



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

ESTADO DEL ARTE EN LA VALIDACIÓN DE EQUIPOS DE AUSCULTACIÓN DE PAVIMENTOS

Marcos Ariel Villanueva Guzmán¹, José Ricardo Solorio Murillo²,
Agustín Sánchez Olguín³

¹ Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, ariel.villanueva@imt.mx

² Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, rsolorio@imt.mx

³ Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, agustin.sanchez@imt.mx

Resumen

Los pavimentos son considerados como el principal indicador del desarrollo económico de los países, relacionado con la infraestructura del mismo. Desde el punto de vista ingenieril, se conoce que los pavimentos deben presentar buenas condiciones mediante acciones de mantenimiento y conservación periódica para que los usuarios experimenten seguridad al transitar y no absorban los costos de operación. Se han desarrollado métricas que muestran índices de desempeño en pavimentos para conocer su calidad como lo son: IRI, profundidad de roderas, macrotextura, coeficiente de fricción y las deflexiones. Estos estándares de desempeño evalúan el confort, la seguridad y la parte estructural de los pavimentos. Con el fin de asegurar la fiabilidad de las lecturas de cada equipo de los índices de desempeño, así como de minimizar las diferencias que pueden presentar distintos equipos en la toma de datos en el mismo tramo en análisis, desde hace varios años la SICT exige a los prestadores de los servicios de auscultación de pavimentos verificar sus equipos en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Como parte de sus procesos de mejora continua, el IMT ha decidido revisar el estado del arte respecto a la verificación de equipos de auscultación. Como parte de ello, se han investigado los procesos empleados por organismos como algunos Departamentos de Transporte de Estados Unidos de América, los cuales han desarrollado algoritmos en el proceso de aseguramiento de la calidad de las lecturas de los equipos, mediante la verificación de los resultados fundamentada en un análisis estadístico que brinde certeza de los ensayos, p. ej., la correlación cruzada entre los ensayos realizados por el equipo y de diferentes equipos (exactitud y repetibilidad), para obtener parámetros estadísticos de los ensayos en los tramos de análisis. En términos generales, la implementación de esta práctica ha traído resultados positivos.

Palabras Clave: Auscultación, validación, estadística, correlación cruzada, exactitud, repetibilidad.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

1 Introducción

La recolección de datos de calidad para la administración de carreteras es considerada una de las partes indispensables del proceso, ya que gracias a este tipo de datos se pueden integrar proyectos que tomen en cuenta el estado actual de los pavimentos pertenecientes a redes de carreteras a cargo de dependencias gubernamentales o concesionarias. Aunque la auscultación de pavimentos es una acción que ya cuenta con tiempo de aplicación en el mundo y en nuestro país, aunque pareciera que ya se tiene un proceso adecuado y secuenciado, en realidad se observa que son pocos los organismos o dependencias involucradas en estas prácticas que cuentan con procesos estandarizados a través de un documento formal. Con el paso del tiempo, la práctica ha evolucionado, tratando de brindar mejores resultados con la menor cantidad de inversión posible para desarrollar procesos eficientes [1,2].

Debido a la relación que tienen los índices de desempeño con la calidad del pavimento y a su papel en la toma de decisiones respecto a los Programas de Mantenimiento y Conservación de las redes nacionales de carreteras, se han decidido adoptar como índices de desempeño parámetros como los siguiente: índice de regularidad internacional (IRI), profundidad de roderas (PR), porcentaje de agrietamiento del pavimento, índice de servicio actual (PSR), coeficiente de fricción, profundidad de la macrotextura (MTX) y deflexiones – módulo elástico – vida remanente [1-4].

Desde hace varios años, organizaciones encargadas de la gestión de carreteras como los Departamentos de Transporte (DOTs) de los Estados Unidos, comenzaron el cambio de equipos de medición manuales de bajo rendimiento por equipos automatizados de alta velocidad para evaluar la condición superficial del pavimento (IRI, MTX, PR). Actualmente, los dispositivos de alta velocidad cuentan con varios subsistemas que tienen la capacidad de georreferenciar la información recolectada durante el estudio, así como de crear perfiles de la superficie del camino, con cámaras de alta resolución para la toma de imágenes y videos que sirvan para la detección de deterioros y fallas del pavimento con sistemas ópticos [2].

