de la figura) muestra un R^2 de 0,5, con mucha dispersión porque el supuesto ajuste en línea recta no coincide con los datos. Pero cuando el índice se transforma con una ecuación exponencial en una escala de cero a cinco (parte b de la figura), la línea recta es una mejor aproximación y se aplica un R^2 más alto.



Efecto de la no linealidad sobre R^2 .

- **El análisis de correlación se utiliza para cuantificar el error de medición.**

Por ejemplo, las medidas realizadas con un generador de perfiles podrían compararse con medidas de un sistema de creación de perfiles más preciso que se cree que es capaz de medir el perfil real con un error insignificante. Considere dos conjuntos de datos, cada uno con valores de IRI calculados a partir de diferentes perfilómetros. Los valores de los dos conjuntos de datos se comparan entre sí en la siguiente figura.

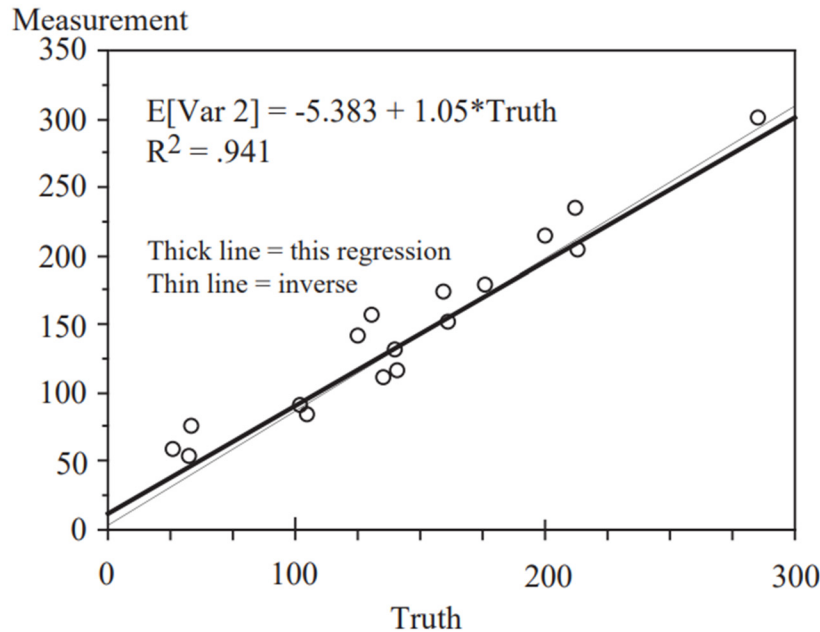
En las definiciones siguientes, $E[\]$ es el valor esperado de lo que está entre corchetes $[\]$. En otras palabras, $E[x]$ es el valor medio de x .

- **El error RMS indica el error esperado en una única medida del perfilómetro.**

$$\text{Error cuadrático medio (RMS)} = \{E[(\text{medida} - \text{verdad})^2]\}^{1/2}$$

Todos los generadores de perfiles exhiben algún nivel de error RMS total. Para examinar de cerca algunos sitios de carreteras específicos, como pavimentos recién reparados o construidos, el error RMS debe ser bajo. Para el monitoreo rutinario de una red de carreteras, se puede tolerar un nivel de error RMS más alto.

Sin realizar esfuerzos especiales para localizar con precisión la línea del perfil imaginario, se pueden esperar errores RMS inferiores al 5 % para perfiles que miden aproximadamente una milla de largo, suponiendo que el generador de perfiles sea muy preciso. La experiencia en programas de investigación anteriores indica que los errores en la rugosidad IRI se pueden controlar en varios porcentajes para secciones de prueba de 0,1 milla de largo (528 pies), si los operadores tienen especial cuidado al perfilar la misma línea que se utilizó para obtener un perfil de referencia.



- **El promedio de los errores de muchas medidas es el error de sesgo.**

$$\text{Sesgo} = E[\text{medida} - \text{verdad}]$$

El error de sesgo indica si un perfilómetro es sistemáticamente alto o bajo en comparación con la verdad. El error de sesgo para un perfilómetro válido debería ser muy pequeño. Se pueden esperar niveles de sesgo del 1% y menos para perfilómetros que sean válidos para el índice que se utiliza.

Si los datos del perfil se utilizan para aplicaciones PMS, el sesgo es potencialmente un problema grave. Los errores de sesgo distorsionan la imagen agregada del estado de una red, indicando que las cosas en general son mejores o peores de lo que son. Los errores de sesgo significativos impiden una comparación significativa con medidas de perfilómetros válidos.

- **Un error de sesgo significativo significa que el generador de perfiles no es válido.**

Puede que esta afirmación no sea una buena noticia, pero así es.

El error de sesgo es causado por un error en la calibración de fábrica, daño físico al sistema o un defecto en el diseño del perfilómetro. Puede existir sesgo para algunas estadísticas de perfil, pero no para otras, porque los factores que causan el sesgo pueden aplicarse o no a un análisis de perfil específico.

El error estándar es un indicador útil para desarrolladores e investigadores.

$$\text{Error estándar} = \{E[(\text{medida} - \text{verdad} - \text{sesgo})^2]\}^{1/2}$$

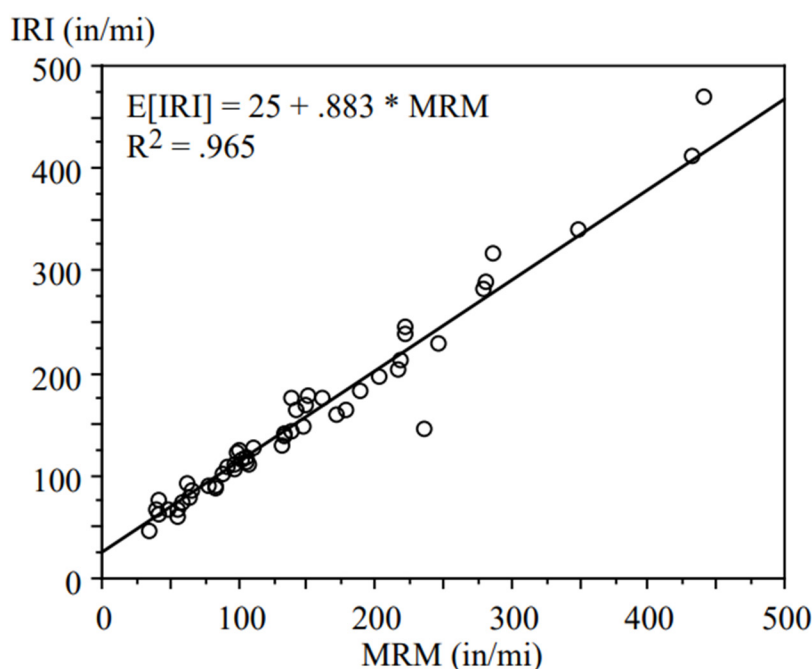
El error estándar es la porción del error total debida a efectos aleatorios. Es bueno que los investigadores y desarrolladores de tecnología de generación de perfiles comprendan las fuentes de errores en sus instrumentos. Para los usuarios finales, el error RMS total es la medida más significativa. Si el error de

sesgo es insignificante, como debería serlo para un perfilómetro válido, entonces el error estándar es igual al error RMS.

- **El análisis de correlación se utiliza para calibrar instrumentos de tipo respuesta.**

Los usuarios de sistemas de tipo respuesta deben calibrarlos con una referencia que sea reproducible y estable en el tiempo. Esto significa que la referencia debe ser una estadística definida para un perfil verdadero. Generalmente se utilizan valores de IRI calculados a partir del perfil medido.

Para esta aplicación se establece un conjunto de sitios de prueba. Los valores de IRI se determinan analizando los perfiles tomados para los sitios. El instrumento a calibrar se conduce sobre los sitios y se realiza un análisis de regresión. Los resultados de uno de estos instrumentos se muestran en la siguiente figura.



La ecuación de regresión se desarrolla con la "verdad" en el eje Y y el instrumento calibrado en el eje X. La línea de regresión se utiliza como curva de calibración para convertir medidas en la escala arbitraria del instrumento en estimaciones de la referencia basada en el perfil (por ejemplo, IRI).

Este método de convertir medidas brutas del instrumento a una escala estándar se llama calibración por correlación. Es necesario porque un instrumento de tipo respuesta no puede calibrarse de otra manera. El sistema de medición depende de las propiedades de respuesta dinámica del vehículo en el que está instalado el medidor de carretera. Las propiedades generales son complejas, dependen de muchos factores fuera del control del usuario y no todas pueden ajustarse. Aunque el medidor de carretera está calibrado por medios convencionales de fábrica, se desconoce la respuesta del vehículo.