En la tabla 1 se presenta una lista de los tipos de índices de desempeño de los pavimentos, gravedad y unidades de las medidas recolectadas en los trabajos de auscultación para desarrollar la guía de gestión de calidad de condiciones de los pavimentos, que después den origen a la elaboración de los programas de conservación y mantenimiento [3].

Tabla 1. Datos a recabar para índices de desempeño de pavimentos [3]

Índice de desempeño	Gravedad	Unidad de medida
IRI	NA	mm/m; m/km
Profundidad de rodera	NA	mm
Profundidad de la macrotextura	NA	mm
Coeficiente de fricción	NA	adimensional
Agrietamiento por fatiga	Baja, Media, Alta	% del área
Baches y parches	Baja, Media, Alta	% del área
Grietas longitudinales	Baja, Media, Alta	% de la longitud
Grietas transversales	Baja, Media, Alta	Número de grietas
Porcentaje de agrietamiento	Baja, Media, Alta	% del área

De acuerdo a los esquemas de avance del deterioro de la condición superficial de los pavimentos respecto al tiempo (Figura 1), en la que se aprecia que el deterioro se acelera conforme empeora la condición del pavimento, resulta imprescindible realizar acciones periódicas de auscultación y elaborar una estrategia de mantenimiento de los caminos con fundamento en las políticas establecidas



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

por la organización responsable. Algunos de los factores que afectan al avance acelerado del deterioro de los pavimentos son el tránsito y la composición vehicular (vehículos sobrecargados), así como las condiciones ambientales, entre otros [11].

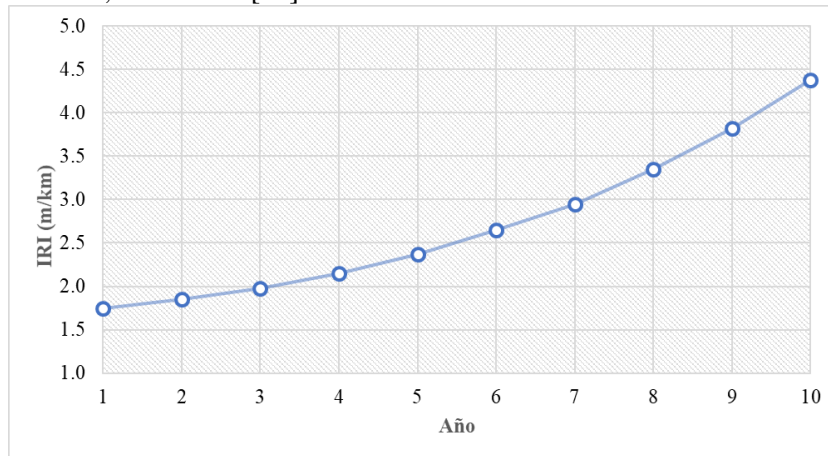


Figura 1. Ejemplo de una gráfica típica del avance del deterioro del IRI en un pavimento sin acciones de conservación [11].

Como cualquier procedimiento de medición, la auscultación de pavimentos es sujeto de incertidumbre derivada de errores aleatorios o sistemáticos vinculados a elementos como el tipo y mecanismo del equipo empleado, los componentes de procesamiento interno (electrónico, digital o de software), la precisión de los instrumentos, factores relacionados con el error humano (operador del equipo e interpretación de los resultados) o factores externos (edad del pavimento, condiciones meteorológicas, tráfico, etc.).

A fin de actualizar el conocimiento del estado del arte relativo al manejo de esta incertidumbre, se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica sobre la experiencia en el proceso de validación de resultados de los equipos de auscultación de pavimentos de otros países.

Cabe mencionar que, en una primera etapa, la búsqueda se centró en el IRI, por ser uno de los parámetros de mayor utilidad para describir en lo general el nivel de servicio de un pavimento. Sin embargo, en estudios futuros, se tiene contemplado ampliar la investigación a otros parámetros.

2 Procedimientos de validación

Los equipos que se emplean en la obtención de índices de desempeño de pavimentos deben ser verificados por un ente regulador, generalmente vinculado a dependencias gubernamentales a fin de evitar cualquier posible conflicto de interés. En el caso de México, las verificaciones son realizadas por el Instituto Mexicano del Transporte, que utiliza como base para la verificación un conjunto de tramos de prueba en los que se obtienen datos del índice de interés mediante equipos propios y procedimientos de referencia. En el caso del IRI, se utiliza como procedimiento de referencia el levantamiento con nivel y estatal estipulado en la norma ASTM E1364, el cual se aplica de manera periódica en los tramos de prueba.

El proceso de verificación implica el uso de un sistema de medición rastreado, es decir, basado en la comparación de los valores obtenidos por el equipo de interés con respecto a los valores conocidos de un tramo de prueba. Con esta parte del proceso de certificación se espera que “la exactitud en unidades tenga una base en normas y sea lo más permanente posible” [6].

Asimismo, la aproximación en el proceso de verificación y validación de los datos de los equipos de auscultación debe de considerar que “los equipos brinden resultados con exactitud, repetibilidad y



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

aseguren la reproducibilidad entre los equipos de medición y operadores”, es decir, el **valor verdadero** de los equipos de medición se obtiene por la conjunción de los tres factores (exactitud, repetibilidad y reproducibilidad) y este es comparado con el valor de referencia del tramo de prueba conocido en el proceso de verificación y validación de los datos (Figura 2) [6].

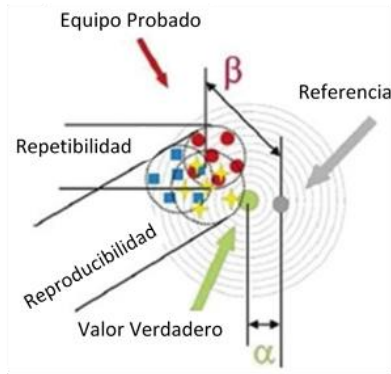


Figura 2. Parámetros de influencia en la validación de la calidad de la colección de los datos [6].

De acuerdo con las referencias utilizadas, han existido varias metodologías para generar un proceso de validación de los datos de los equipos de auscultación que minimice la incertidumbre de los resultados producidos por los diferentes tipos de equipos. En estas alternativas pueden mencionarse: factores lineales de ajuste y correlación cruzada

2.1 Factores lineales de ajuste

Los resultados de los equipos evaluados se comparan con valores de referencia dentro del rango de variación de los índices de desempeño. Para ello, se realiza un análisis de regresión lineal mediante un software para graficar los datos, aplicar el método de mínimos cuadrados y calcular el coeficiente de determinación (R^2) (Figura 3). Esta práctica se ha utilizado en México y España y, en última instancia, proporciona factores lineales de ajuste para aplicar en el procesamiento y análisis de datos de las evaluaciones en campo con los equipos [10].

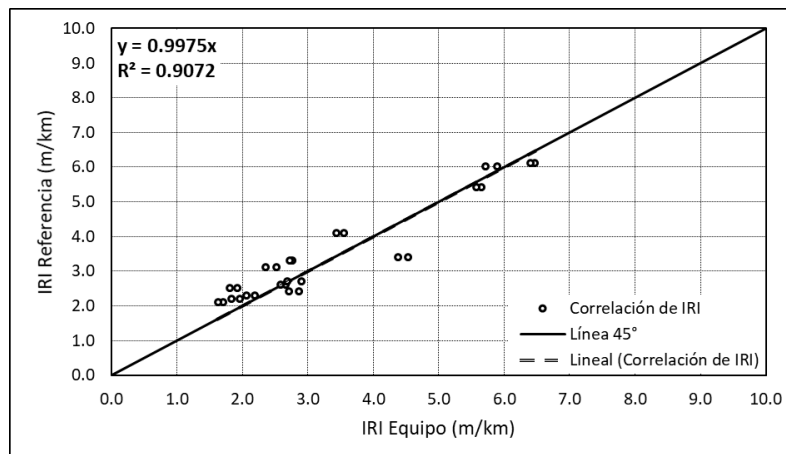


Figura 3. Ejemplo de verificación de equipo de IRI para la metodología de validación de equipos de auscultación por el método de Factores lineales de ajuste utilizado en México.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

2.2 Proceso de gestión de calidad de mediciones de los índices de desempeño

Como parte del desarrollo de este tipo de procesos, algunos Departamentos de Transporte en Estados Unidos de América (DOT) han detectado la necesidad contar con tramos de referencia para obtener datos fiables de los índices de desempeño.