- **¡No utilice calibración por correlación para perfilómetros!**

La calibración por correlación requiere mucho tiempo y su precisión es limitada. El deseo de evitar la calibración por correlación para sistemas de tipo respuesta es una razón importante por la que los Estados han estado cambiando de sistemas de tipo respuesta a sistemas de perfilación. Si utiliza una ecuación de correlación para convertir las salidas de su sistema generador de perfiles para que coincidan con otra referencia del generador de perfiles, entonces está reduciendo el generador de perfiles a un sistema de tipo respuesta.

La calibración por correlación no es necesaria para los perfilómetros porque la dinámica del vehículo anfitrión no es un factor cuando funciona según lo diseñado. Los movimientos del vehículo se eliminan del perfil producido por un sistema válido y en funcionamiento. La instrumentación y la electrónica se calibran por separado, utilizando equipos de laboratorio precisos y equipos de prueba especiales en la fábrica.

Si las salidas de su instrumento no coinciden con una referencia basada en perfil, ¡es hora de llamar a la fábrica!

¿Qué son los errores?

En un mundo perfecto, podrías repetir las pasadas por la misma línea imaginaria en una carretera y obtener exactamente las mismas estadísticas de perfil cada vez. Además, los resultados coincidirían con los obtenidos con otros perfilómetros. De hecho, el acuerdo no es perfecto.

- **La precisión es la falta de error.**

Los ingenieros optimistas hablan de la precisión de sus sistemas. sin embargo, la precisión está definida por el error. Cuanto menor sea el error, mejor será la precisión.

Existen diferentes conceptos sobre qué es exactamente un error. Comencemos con la opinión de que una diferencia entre dos medidas de perfil indica que las cosas no están tan bien como podrían estar.

- **La repetibilidad es la capacidad de obtener medidas repetidas con el mismo instrumento al (casi) al mismo tiempo.**

Suponga que toma un perfilómetro y realiza medidas repetidas a lo largo de una línea, una y otra vez, hasta que haya realizado 10 repeticiones. La repetibilidad se define por la variación de los índices de perfil tomados para cada ejecución.

Es común caracterizar la variación en un índice resumen como el IRI tomando la desviación estándar de las mediciones. Las unidades de la desviación estándar coinciden con las del índice. Por ejemplo, si procesa los perfiles para obtener IRI con unidades de in/mi, la repetibilidad será en términos de in/mi.

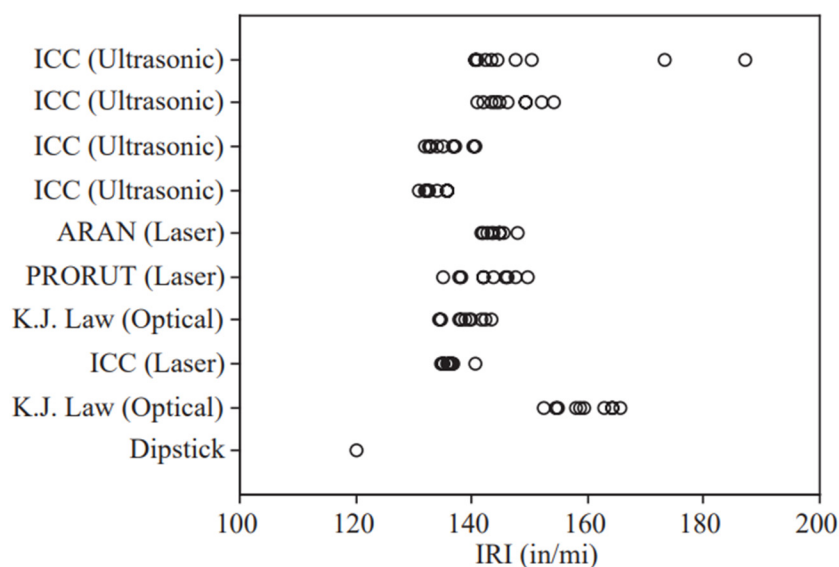
Para escalar la variación como porcentaje, divida la desviación estándar por el valor medio de las medidas y multiplique por 100.

Para caracterizar la repetibilidad de su instrumento, debe realizar pruebas repetidas para diferentes condiciones de carretera de interés. Como se señaló anteriormente, es probable que las superficies texturizadas causen errores de medición y deben probarse. Las secciones rugosas generalmente muestran desviaciones estándar mayores que las secciones lisas. La siguiente figura muestra mediciones repetidas tomadas por una variedad de perfilómetros en la misma sección de la carretera.

Para perfilómetros estáticos como el Dipstick, la repetibilidad suele ser muy buena si los perfiles se toman con una diferencia de una hora entre sí. Se observan errores de repetibilidad mayores con perfilómetros inerciales operados a velocidades de autopista.

- **La repetibilidad es una preocupación principalmente para las aplicaciones de diagnóstico.**

La repetibilidad no afecta el valor medio obtenido con un perfilómetro. Algunos valores del índice calculados son demasiado altos y otros son demasiado bajos, pero se promedian.



Si se utiliza un generador de perfiles para examinar la condición de una red para análisis estadístico, la repetibilidad probablemente no será una gran preocupación.

Por otro lado, si el perfilómetro se utiliza para evaluar carreteras recién construidas o reparadas, Para recompensar o penalizar a los contratistas, la repetibilidad adquiere mayor importancia.

- **La reproducibilidad es la capacidad de repetir las medidas con un perfilómetro diferente del mismo diseño básico.**

Ahora supongamos que alguien más toma un perfilómetro similar al suyo y realiza mediciones repetidas a lo largo de la misma línea que usted midió, y procesa los perfiles para obtener el mismo índice (por ejemplo, IRI). La diferencia en los valores medios obtenidos para los diferentes instrumentos es la reproducibilidad. Por ejemplo, la figura anterior muestra medidas independientes realizadas con varios perfilómetros del mismo fabricante. Hay cuatro unidades ultrasónicas ICC y dos unidades KJ Law.

Para caracterizar la reproducibilidad de un instrumento, es necesario realizar medidas en un conjunto de sitios de prueba, repitiendo medidas con ambos instrumentos en cada sitio. El número de repeticiones que se deben realizar depende de la repetibilidad de los instrumentos y de la metodología de prueba. Si son muy repetibles, una sola medida podría ser suficiente. Para medidas menos repetibles, se deben tomar suficientes repeticiones para obtener un valor medio del índice del perfil con cierta confianza.

Para los perfilómetros, la reproducibilidad no es de tanto interés como la portabilidad.

- **Portabilidad es la capacidad de repetir las medidas con diseños de perfilómetros completamente diferentes.**

El estándar de portabilidad es el perfil verdadero. Recuerde que un perfilómetro se considera válido si los valores de un índice determinado no son ni superiores ni inferiores, en promedio, a los valores del índice obtenido del perfil real. Debido a que cualquier perfilómetro válido está vinculado al perfil verdadero, sus medidas son portátiles por definición.

Por otro lado, si las medidas no son transportables, entonces el perfil no es válido. Simple.

La figura anterior muestra el grado de portabilidad que existía para medir el IRI para una sección de prueba de PCC en particular. La reproducibilidad entre perfilómetros similares fue aproximadamente la misma que la portabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes.

El verdadero perfil es más un concepto que una realidad. Dados dos perfilómetros, ¿cuál da la verdad?

El método aceptado para establecer que un perfilómetro es válido para medir un índice y probarlo con un método estático como una mira y nivel o un Dipstick. Para IRI o análisis que se pueden aplicar a perfiles tomados con un intervalo de muestra de 1 pie, el Dipstick es una opción popular.

- **La repetibilidad y reproducibilidad se pueden calcular para cada punto en un perfil.**

Si está utilizando gráficos de perfil para diagnosticar la condición del pavimento, es posible que desee comparar los gráficos de perfil para ejecuciones repetidas. Un método, descrito en la norma ASTM E950, consiste en aplicar un filtro de paso alto idéntico a cada perfil y tratar los valores de elevación de cada punto a lo largo del perfil como una medición independiente. Se puede calcular la desviación estándar en cada punto.

La interpretación de la variabilidad de cada punto no está clara. Como se muestra en secciones anteriores, los análisis tienen una sensibilidad que cambia con la longitud de onda. Además, las amplitudes asociadas con las funciones PSD muestran que las amplitudes de elevación son principalmente una función de cómo se filtra el perfil para eliminar longitudes de onda largas.

Es necesario realizar más investigaciones para evaluar la utilidad de la repetibilidad y reproducibilidad punto a punto. La variabilidad punto a punto no tiene un vínculo directo con el error en índices de perfil específicos como IRI y Ride Number.

¿Qué causa el error de creación de perfiles?

El acto de elaboración de perfiles involucra: (1) un usuario, (2) un perfilómetro y (3) una carretera.

Los errores son causados por: (1) el usuario, (2) el perfilómetro y (3) la carretera.