Estos tramos se evalúan de manera periódica con varios equipos, de modo que proporcionen un registro histórico del comportamiento de los pavimentos, así como de las intervenciones (de mantenimiento o rehabilitación) que se han ejecutado para, en última instancia, proporcionar una base de comparación para las mediciones realizadas en la práctica cotidiana.

A este respecto, el DOT del estado de Tennessee desarrolló un procedimiento para la gestión de la calidad de las mediciones en pavimentos [3], el cual puede representarse mediante un diagrama de flujo como el mostrado en la Figura 4.

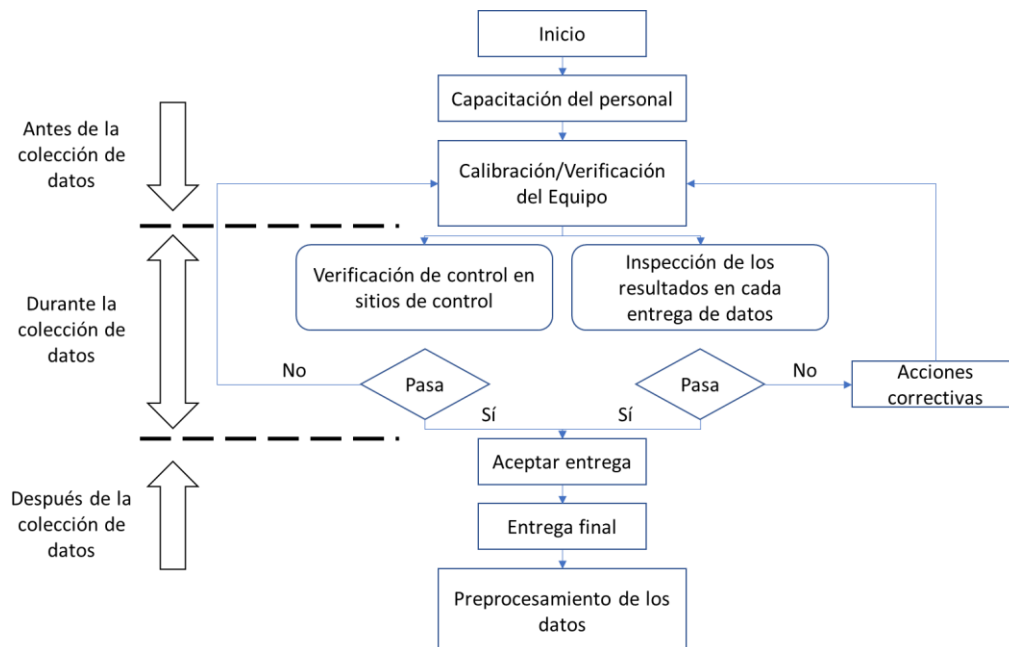


Figura 4. Proceso de gestión de calidad de condiciones de los pavimentos [3].

Además de la elaboración de un proceso para el aseguramiento de la calidad de los datos de análisis que, como el del DOT de Tennessee, incluya como parte fundamental el entrenamiento y capacitación de operadores de equipos de auscultación, han surgido herramientas adicionales para la validación de datos. Entre ellas, puede mencionarse de manera destacada la técnica estadística conocida como “correlación cruzada”, la cual ha adquirido una amplia base de usuarios en los Estados Unidos de América.

2.3 Correlación cruzada

La correlación cruzada es una herramienta estadística para calificar la relación entre el *valor medido* de los equipos de medición y el valor de referencia. Su utilidad radica en que no sólo compara los promedios y desviación estándar de las lecturas de los equipos (como en el método de factores lineales de ajuste), sino que, además, realiza una evaluación de la exactitud, la repetibilidad y la reproducibilidad de los resultados [12].



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Cuando el método se utiliza para verificar la exactitud en la medición de un índice, se compara una muestra de datos del equipo de interés con una muestra de referencia. La técnica se aplica principalmente en la validación de mediciones del IRI, y se basa en la comparación de los perfiles longitudinales obtenidos con los equipos evaluados y con equipos como DipStick o nivel y estatal. La evaluación se hace mediante la comparación de la totalidad de los perfiles, los cuales deben tener una configuración morfológica similar. Como práctica común, se acepta un coeficiente de correlación cruzada mínimo de 0.90 para considerar adecuada la exactitud del equipo. En cualquier caso, la correlación cruzada representa una alternativa de gran interés para la certificación y verificación de los perfilómetros [12].

En lo que se refiere a la repetibilidad, la función se aplica para evaluar la correlación entre diferentes medidas realizadas en el mismo sitio (al menos 3 de manera consecutiva, Figura 5) con el equipo, y se considera que la repetibilidad es adecuada si se alcanza un coeficiente de correlación cruzada mayor a 0.92 [12].

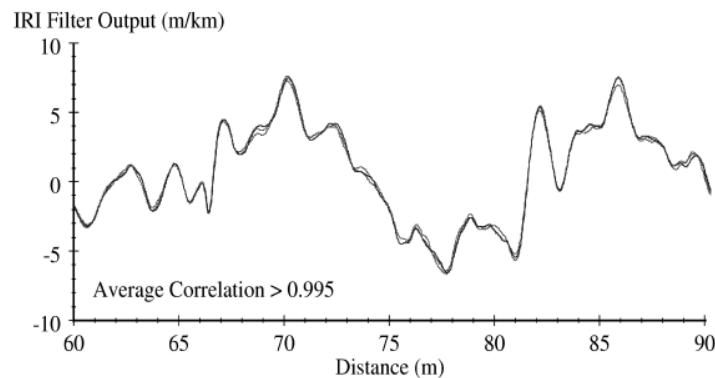


Figura 5. Ejemplo de tres perfiles de mediciones de IRI con correlación alta para la metodología de validación de equipos de auscultación por el método de Correlación cruzada [12].

En los EUA, la empresa TransTech Group ha desarrollado el software ProVAL, el cual puede utilizarse como apoyo para certificar equipos de auscultación mediante la aplicación de la correlación cruzada de manera simple, ya que sólo es necesario ingresar al software los perfiles medidos (al menos 3 para poder evaluar repetibilidad) y un perfil de referencia (Figura 6) [13].



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

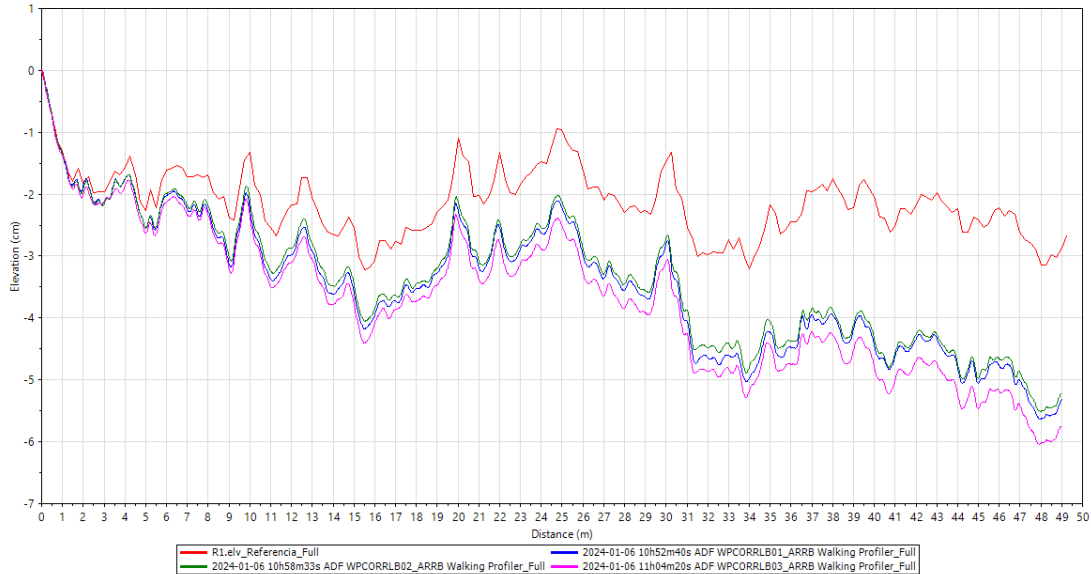


Figura 6. Ejemplo de perfiles de IRI para la metodología de correlación cruzada en ProVAL.