- **Estás perfilando una línea diferente cada vez.**

Una fuente importante de variación en las medidas del perfilómetro es que cada vez se perfila una línea diferente en la carretera, y las líneas simplemente tienen perfiles reales diferentes. Para los perfilómetros estáticos, la línea suele estar marcada físicamente y este error es pequeño. Para los perfilómetros inerciales, las variaciones en la elección de la línea en la carretera suelen ser más significativas que cualquier otro error.

Suponiendo que conduce el perfilómetro por un camino paralelo a la línea central de la carretera, hay dos variables que ubican la línea que se está perfilando:

1. la posición inicial longitudinal, y
2. la posición lateral.

A 100 km/h se recorren casi 28 metros por segundo. El tiempo normal de reacción humana de varias décimas de segundo corresponde a distancias de 5 a 8 metros.

Además, cuando activa el generador de perfiles para que comience a tomar muestras, puede haber un retraso que depende del diseño de la electrónica y del software que controla el sistema durante la prueba. El perfil comienza dondequiera que se encuentren el acelerómetro y los sensores de altura cuando comienza el proceso de medición.

- **Incluso los conductores expertos añaden variabilidad a los puntos de partida.**

En programas de investigación anteriores, en los que los sitios de prueba estaban marcados con pintura en la carretera y los perfilómetros eran manejados por equipos experimentados con un conductor y un operador de instrumentos, se observaron errores de 60 metros. Incluso los mejores equipos cometieron errores iniciales de aproximadamente 10 metros.

Los perfiles de rugosidad mostrados anteriormente reducen la sensibilidad del lugar donde comienza el perfil, porque muestran información de rugosidad para todas las ubicaciones iniciales posibles.

La línea que se está perfilando se encuentra directamente debajo del sensor de altura. En la mayoría de perfilómetros, está alineado con las ruedas del vehículo. Sin embargo, el conductor del vehículo deberá variar su ubicación.

- **La posición lateral también es importante.**

Los conductores altamente cualificados pueden mantener una posición lateral dentro de unos 15 cm. Sin embargo, son más comunes variaciones de 30 a 50 cm.

Operar algunos de los equipos de elaboración de perfiles actuales es tan fácil que el conductor puede olvidarse de los datos que se recopilan y conducir como un conductor normal, incluso cambiando de carril. Existe un perfil para una línea que cruza de un carril a otro, pero no es algo que pueda reproducirse fácilmente.

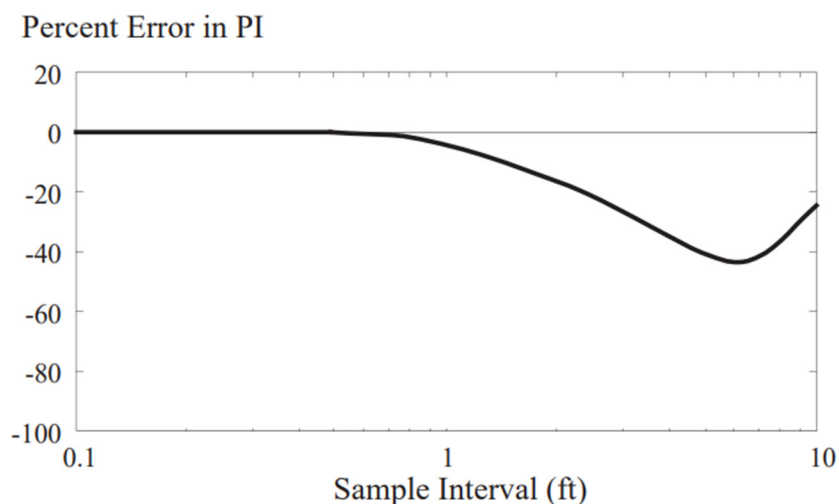
- **El perfilómetro tiene error de medición.**

La medición válida del perfil requiere que todas las partes del sistema funcionen correctamente: el acelerómetro, el sensor de altura, el sensor de velocidad, las fuentes de alimentación, el acondicionamiento electrónico de la señal, el convertidor analógico-digital y la computadora. Cada parte del proceso implica algún error. Lo ideal es que los errores sean pequeños, pero existen.

En programas de investigación anteriores, las principales fuentes de error observadas en sistemas con sensores de altura ópticos y láser se debían a la práctica del usuario. Sin embargo, existen diferencias inexplicables incluso en experimentos controlados, como se verá más adelante.

- **El intervalo de muestreo puede ser demasiado grande para el análisis.**

La mayoría de los análisis matemáticos aplicados a las medidas de perfil son casi exactos para intervalos muestrales muy pequeños, pero se vuelven aproximados a medida que crece el intervalo muestra!. Como usuario, usted compensa la conveniencia de un intervalo de muestra más grande con errores potencialmente mayores en las estadísticas calculadas a partir de los datos. La siguiente figura muestra el nivel de error en PI (la estadística intermedia utilizada para calcular RN) en función del intervalo de muestra. Esto muestra que para intervalos de muestra mayores a 1 pie, ni siquiera un perfil perfectamente preciso es suficiente para calcular RN.



Existe un efecto llamado aliasing que puede ser un problema en superficies texturizadas. Implica una interacción entre la elección del intervalo de muestra, las características de rugosidad del camino y el análisis que se aplica. (El alias se ilustrará más adelante en una discusión sobre textura). Esta fuente de error se reduce con filtros anti-aliasing en el generador de perfiles. Sin embargo, no todos los perfilómetros tienen suavizado. Para aquellos que no lo hacen, el error se reduce utilizando un intervalo de muestra más pequeño.

Recuerde que los sensores ultrasónicos no pueden proporcionar mediciones repetidas rápidamente porque deben esperar a que desaparezca el eco del impulso sonoro. A velocidades de autopista, el tiempo requerido limita el intervalo de muestreo a aproximadamente 1 pie.

- **Los sistemas ultrasónicos tienen más error.**

Los sistemas con sensores ultrasónicos no son tan precisos como los láseres y otras unidades ópticas. El sensor ultrasónico tiene una resolución de aproximadamente 2,5 mm. Una senoide con una amplitud de

1 mm (2 mm de pico a pico) y una longitud de onda de 3 metros tiene un valor IRI de 1,91 m/km. ¡A partir de este ejemplo, parecería que un sensor ultrasónico ni siquiera podría comenzar a funcionar! Sin embargo, funcionan, en condiciones limitadas, porque las carreteras reales no son sinusoides. Si los movimientos del vehículo son relativamente grandes en comparación con la resolución del sensor, el error es menos significativo.

Excepto en algunas situaciones extrañas, el error debido a la resolución limitada hace que la rugosidad medida por un perfilómetro ultrasónico sea mayor que el valor real.

En carreteras en buen estado, la resolución limitada del dispositivo ultrasónico adquiere mayor importancia. Se han observado diferencias en el rendimiento con perfilómetros ultrasónicos de diferentes fabricantes. El nivel de rugosidad en el que los sistemas son válidos depende de muchos factores y no tenemos una regla general.

- **Es posible que un transductor esté desconectado o roto.**

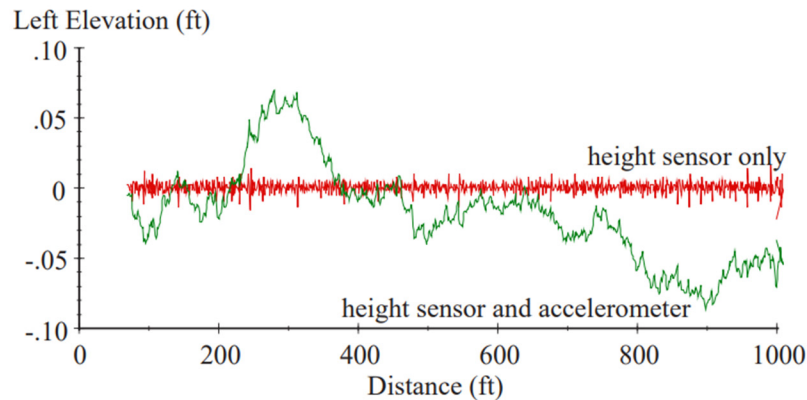
Cuando un perfilómetro no funciona correctamente, suele deberse a que una pieza ha fallado por completo. Una causa es una conexión rota.

Debido a la complejidad del proceso de medición en un perfilómetro inercial, puede parecer que todavía se están produciendo perfiles incluso si un elemento crítico está roto. Recuerde que el acelerómetro y la señal de altura juntos proporcionan la información para generar el perfil. También proporcionan la información para anular el efecto del rebote del vehículo.

Si uno de los sensores se rompe o se desconecta, se pierde la contribución del perfil de ese sensor, lo que tiende a reducir la rugosidad calculada. Sin embargo, obtienes el rebote del vehículo que debería haberse cancelado, un efecto que tiende a aumentar la aspereza calculada.