Es importante mencionar que en el proceso de validación de los equipos con el ProVAL es necesario realizar el análisis de correlación cruzada y que esta sea mayor a 0.92 para repetibilidad y a 0.90 para exactitud, de acuerdo con la práctica establecida (Figura 6).

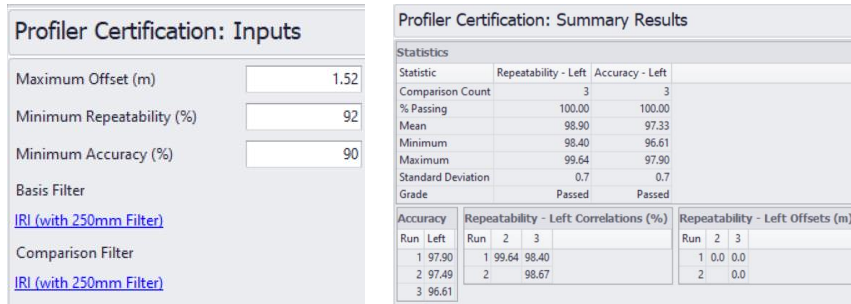


Figura 6. Ejemplo de validación de equipo de IRI para la metodología de correlación cruzada en ProVAL.

Según el informe no. 526 de la “National Cooperative Highway Research Program” (NCHRP, Programa Cooperativo Nacional de Investigación de Carreteras), en los Estados Unidos de América 38 DOT estatales utilizan el IRI como parámetro para la aceptación de los trabajos de construcción., De estos departamentos, 27 aplican un procedimiento para la certificación de manera obligatoria (Tabla 2) , lo que confiere a este procedimiento una gran relevancia [6].



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Tabla 2. Procedimientos utilizados para la certificación de la recolección de datos a nivel de proyecto por Departamentos de Transporte estatales [6].

Ubicación	Procedimiento Adoptado	Número de DOTs que lo implementan
En el estado	AASHTO R 56-14	6
	ASRM E950 (2008)	1
	Procedimiento de correlación cruzada desarrollado por el DOT estatal	14
	Procedimiento desarrollado por el DOT estatal que no implica correlación cruzada	4
Fuera del estado	Procedimiento desarrollado por el DOT estatal	2

Algunos de los DOT han desarrollado procedimientos que incorporan herramientas de correlación cruzada.

Para la recolección de datos de IRI a nivel de red, 15 DOT estatales estipulan que es indispensable la certificación del dispositivo de perfil (perfilómetro). La mayoría de estos DOT han adoptado procedimientos de certificación basados en la correlación cruzada (Tabla 3) [6].

Tabla 3. Procedimientos utilizados para la certificación de la recolección de datos a nivel de red por Departamentos de Transporte estatales [6].

Procedimiento Adoptado	Número de DOTs que lo implementan
AASHTO R 56-14	5
ASRM E950	1
Procedimiento de correlación cruzada desarrollado por el DOT estatal	5
Procedimiento desarrollado por el DOT estatal que no implica correlación cruzada	4

Por otra parte, es importante resaltar que en cuanto a las certificaciones de los equipos mediante la correlación cruzada existirán algunas diferencias en función del tipo de dispositivo utilizado. en donde usualmente el Perfilómetro inercial, DipStick y Walking Profiler se consideran como equipos de Clase I, mientras que existen otros perfilómetros que se consideran equipos de Clase II, Entonces de acuerdo con la mecánica de la medición de los equipos para poder realizar una certificación por correlación cruzada, es necesario tomar en cuenta los errores potenciales en los dispositivos de medición de IRI debido a las longitudes de onda (Figura 7) [15 -16].



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

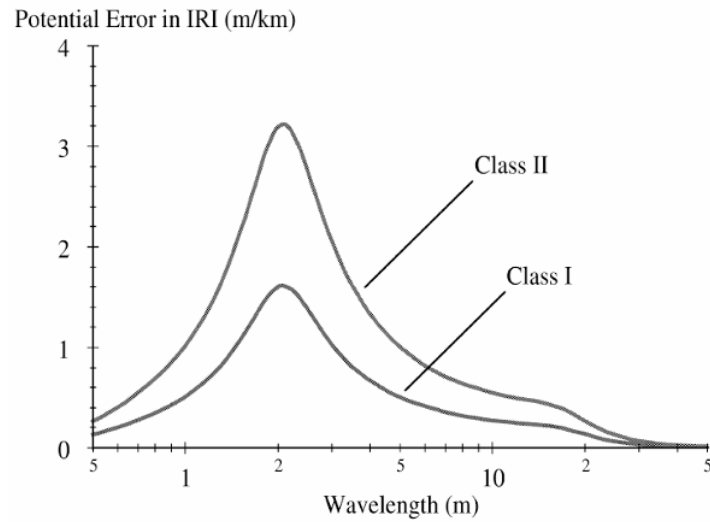


Figura 7. Errores teóricos en la obtención del IRI de acuerdo con la longitud de onda de los equipos de Clase I o II [15].

El error potencial de los equipos de IRI está asociado al Diferencial del IRI (Δ IRI, ganado/perdido), la amplitud de la onda del equipo de medición (A, Clase I 0.54 mm, Clase II 1.07 mm), la desviación estándar de los equipos de medición (Clase I 0.38 mm, Clase II 0.76 mm) [15].

Debido a estas discrepancias ocurridas durante las experimentaciones de clasificación que recomiendan algunos de los autores, es recomendable realizar evaluaciones de los equipos que sean de la misma clase para reducir el error teórico. A continuación, se muestran los equipos de IRI y sus clases usuales en la recolección de datos (Tabla 4) [15].

Tabla 4. Clasificación de los dispositivos para realizar mediciones de IRI [15].

Clase	Ejemplos comerciales	Nivel de detalle
Clase I	Perfiles de láser sin contacto, DipStick, Walking Profiler	Mayor detalle y comprensibles
Clase II	Perfilómetros (California, Rainhart), Perfilómetros inerciales	Detallados

Entonces, es posible recomendar que para poder realizar procesos de validación de datos se identifiquen los parámetros más significativos para los equipos de medición de índices de desempeño, debido a la incertidumbre involucrada en el proceso, por lo que es indispensable verificar cualquier aspecto estadístico.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

3 Resultados y conclusiones

Es importante señalar que hasta la fecha no se cuenta con un método que permita realizar estudios de auscultación de equipos que no presenten algún grado de incertidumbre en los resultados, o que estos sean reproducibles y exactos sin depender del dispositivo utilizado, operador o sistema de operación interna, por lo que este tema a nivel mundial se encuentra en un proceso de mejora continua.

Uno de los factores en los que más autores coinciden es que debe de aplicarse un procedimiento de entrenamiento y capacitación del personal, ya que son un paso fundamental durante el aseguramiento de la calidad de la colección de datos de análisis, porque se pretende reducir la incertidumbre por errores humanos.

Otro de los pasos importantes que mencionan varios autores es la implementación de sitios de validación interna cercanos al sitio en donde se encuentran los dispositivos (secciones de pavimentos que no se modifiquen con el tiempo debido a una intensidad alta de tránsito pesado) en los cuales se realicen recolecciones de datos diarios, semanales o mensuales, para poder corroborar el comportamiento histórico del dispositivo de medición, y de esta manera detectar alteraciones en los resultados de manera sistemática. Esta alternativa ha sido tomada por algunos DOT para algunos equipos con los que se implementan métodos considerados como “no destructivos”, como los empleados en la medición de IRI, coeficiente de fricción, profundidad de roderas, deflexiones y vacíos de aire en mezclas asfálticas.