Aunque podría pensar que el movimiento del vehículo es aleatorio, en realidad se repite bastante bien si realiza recorridos repetidos por la misma carretera. Por lo tanto, la repetibilidad puede seguir siendo buena (aunque no tan buena como cuando todo funciona).

Con experiencia, puedes saber si falta el acelerómetro o el sensor de altura observando los gráficos del perfil. Si falta la pieza del acelerómetro, la variación del perfil sin filtrado será mucho más limitada de lo normal, con un alcance de apenas un centímetro aproximadamente. Por ejemplo, la siguiente figura compara una medición de perfil con la obtenida utilizando únicamente la salida del sensor de altura.



El IRI calculado a partir de la señal del sensor de altura únicamente es de aproximadamente 97 pulgadas/milla, mientras que el IRI calculado a partir del perfil real es de aproximadamente 140 pulgadas/milla. Aunque estos valores son muy diferentes, el valor IRI de la señal del sensor de altura está en el rango esperado, y podría no causar ningún aviso cuando se ingrese en una base de datos. Sin un gráfico de perfil, este error podría pasar desapercibido.

Si el sensor de altura no funciona, el perfil será mucho más suave, mostrando sin textura ni variaciones nítidas.

- **Es posible que el sensor de altura no funcione para el tipo de superficie.**

Como se mencionó anteriormente en la sección sobre textura, las superficies texturizadas son difíciles de detectar con transductores de altura ultrasónicos y pueden causar problemas con algunos sensores láser.

Las superficies muy agrietadas también pueden causar problemas con los sensores láser, como será descrito en una sección posterior sobre grietas.

- **Es posible que el sensor de altura no funcione por otros motivos.**

De todas las piezas que componen un perfilómetro inercial, es el sensor de altura el que tiene más probabilidades de fallar en condiciones difíciles.

Se deben verificar los sensores láser y ópticos para garantizar que las lentes estén claras y no cubiertas de suciedad, lluvia o barro que impidan la visualización continua de la imagen proyectada en el suelo.

Los sensores ultrasónicos también pueden verse afectados por el barro, la suciedad, etc. Sin las barreras adecuadas, se ven influenciados por factores que cambian el tiempo necesario para que el sonido se refleje desde el suelo hasta el vehículo. El viento cambia la presión del aire y la velocidad del sonido. Los ruidos exteriores pueden confundir la lógica del sensor.

La popularidad de los perfilómetros inerciales aumentó rápidamente con la introducción del diseño de Dakota del Sur, que empleaba sensores ultrasónicos de bajo costo a una pequeña fracción del costo de los dispositivos basados en láser. Desafortunadamente, el rendimiento está limitado por el sensor ultrasónico. Algunos estados (incluido Dakota del Sur) han modificado sus sistemas, reemplazando las unidades ultrasónicas por láseres.

La solución a largo plazo es sustituir los sensores ultrasónicos por dispositivos más precisos cuando el presupuesto lo permita.

- **La velocidad puede ser un factor.**

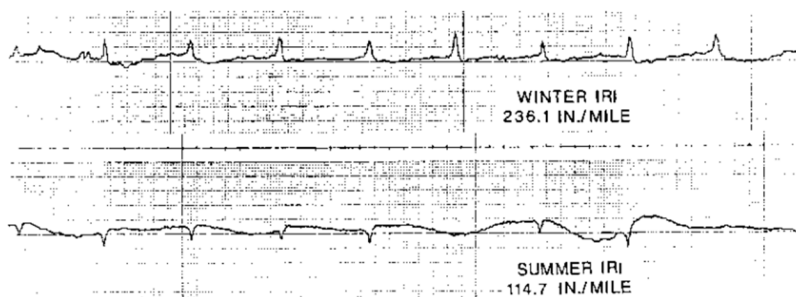
La velocidad de medición es parte integral del funcionamiento adecuado de un perfilómetro inercial y se discutirá en la siguiente sección.

- **Es posible que el verdadero perfil haya cambiado.**

El verdadero perfil puede cambiar con el tiempo. En particular, los pavimentos de losas de PCC cambian diariamente en respuesta al calentamiento y enfriamiento. Cuando la parte superior de la losa se ha contraído, se produce una "curvatura de la losa". Debido a este efecto se han observado cambios en la rugosidad IRI del 20%.

Además de los cambios diarios, los cambios estacionales pueden afectar el perfil, ya que varía la humedad del suelo. Los cambios estacionales de congelación y descongelación también pueden tener un gran efecto.

Por ejemplo, los gráficos siguientes fueron obtenidos por Novak y DeFrain del DOT de Michigan y muestran cómo cambia el perfil de un pavimento superpuesto en Michigan.



Las variaciones observadas en la medición del perfil debido a cambios en el perfil real, por supuesto, no son errores. El generador de perfiles simplemente está capturando el perfil actual. Desafortunadamente, no siempre es fácil determinar si los cambios observados corresponden al perfil real o al proceso de medición.

¿Cuál es el efecto de la velocidad?

Un perfilómetro inercial se construye en un vehículo de carretera normal, como una furgoneta o un turismo. Cuando no se está midiendo perfil, el vehículo se puede conducir a las mismas velocidades que se utilizarían si el vehículo no tuviera la instrumentación abordo. Pero al medir el perfil, ¿cuál es el efecto de la velocidad?

- **La mayoría de perfilómetros son válidos para un rango de velocidades.**

Casi todos los perfilómetros inerciales que se utilizan actualmente producen perfiles que son válidos incluso si la velocidad cambia durante la medición. El rango de velocidades depende del diseño del perfilómetro y del uso que se vaya a hacer de los datos.

- **El perfil real es estático.**

Recuerde que el verdadero perfil es propiedad de una línea en el suelo. No tiene velocidad asociada. Si su perfilómetro es válido para un propósito determinado, entonces su velocidad durante la medición no es un factor.

Bajo ninguna circunstancia se debe considerar un "factor de corrección de velocidad". Si se obtienen diferentes resultados de su sistema a diferentes velocidades, algo anda mal y debe repararse.

- **Terminarás antes si vas rápido.**

Los conductores de perfilómetros inerciales tienden a darse cuenta de esto con bastante rapidez.

- **Es más difícil seguir una línea exacta a alta velocidad.**

En aplicaciones donde la intención es capturar un perfil real específico, definido por una línea específica (imaginaria) en la carretera, las bajas velocidades facilitan que el conductor ubique con precisión el vehículo para seguir la línea.

Una fuente importante de variabilidad en medidas repetidas es la variación en la posición lateral del perfilómetro entre ejecuciones. En una pasada, la línea del perfil podría pasar por un bache, aumentando la rugosidad del perfil. En la siguiente pasada, si el operador avanza sólo 8 pulgadas hacia la derecha, no se detecta el bache y se observa una menor rugosidad. Ambos resultados podrían ser correctos, en el sentido de que el instrumento obtuvo un perfil válido en cada caso. Es solo que los perfiles se basan en líneas diferentes.

A largo plazo, variaciones como ésta se promedian. Los baches y otras causas de aspereza se encuentran esparcidos por el camino. Las características de rugosidad omitidas en un perfil se compensan con características adicionales que no están presentes en otros perfiles de la misma carretera.

A menos que sea necesario un acuerdo cercano para repetir las medidas, la ubicación exacta de la línea que se está perfilando no es de interés y la variabilidad normal a velocidades de carretera (60 mi/h) es aceptable.

- **El perfilómetro detecta longitudes de onda más largas a velocidades más altas.**

Recuerde que el perfilómetro inercial tiene un acelerómetro para detectar el movimiento vertical del vehículo y establecer una referencia inercial. Lo ideal sería que la salida del acelerómetro fuera válida por poco que se mueva el vehículo. Sin embargo, en el mundo real de sensores y componentes electrónicos imperfectos, también existe el "ruido" electrónico. El perfilómetro funciona aceptablemente si la "señal" (salida debida a la aceleración) del acelerómetro es significativamente mayor que el ruido. Sin embargo,

si la señal está al mismo nivel que el ruido, o es menor, entonces la computadora genera un perfil que es erróneo porque se basa en el ruido.

El acelerómetro y su electrónica deben configurarse para manejar las mayores aceleraciones verticales que se anticipan en el uso normal. Una aceleración vertical de 1,0 g (g = gravedad) es el nivel en el que los objetos en el vehículo rebotan en el aire. El límite exacto en un generador de perfiles depende del diseño y posiblemente de la configuración del usuario, pero estará en el rango de 0,4 g a 1,5 g. (Para acelerómetros montados en el parachoques o en vehículos utilitarios, los rangos pueden llegar hasta 2 o 3 g). Con estas configuraciones, el ruido y otros errores comienzan a asumir importancia para niveles de aceleración inferiores a 0,01 g.