En relación con los métodos de validación que se utilizan, al menos en los EUA, se observa una tendencia que favorece a los basados en correlación cruzada, ya que con esta técnica se analiza el área bajo la curva y se hace una comparación por segmentos de interés. Así, mientras que en la mayoría de los casos la atención se centra en el valor promedio (el valor “entregable”) del índice de desempeño, en el caso de la correlación cruzada adquiere relevancia la forma del perfil/curva registrado durante la medición.

A manera de síntesis, no existe una solución universal para el proceso de verificación y validación de datos, pero se cuenta con alternativas que se pueden combinar para obtener una mayor calidad en la auscultación de pavimentos, como es una posible combinación entre el proceso de gestión de calidad de los datos, implementando la capacitación y entrenamiento de los operadores, la medición de sitios de control interno de manera periódica para contar con un histograma de los resultados del equipo, y la verificación de las mediciones mediante correlación cruzada. Cabe mencionar que, en nuestro medio, se observa una alta rotación del personal operador, por lo que deben buscarse estrategias para evitar este fenómeno, que puede tener una influencia importante en la incertidumbre de las mediciones.

La mayoría de los métodos de la bibliografía consultada hacen referencia a que una adecuada gestión de los pavimentos puede hacer la diferencia para planificar acciones de mantenimiento de manera oportuna de acuerdo a los índices de desempeño, esto al final podrá traducirse como *“Estrategias sostenibles en la industria de los pavimentos”*.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

3 Referencias

- [1] Federal Highway Administration. (2018). *Guidelines for Development and Approval of State Data Quality Management Programs*.
- [2] U.S. Department of Transportation. (2023). *Successful Practices for Quality Management of Pavement Condition Data Collection and Analysis*. Federal Highway Administration.
- [3] TDOT (2018). *Guidelines on Quality Management of Pavement Condition Data*. Recuperado el 26 de junio de 2024.
- [4] International Transportation Forum (2018). *Policies to Extend the Life of Road Assets*. Transportation Research Board. Recuperado el 26 de junio de 2024 de: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/policies-extend-life-road-assets.pdf>
- [5] Missouri Department of Transportation. *REQUEST FOR PROPOSALS FOR Automated Data Collection Vehicles*.
- [6] Simpson, A. L., Serigos, P., Chang, G. K., & Merritt, D. K. (2023). *Enhancement of the Practice for Certification of Inertial Profiling Systems*. Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/27182>.
- [7] Karamihas, Steven M. (2002). *Development of Cross Correlation for Objective Comparison of Profiles*. University of Michigan Transportation Research Institute.
- [8] Karamihas, Steven M. (2009). *Benckmark Testing Plan*. University of Michigan Transportation Research Institute.
- [9] Sayers, Michael W., Karamihas, Steven M. (1998). *The Little Book of Profiling*. University of Michigan.
- [10] Dirección General de Carreteras, España. (2002). *Nota de servicio sobre la armonización de la medida del Índice de Regularidad Internacional (IRI) y la correlación entre los diferentes equipos de medida*. Recuperado el 27 de junio de 2024 de: http://www.carreteros.org/normativa/firmes/pdfs/otros_pdf/si/iri_2002.pdf
- [11] Arriaga P., Mario C., Garnica A., Paul, Rico R. Alfonso. (1998). *Índice Internacional de Rugosidad en la Red Carretera de México*. Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado el 27 de junio de 2024 de: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt108.pdf>
- [12] Liu, H., Li, Y., Liu, C., Shen, G., & Xiang, H. (2022). Pavement Distress Initiation Prediction by Time-Lag Analysis and Logistic Regression. *Applied Sciences*, 12(22), 11855. <https://doi.org/10.3390/app122211855>
- [13] The Transtec Group. (2016). *ProVAL User's Guide*.
- [14] White, G. (2019). *Evaluation of a non-nuclear density gauge as an alternate to destructive coring for airport asphalt acceptance testing*. *SN Applied Sciences*, 1(8), 921. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0958-6>.
- [15] Múčka, P. (2017). *International Roughness Index specifications around the world*. *Road Materials and Pavement Design*, 18(4), 929–965. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1197144>
- [16] Sayers, M. W., T. D. Gillespie, and W. D. Paterson. 1986. "Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements." Recuperado el 27 de junio de 2024 de: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/3133/72764.pdf>