Considere los tres ejemplos de sinusoides presentados anteriormente. La aceleración vertical que cada uno provoca al pasar sobre él (ignorándola dinámica del vehículo) depende de la velocidad.

La siguiente tabla muestra la relación entre velocidad y aceleración vertical. La longitud de onda de 60 m (λ) genera una aceleración vertical de 0,02 g a 60 mi/h, pero sólo 0,0013 g a 15 mi/h. A alta velocidad, el perfil debería ser válido para análisis que involucran longitudes de onda de 200 pies. A baja velocidad, el perfil podría ser cuestionable para el mismo análisis.

		At 27 km/h		A 54 km/h		A 108 km/h	
λ (m)	Amp. (mm)	Frec. (Hz)	Acel.(g)	Frec. (Hz)	Acel.(g)	Frec. (Hz)	Acel.(g)
60	20	0,13	0,0013	0,25	0,005	0,50	0,02
15	5	0,50	0,005	1,00	0,02	2,00	0,08
10 pies	0,05 pulg	2,50	0,025	5,00	0,10	10,00	0,40

- **Existe un límite de velocidad baja para los perfilómetros inerciales.**

Para velocidades muy bajas, la aceleración vertical es demasiado pequeña incluso para longitudes de onda de 15 m y menos. El límite exacto depende de dos factores: (1) el uso que se hará de

los datos, y (2) la calidad del acelerómetro y la instrumentación en el perfilómetro.

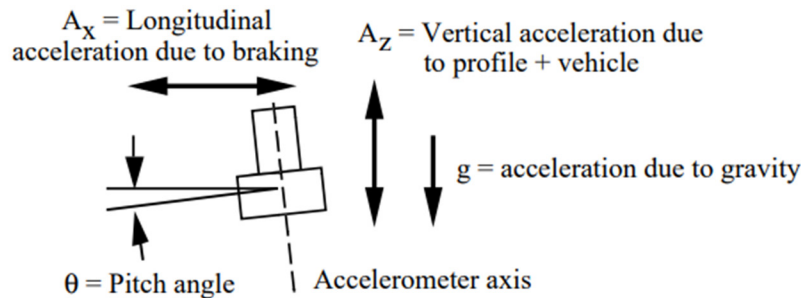
Como regla general, 25 km/h deben considerarse como el límite inferior para obtener perfiles para análisis "típicos" como IRI. Si los perfiles se analizan con transformaciones matemáticas que involucran sólo longitudes de onda cortas, la velocidad podría ser bajado a 15 km/h. Para análisis en los que sean de interés longitudes de onda más largas, se deben utilizar velocidades más altas.

- **El uso de los frenos provoca un pequeño error de medición.**

Los perfilómetros inerciales modernos permiten variar la velocidad durante el proceso de medición. El cambio de velocidad se compensa perfectamente si el acelerómetro se orienta de manera que (1) su eje es puramente vertical, o (2) la aceleración longitudinal es cero. De hecho, ninguna de estas condiciones se cumple perfectamente. A medida que el vehículo responde a las asperezas del camino, se inclina hacia adelante y hacia atrás, ligeramente, cambiando el eje vertical del acelerómetro relativo a la vertical pura. Los ángulos de inclinación de cabeceo ("pitch") son pequeños y suelen ser mucho menos de un grado. Sin

embargo, durante el frenado, la inclinación puede aumentar a uno o dos grados. Excepto en caso de frenado o uso intenso del pedal del acelerador, la aceleración en el eje longitudinal también es pequeña.

Existe un problema potencial cuando el acelerómetro está inclinado y el vehículo está experimentando una aceleración longitudinal, como se muestra en la siguiente figura.



La aceleración medida por el transductor es

$$A_{\text{meas}} = (A_z - g) \cos(\theta) + A_x \sin(\theta)$$

Para un ángulo de inclinación de 1° , el $\cos(\theta)$ es 0,99985. Incluso con 1 g debido a la gravedad, el error es solo $(1 - 0,99985) = 0,00015$ g. El término $\sin(\theta)$ es 0,0175. Ahora bien, si hay una desaceleración de frenado de 0,1 g, esto suma un error de $(0,0175) \times (0,1) = 0,00175$ g. Esta cantidad de error de aceleración es lo suficientemente pequeña como para que no sea obvia en los datos del perfil.

Tanto la aceleración longitudinal como el ángulo de cabeceo son aproximadamente proporcionales al esfuerzo de frenado. Por tanto, el error es aproximadamente proporcional al esfuerzo de frenado al cuadrado. Por ejemplo, con un ángulo de 2° y una desaceleración de 0,2 g, el error de aceleración vertical es de 0,007 g.

- **Las velocidades altas requieren tasas de recopilación de datos más altas.**

Para un intervalo de muestreo determinado, la computadora y el sistema de adquisición de datos deben tomar muestras de las lecturas del acelerómetro y del sensor de altura a una frecuencia proporcional a la velocidad. Dependiendo de la computadora, la electrónica y el nivel de complejidad de los cálculos realizados para calcular matemáticamente el perfil a partir de las salidas del acelerómetro y el sensor de altura, puede haber un límite en cuanto a la cantidad de lecturas que se pueden tomar por segundo. A 100 km/h (62,5 mi/h), un perfilómetro con dos acelerómetros, dos sensores de altura y un sensor de velocidad de avance debe recopilar y procesar más de 5500 lecturas por segundo para muestrear dos perfiles en un intervalo de 25 mm.

En los últimos años, la velocidad de procesamiento de las computadoras ha limitado los intervalos de muestra que podrían manejarse a altas velocidades. Con las velocidades de las computadoras actuales, las capacidades de recopilación de datos no deberían ser un factor limitante, excepto para intervalos de muestra muy pequeños (menos de una pulgada).

- **La velocidad está limitada para perfilómetros con sensores ultrasónicos.**

La velocidad de recopilación de datos de un sensor ultrasónico está limitada por el eco del ping acústico y, en menor grado, por la velocidad del sonido en el aire. El sonido viaja a unos 335 m/seg. Por lo tanto, si el sensor está a 150 mm por encima de la superficie de la carretera, el sonido tarda aproximadamente 0,001 segundos en llegar a la carretera y reflejarse. A una velocidad de avance de 100 km/h, esto significa que el vehículo habrá recorrido unos 25 mm cuando se detecte el sonido. Sin embargo, los ecos del ping acústico tardan mucho más en extinguirse lo suficiente como para realizar la siguiente lectura con precisión.

La relación exacta entre la velocidad del vehículo y el intervalo de muestreo que se puede lograr a esa velocidad está determinada por varios factores en el diseño del sistema.

Sin embargo, las distancias necesarias para una operación segura, combinadas con el tiempo de eco, se combinan para imponer un límite en el intervalo de muestreo para perfilómetros con sensores ultrasónicos. Por lo general, pueden medir a intervalos no inferiores a 300 mm a velocidades de autopista. Para medir en un intervalo de 150 mm es necesario reducir la velocidad de medición a aproximadamente 50 km/h.

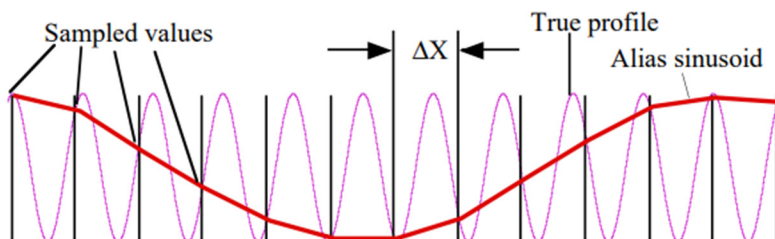
¿Cuál es el efecto de la textura?

- **Las superficies texturizadas provocan errores en la medición del perfil.**

Existen serios problemas de medición que plantean las superficies texturizadas, como los pavimentos sellados con virutas o de nivel abierto. La textura implica variaciones que ocurren en distancias cortas que involucran longitudes de onda de varias pulgadas o menos. Estas longitudes de onda están fuera del rango de interés para la mayoría de los análisis de perfiles, pero afectan el rendimiento de algunos instrumentos. La naturaleza específica del error depende del tipo de instrumento.

- **La textura puede provocar errores de alias.**

El alias se ilustra con una senoide en la siguiente figura.



Las líneas verticales indican las ubicaciones donde se muestrea el perfil, y la senoide de longitud de onda corta es el ejemplo del perfil verdadero que se está muestreando. Las intersecciones de las líneas verticales y la senoide indican los valores que se muestrean.

Recuerde que para ver una senoide, el intervalo de muestra debe ser la mitad de la longitud de onda o menos. El ejemplo anterior muestra lo que sucede cuando el intervalo de muestra es demasiado grande. Observe que cuando conectamos los valores muestreados con líneas rectas, las muestras parecen definir una senoide con una longitud de onda mucho más larga. Este efecto se llama **aliasing**. La senoide con longitud de onda larga es un alias de la senoide verdadera con longitud de onda más corta.

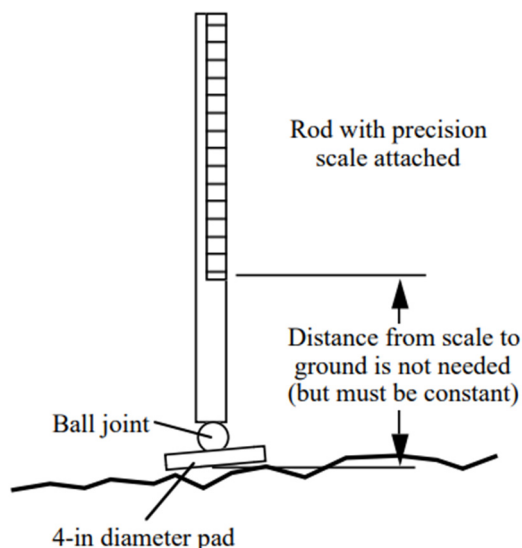
Supongamos que el perfil se procesa con un análisis que tiene respuesta cero a la senoide en el perfil verdadero. El problema es que el análisis aplicado al perfil podría responder a la senoide alias, que tiene una longitud de onda más larga. Dado que la senoide con alias no existe en el perfil verdadero, esto es una fuente de error.

Para formas de perfil distintas de una senoide, existe el mismo efecto. Variaciones en el perfil causa una forma de alias si el intervalo de muestra no es lo suficientemente pequeño.

- **El alias se puede reducir para medidas de perfil estático.**

Los métodos estáticos como la mira y el nivel o el Dipstick implican contacto físico con la superficie de la carretera. Los soportes que cubren un área muy pequeña permiten que el dispositivo detecte variaciones que cubren distancias pequeñas. El pie del Dipstick o el extremo de la mira encajan en pequeñas depresiones. Por otro lado, los soportes con áreas de "huella" más grandes "suavizan" las variaciones de textura, reduciendo el problema de aliasing.

El Dipstick tiene "pies lunares" opcionales de varias pulgadas de diámetro, para reducir los errores de aliasing y los efectos de textura. Para mira y nivel, se pueden fabricar almohadillas para aumentar el tamaño de la huella. Por ejemplo, a continuación se muestra un archivo adjunto utilizado en programas de investigación anteriores.



- **El alias se puede reducir para medidas láser y ópticas.**

Los sensores que detectan las elevaciones del pavimento con luz (láser o luz simple) pueden activarse a un ritmo muy alto. Por ejemplo, el sistema PRORUT desarrollado para la Administración Federal de Carreteras utiliza un sensor láser fabricado por la empresa Selcom que produce una salida continua de

voltaje proporcional a la altura. El sistema láser actualiza la lectura 16.000 veces por segundo. Viajando a 100 pies/seg, las muestras están espaciadas a menos de 0,1 pulgadas. El voltaje proporcionado por la unidad como salida se filtra electrónicamente para suavizarlo antes de muestrearlo en un intervalo mayor (por ejemplo, 2 pulgadas) para el procesamiento por computadora.

Como otro ejemplo, los sistemas fabricados por KJ Law, Inc. calculan el perfil en un intervalo de aproximadamente 1 pulgada. Luego, los perfiles calculados se suavizan mediante un filtro digital y se almacenan en un intervalo de aproximadamente 6 pulgadas.

La huella de un sensor ultrasónico es lo suficientemente grande como para que el aliasing no se considere un problema grave. Sin embargo, las superficies texturizadas provocan graves errores de medición en los sistemas ultrasónicos por otra razón.

- **Las superficies texturizadas no se pueden perfilar con sistemas de ultrasonidos.**

Los sensores de altura ultrasónicos funcionan emitiendo un pulso de sonido corto y escuchando el eco que regresa. El tiempo entre la emisión del pulso y su retorno es proporcional a la distancia recorrida. Esta técnica falla (1) si la superficie no refleja el sonido lo suficientemente bien como para detectarlo, o (2) si la superficie refleja el sonido muchas veces, de modo que los múltiples ecos confunden la lógica del sensor.

La experiencia adquirida durante los últimos diez años con sensores ultrasónicos demuestra repetidamente que simplemente no funcionan en superficies texturizadas.

- **Las superficies texturizadas causan dificultades con los sensores láser.**

Los sensores de altura láser funcionan proyectando una imagen en el suelo, detectando su posición cuando se ve en ángulo y determinando la distancia mediante triangulación. Esta técnica falla si no se puede detectar la imagen. Si la imagen es pequeña en relación con la escala de las características de la textura, es posible que no siempre sea visible para el transductor de detección.

Aunque las superficies texturizadas causan dificultades, algunos sistemas de instrumentación están diseñados para compensar. La imagen láser se controla a una frecuencia muy alta.

Cuando la imagen desaparece, se puede utilizar la altura más reciente. Tan pronto como reaparece la imagen, se actualiza la altura. Por lo tanto, una pérdida de la imagen es aceptable hasta el punto en que se pierda casi todo el tiempo. La lógica electrónica que retiene la última muestra hasta que reaparece la imagen se llama "muestrear y retener".

- **Los sensores ópticos y láser pueden reducir los problemas de textura con grandes imágenes.**

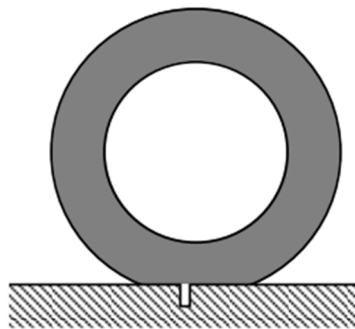
Los sensores de altura láser generalmente funcionan con imágenes de puntos pequeños. Los sensores ópticos suelen proyectar una imagen más grande en el suelo. (Tanto los sistemas láser como los ópticos suelen utilizar luz infrarroja para evitar la interferencia de la luz visible y, por lo tanto, no se pueden ver las imágenes sin gafas especiales). Una imagen más grande ocupa una superficie más grande. Si la imagen permanece visible en superficies texturizadas, los problemas se reducen considerablemente.

¿Qué pasa con las grietas?

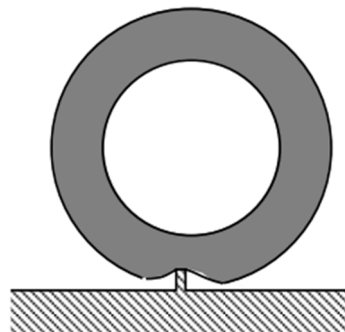
Generalmente se piensa que las grietas en el pavimento degradan el desempeño estructural, en lugar de la mayoría de las cualidades de desempeño de una carretera que derivamos del perfil.

- **Las grietas no afectan directamente a la dinámica del vehículo.**

Aunque la presencia de grietas en la carretera implica que la carretera se está deteriorando y puede provocar una mayor aspereza en el futuro, no necesariamente son "sentidas" por un vehículo. Esto se debe a que suelen ser muy estrechos en comparación con la longitud de la zona de contacto del neumático.



Las grietas no afectan directamente a los neumáticos ni a los vehículos.



¡Los resaltos sí!

- **Las grietas sí afectan a los índices de rugosidad.**

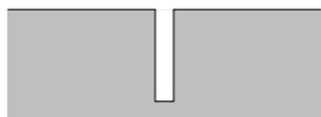
Los sensores láser proyectan una imagen en el suelo que es lo suficientemente pequeña como para entrar en una grieta. A menos que se utilice un intervalo de muestra muy corto, no hay suficiente información para distinguir una grieta de una inmersión con una duración más larga. Los sistemas con un intervalo de muestreo cercano tienen más probabilidades de detectar una grieta, pero proporcionan suficiente información para que puedan identificarse como tales. Sin embargo, a menudo esta información se desecha antes de registrar el perfil.

Ninguno de los análisis de perfiles cubiertos en este libro incluye métodos para manejar las grietas adecuadamente. Todos tratan una grieta de la misma manera que una protuberancia tan alta como

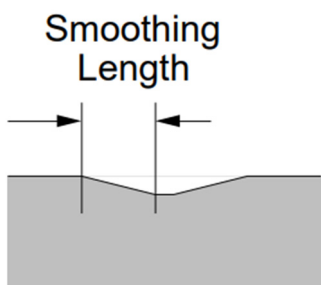
profunda la grieta. Esto significa que el índice puede verse afectado significativamente por una característica de la carretera que no es relevante para la calidad que intenta predecir.

- **Los filtros convencionales no eliminan completamente las grietas del perfil.**

Un filtro de paso bajo que se aplica a un perfil que incluye una gran depresión causada por una grieta la reducirá, pero no la eliminará. Se necesita un algoritmo "direccional" especial que trate las grietas de manera diferente a los baches. Este algoritmo sólo será útil si el intervalo de muestreo es lo suficientemente cercano como para identificar una depresión en el perfil como una grieta.



Perfil original con grieta de 1 pulgada



Perfil filtrado (media móvil)

- La característica se reduce, pero no se elimina.
- Todavía tiene efecto sobre el IRI y otros índices.
- Se recomienda el algoritmo "Muestreo direccional y retención"

¿Qué tan preciso debe ser un perfil?

No existe un único uso para los perfiles y no existe un único diseño de perfilómetro que sea "el mejor" para todas las aplicaciones.

- **El monitoreo de la red requiere una alta eficiencia de medición.**

Los registros año tras año del estado de una red de carreteras se utilizan para gestionar secciones que suelen tener varios kilómetros de longitud. El tiempo es una limitación importante: el proceso de medición y análisis de toda la red debe completarse en un año, cuando llega el momento de repetir el proceso el año siguiente. Las velocidades de medición suelen ser de 80 km/h (50 mi/h) o más para esta aplicación.

La precisión de las lecturas individuales no es crítica, ni tampoco lo es la capacidad de localizar puntos problemáticos con una precisión de 10 m. Recordemos que uno de los criterios para un perfilómetro válido es que las medidas no sean ni superiores ni inferiores, en promedio, a las que se obtendrían con "perfiles

verdaderos "minuciosamente medidos. Los errores aleatorios en la medición se promedian para secciones individuales de la carretera y no afectan el panorama general.

- **Las aplicaciones de diagnóstico requieren precisión e inspección de perfiles.**

El tiempo es un factor menor cuando lo que se pretende es estudiar de cerca tramos de carretera de unos pocos kilómetros o menos. Se aceptan velocidades de medición más bajas, de 25 o 40 km/h.

Para aplicaciones de diagnóstico, puede ser deseable mostrar las propiedades de la carretera en una escala tal que los puntos problemáticos puedan localizarse dentro de 10 o 20 metros. (Como punto de referencia, cuando se viaja a 100 km/h, que es 62,5 mi/h, se cubren casi 28 metros cada segundo. Así, 33 metros (100 pies) corresponden a poco más de 1 segundo de tiempo percibido por un conductor a velocidades de autopista.)

La precisión puede ser de mayor importancia para las aplicaciones de diagnóstico. Las medidas son no sólo para una base de datos estadísticos: deben describir la condición exacta de una sección particular del pavimento.

- **La precisión requerida del perfilómetro depende de la aplicación.**

La aplicación de los datos del perfilómetro implica el análisis que se utilizará para procesar el perfil, y el uso que se dará a los resultados procesados.

- **Las especificaciones de precisión deben incluir longitudes de onda sinusoidales.**

La mayoría de los análisis que se aplican a las mediciones de perfiles por estándar El software informático se puede caracterizar significativamente por dos factores:

1. ¿Cómo responde el análisis a una senoide con una longitud de onda determinada?
2. ¿Qué importancia tiene esa longitud de onda en las irregularidades de una carretera típica?

Considere el primer factor. Supongamos que el perfilómetro se utiliza para determinar la rugosidad IRI. Se sabe que cuando al software IRI se le asigna una senoide con una longitud de onda más larga de 100 pies, apenas produce rendimiento. Por ejemplo, la siguiente tabla muestra IRI valores para varias sinusoides.

Longitud de onda	Amplitud	Pendiente	IRI
60m	20 mm	2,09 m/km	0,15 m/km
30 m	10 mm	2,09 m/km	0,62 m/km
15 m	5mm	2,09 m/km	1,99 m/km
6m	2mm	2,09 m/km	1,53 m/km
3 m	1 mm	2,09 m/km	1 ,89 m/ km
1 ,5 m	0,5 mm	2,09 m/km	0,99 m/km

A medida que las longitudes de onda se hacen más largas, el resultado se acerca cada vez más a cero. De este modo, mejorar la precisión en la medición del perfil para longitudes de onda de más de varios cientos de pies no puede mejorar la precisión del IRI.

Consideremos ahora el segundo factor: el contenido de rugosidad en una carretera típica. Sabemos por haber visto las funciones PSD que la variación en la pendiente del perfil es aproximadamente uniforme con el número de onda en el rango cubierto por el IRI. Del gráfico de respuesta de frecuencia del IRI, hemos visto que el IRI responde más o menos uniformemente (dentro de un factor de 2) a pendientes longitudes de onda superiores a aproximadamente 1,5 m y menos de 24 m. Una especificación de precisión significativa para un generador de perfiles optimizado para obtener IRI especificaría su precisión en la medición de la pendiente (por ejemplo, error menor que 1%, o algún umbral como 0,03 m/km) para sinusoides con longitudes de onda entre 1,5 y 24 metros.

Es fácil evaluar el efecto del error del perfil en el IRI, porque está relacionado linealmente con la amplitud de la sinusoide. Supongamos que la amplitud de la sinusoide tiene un error de 0,1 mm. Eso causaría un error del 10% para la sinusoide de 3 m (error de 0,19 m/km), un error del 2% para la sinusoide de 15 m (0,04 m/km) y un error del 0,5% para la sinusoide de 60 m (≈ 0 m/km). Claramente, un límite al error de elevación por sí solo no dice mucho sobre la precisión para obtener el IRI.

- **Un límite en el error de pendiente es apropiado para los perfilómetros utilizados para medir el IRI.**

Un límite en el error de pendiente está más directamente relacionado con el resultado final. Por ejemplo, supongamos que el error es de 0,03 m/km. El error IRI sería cercano a 0,03 m/km para las sinusoides de 3 m y 15 m, y aproximadamente cero para la sinusoide de 60 m.

- **¿Qué es un perfilómetro de clase 1?**

Se definieron dos clases de métodos de elaboración de perfiles con respecto al IRI en las directrices publicadas por el Banco Mundial. (Se proporcionaron clases adicionales para sistemas de tipo respuesta y calificaciones subjetivas de panel). Posteriormente, la FHWA adoptó las definiciones de perfilómetro de Clase 1 y Clase 2 para la base de datos HPMS. Una norma ASTM reciente, E950(94), define cuatro clases de perfilómetros.

- **Las clases están destinadas a indicar la precisión de un perfilómetro.**

Una prueba de verificación común para un instrumento nuevo es comparar sus resultados con los obtenidos de una referencia. Si tienes dos perfilómetros, no darán exactamente los mismos resultados. ¿Cuál usas como referencia? Algunos perfilómetros son claramente más precisos que otros, por lo que el concepto de medición de Clase 1 se introdujo en el desarrollo del IRI para definir una referencia para determinar la precisión de un instrumento y/o método de medición de rugosidad. Un instrumento de Clase 1 debe ser tan preciso que el error aleatorio sea insignificante: para todos los propósitos prácticos, la medida IRI de un sistema de Clase 1 es el "verdadero IRI".

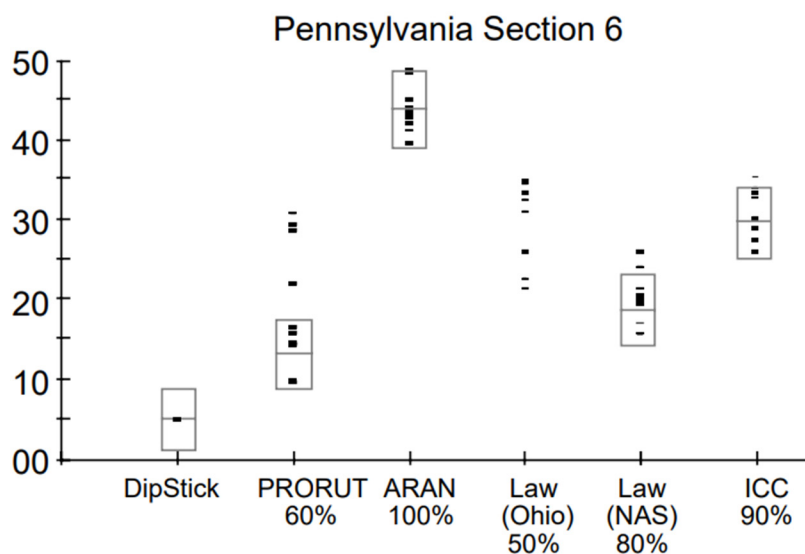
- **Clase 1 originalmente significaba que el IRI generalmente estaba dentro del 2% del verdadero.**

El concepto de un perfil verdadero para una línea dada en el terreno conduce al concepto de un IRI verdadero u otra estadística basada en perfiles. Utilizando datos tomados en la investigación, el nivel de precisión asociado con la Clase 1 se estableció en $\pm 2\%$ para sitios de prueba de 320 m (0,2 millas). (Este fragmento de información no se publicó en el informe del Banco Mundial, pero se basa en los recuerdos del autor). Se utilizaron estudios informáticos de la sensibilidad del IRI al intervalo de muestreo y la resolución de altura para definir un instrumento de perfilado de Clase 1.

El concepto de clases para métodos de generación de perfiles ha resultado popular entre usuarios y fabricantes. Sin embargo, la evidencia de los estudios de correlación de los últimos diez años indica que las especificaciones actuales de una medición del perfil IRI de Clase 1 no son suficientes. Los dispositivos que, sobre el papel, califican como Clase 1, no siempre muestran la repetibilidad esperada. En retrospectiva, se cree que el principal problema es que las especificaciones se centran en el equipo y no en su uso. Algunas de las fuentes de error mencionadas en la sección anterior existen sin importar cuán preciso sea un generador de perfiles.

- **Las definiciones existentes de Clase 1 no son suficientes.**

La evidencia del problema se obtiene cuando se realizan estudios en los que diferentes instrumentos perfilan los mismos sitios para obtener medidas del IRI. Por ejemplo, la siguiente figura muestra medidas repetidas de seis dispositivos que, en papel, califican como dispositivos de Clase 1.



El gráfico muestra datos de correlación tomados recopilados de un estudio iniciado en 1993 por RPUG. En el estudio se hizo un esfuerzo considerable para garantizar que todos los perfiles comenzaran en la misma ubicación longitudinal. Los cuadros de la figura muestran un rango de $\pm 2\%$. La gráfica muestra dos resultados interesantes:

1. Sin embargo, la repetibilidad de algunos de los instrumentos no está dentro del 2%. la repetibilidad es en general bastante buena.

2. El rango total cubre de 205 a 247 in/mi, que es aproximadamente un 20% variación.

Existen limitaciones con el equipo que no están cubiertas por la especificación del intervalo de muestreo y la resolución de altura. La experiencia ahora demuestra que un dispositivo puede tener problemas con una superficie de carretera específica. Un ejemplo común es que ciertas superficies texturizadas pueden confundir incluso a los mejores sensores de altura sin contacto utilizados en perfilómetros de alta velocidad. Otro ejemplo es que el Dipstick puede pasar por alto rugosidades significativas en una superficie con protuberancias más cortas que su longitud de base de 12 pulgadas.

A medida que se adquiere experiencia, surgen áreas en las que las diferencias entre los instrumentos no se explican fácilmente. Por ejemplo, ya se demostró anteriormente que los perfiles cambian significativamente debido a la temperatura y las variaciones estacionales. Se deben tomar disposiciones para tener en cuenta este efecto en la adquisición de datos de perfil para investigaciones que involucren métodos de Clase 1.

- **Se necesita investigación para perfeccionar la definición de una medición de Clase 1.**

Como mínimo, la especificación debe ampliarse para describir un método de prueba para usar el instrumento que permita al usuario estimar su calidad (por ejemplo, observando la dispersión en medidas repetidas).

Bibliografía

Interpretación de la rugosidad del camino

Sayers, MW y SM Karamihas, Interpretación de datos del perfil de rugosidad de la carretera. Informe de la Administración Federal de Carreteras FHWN RD-96/101, (1996) 177 p.

El índice de rugosidad internacional

Sayers, MW, "Sobre el cálculo del índice de rugosidad internacional a partir del perfil longitudinal de la carretera". Registro de investigación de transporte 1501, (1995) págs. 1-12.

Sayers, MW, et al., Directrices para realizar y calibrar mediciones de rugosidad de carreteras. Documento técnico del Banco Mundial número 46, (1986) 87 p.

Número de rodado (Ride Number)

Janoff, MS, Evaluación de campo de rugosidad y manejabilidad del pavimento. Informe del Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras 308, (1988) 54 p.

Janoff, MS, et al., Rugosidad y manejabilidad del pavimento. Carretera Cooperativa Nacional Informe del programa de investigación 275, (1985) 69 p.

Sayers, MW y SM Karamihas, "Estimación de la transitabilidad mediante el análisis del perfil longitudinal de la carretera". Registro de investigación de transporte 1536, (1996) págs.

Spangler, EB y WJ Kelly, "Desarrollo y evaluación del concepto de número de recorrido", Interacción vehículo- carretera, ASTM STP 1225, BT Kulakowskied., Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales, Filadelfia, (1994) págs. 135-149.

Calificaciones de paneles

Hutchinson, BG, "Principios de construcción de escalas de calificación subjetiva". Registro de investigación de carreteras 46, (1964) págs.

Loizos, A., et al., "Efectos de las características del usuario y el tipo de vehículo en la percepción de la rugosidad de la carretera". Investigación sobre carreteras y transporte, vol. 3, núm. 4, (1994) págs. 57-65.

Nick, JB y MS Janoff, "Evaluación de métodos de calificación de paneles para evaluar la calidad de conducción del pavimento". Registro de investigación de transporte 946, (1983) págs. 5-13.

Weaver, RJ, "Cuantificación de la capacidad de servicio del pavimento según la juzgan los usuarios de la autopista". Registro de investigación de transporte 715, (1979) págs. 37-44.

Índice de rugosidad del medio coche

Sayers, MW, "Dos modelos de cuarto de automóvil para definir la rugosidad de la carretera: IRI y HRI". Registro de investigación de transporte 1215, (1989) págs. 165-172.

Aceleración vertical media cuadrática

Hudson, WR, et al., "Root-Mean-Square Vertical Acceleration as a Summary Roughness Statistic", Measurement Road Roughness and Its Effects on User Cost and Comfort, ASTM STP 884, TO Gillespie y MW Sayers ed., Sociedad Estadounidense de Testing and Materials, Filadelfia, (1985) págs. 3-24.

Índice de calidad de viaje de Michigan

Dartington, J., Una banda de longitud de onda de rugosidad determinada por una respuesta subjetiva. Informe no publicado del Departamento de Carreteras del Estado de Michigan, (1976) 6 p.

Capacidad de servicio del pavimento

Prueba de carretera de la AASHO, Informe 5, Investigación sobre pavimentos. Especial de la Junta de Investigación de Carreteras Informe 61E, (1962) 352 p.

Carey, WN y PE Irick, "El concepto de rendimiento-servicio del pavimento". Boletín 250 de la Junta de Investigación de Carreteras, (1960) págs.

Sistemas de medición de rugosidad de carreteras de tipo respuesta

Gillespie, TO y otros, Calibración de sistemas de medición de rugosidad de carreteras de tipo respuesta. Informe del Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras 228, (1980) 81 p.

Hveem, FN, "Dispositivos para registrar y evaluar la rugosidad del pavimento". Carretera Boletín de la Junta de Investigación 264, (1960) págs.

Métodos de creación de perfiles

"Método de prueba estándar para medir el perfil longitudinal de superficies recorridas con una referencia de perfil inercial establecida por acelerómetro". Libro anual de normas ASTM vol. 04.03, E950, (1996) págs. 702-706.

"Método de prueba estándar para medir la rugosidad de la carretera mediante el método de nivel y mira estática". Libro anual de normas ASTM vol. 04.03, E1364, (1996) págs. 750-755.

Gillespie, TO, et al., Metodología para la elaboración de perfiles de rugosidad de carreteras y medición de profundidad de roderas. Informe de la Administración Federal de Carreteras FHWN RD-87-042, (1987) 50 p.

Huft, DL, "Perfilómetro de Dakota del Sur". Registro de investigación de transporte 1000, (1984) págs. 1-7.

Spangler, EB y WJ Kelly, "Perfilómetro de carreteras GMR: un método para medir las carreteras Perfil." Registro de investigación de carreteras 121, (1966) págs.

Dinámica del vehículo

Gillespie, TD, Fundamentos de la dinámica de vehículos. Sociedad de Ingenieros Automotrices, Warrendale, Pensilvania (1992) 495 p.

Calidad de rodado en camión

Gillespie, TD, Paseo en camión pesado. Sociedad de Ingenieros Automotrices SP-607, (1985) 66p.

Cargas de ruedas de camiones

Ervin, RD, et al., Influencia de las variables de tamaño y peso del camión en las propiedades de estabilidad y control de los camiones pesados. Informe de la Administración Federal de Carreteras FHWA-RD-83-030, (1983) 179 p.

Sweatman, PF, Estudio de las fuerzas dinámicas de las ruedas en suspensiones de grupos de ejes de vehículos pesados. Informe especial 27 de la Junta Australiana de Investigación de Carreteras, (1983) 56 p.

Whittemore, AP, et al., Cargas dinámicas en el pavimento de vehículos pesados de carretera. Informe del Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras 105, (1970) 94 p.