



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Determinación del índice de serviciabilidad presente inicial más probable en pavimentos flexibles de nueva construcción en el medio mexicano.

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de:

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres

Presenta:

Alejandro Pérez Vázquez

Dirigido por:

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Querétaro, Qro. a 30 de abril de 2020



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres

Determinación del índice de serviciabilidad presente inicial más probable en pavimentos flexibles de nueva construcción en el medio mexicano.

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de:

Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres

Presenta:

Alejandro Pérez Vázquez

Dirigido por:

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Presidente

Dr. Eduardo Rojas González
Secretario

Dr. Omar Chávez Alegría
Vocal

Dr. J. Jesús Alonso Mota
Suplente

Mtro. Gerardo Medellín Aguilar
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Abril de 2020
México



Índice

I. Introducción	- 1 -
II. Antecedentes	- 4 -
II.I Concepto de serviciabilidad.....	- 4 -
II.II Calificación de la serviciabilidad	- 6 -
II.III Rugosidad en los pavimentos.....	- 7 -
II.IV Índice internacional de rugosidad.....	- 8 -
II.V Métodos para medir la regularidad superficial de los pavimentos	- 9 -
II.VI Índice de serviciabilidad en el diseño de pavimentos AASHTO 1993	- 9 -
II.VII Relación entre el IRI y el índice serviciabilidad	- 12 -
II.VIII Determinación del índice de serviciabilidad	- 13 -
II.IX Serviciabilidad y curva de comportamiento de un pavimento.....	- 17 -
II.X Caracterización de la rugosidad de los pavimentos	- 18 -
II.XI Desarrollo del concepto IRI	- 19 -
II.XII Definición del IRI	- 20 -
II.XIII Conceptos derivados de la definición.....	- 21 -
II.XIV Modelo del cuarto de carro (Quarter Car o Golden Car).....	- 22 -
II.XV Pasos para el cálculo del IRI a partir del perfil longitudinal	- 25 -
II.XVI Equipos para evaluar la rugosidad.....	- 26 -
II.XVII Relaciones entre PSI e IRI.....	- 29 -
II.XVIII Análisis estadístico de la información	- 30 -
III. Hipótesis	- 33 -
IV. Objetivo	- 33 -
V. Material y Métodos o Metodología.....	- 33 -
V.I Equipo y método para la obtención del IRI en campo	- 33 -
V.II Tipo y tamaño de la muestra utilizada en el análisis de datos.....	- 37 -
V.III Evaluación de la normalidad de la muestra.....	- 40 -
V.IV Descripción del experimento.....	- 42 -
V.V Procedimientos analíticos y estadísticos	- 44 -
VI. Resultados y discusión.....	- 52 -



VI.I Resultados	- 52 -
VI.II Discusión.....	- 55 -
VII. Conclusión.....	- 56 -
VIII. Bibliografía.....	- 58 -
Anexo 1	

Índice de tablas

Tabla 1. Escala de calificación de serviciabilidad según AASHO.	- 5 -
Tabla 2. Formulario de calificación AASHO.	- 6 -
Tabla 3. Valores del índice de serviciabilidad final sugeridos en la guía AASHTO 1993.....	- 11 -

Índice de figuras

Figura 1. Perfilómetro longitudinal AASHO.	- 14 -
Figura 2. Historia del deterioro de un pavimento.	- 17 -
Figura 3. Curvas para pavimentos con IRI distinto.	- 19 -
Figura 4. Modelo del cuarto de carro.	- 22 -
Figura 5. Modelo cuarto de carro propuesto por el Banco Mundial.....	- 35 -
Figura 6. Histograma de valores medios muestrales del IRI.....	- 41 -
Figura 7. Gráfica cuantilar normal.....	- 41 -
Figura 8. Distribución de medias muestrales del IRI.....	- 46 -
Figura 9. Distribución de medias muestrales del PSI.....	- 50 -
Figura 10. Curva de la potencia para prueba t.....	- 50 -
Figura 11. Variación del PSI respecto a los ejes equivalentes W18.	- 53 -
Figura 12. Variación del costo respecto al PSI.	- 54 -

Índice de imágenes

Imagen 1. Perfilómetro láser	- 29 -
Imagen 2. Pantalla de datos iniciales del perfilómetro láser	- 36 -



Dedicatorias

A la memoria de Fernando Viveros Viveros^t, colega y amigo.

Agradecimientos

- *A mi esposa, por su todo su apoyo, amor y comprensión que todo el tiempo me ha dado.*
- *A mis hijos, por ser mi motivación día a día y mis mejores maestros de la vida.*
- *A mis padres, por todo el apoyo y amor incondicional que siempre he tenido de ellos.*
- *A la Dra. María de la Luz Pérez Rea, por todo su apoyo, consejos y tiempo dedicado para culminar este trabajo de tesis.*

Dirección General de Bibliotecas UAQ



Resumen

En la actualidad en México se utiliza ampliamente el método de diseño de pavimentos presentado en la guía AASHTO 1993, el cual requiere para su aplicación del conocimiento del valor del PSI (Present Serviceability Index) en su etapa de puesta en operación del pavimento (Po), así como en la etapa final de su vida útil (Pt).

Conocer el valor del Po es de suma importancia, porque refleja las condiciones inherentes al proceso constructivo y sobre todo a las prácticas que se tienen en el medio mexicano, con la mano de obra y equipos disponibles en la construcción de carreteras, por lo que el tomar valores recomendados en otros países nos podría llevar a cometer errores grandes que derivarían en un sobre-diseño o sub-diseño del pavimento, lo que a su vez tendría consecuencias económicas no sólo en los trabajos de rehabilitación y conservación del pavimento, sino también en los costos de operación de los usuarios. Utilizar un valor del Po más alto del que realmente se obtiene en la puesta en operación de la carretera deriva en una falla aparentemente prematura del pavimento, con el consecuente gasto que erogaría el tener que rehabilitar antes de lo previsto el pavimento. Por el contrario, utilizar un valor del Po más bajo del obtenido en campo, resultaría en estimar una vida del pavimento más baja de lo que verdaderamente presentará el pavimento, llevando consigo un gasto adicional en la construcción inicial del pavimento por resultar en espesores mayores a los realmente necesarios.

En el presente trabajo se obtiene el valor estadísticamente más probable que se puede presentar del Po en el medio mexicano, con la finalidad de proporcionar a los proyectistas de pavimentos un valor adecuado a ser utilizado en la guía AASHTO 1993.

Palabras clave: Índice Internacional de Rugosidad, Índice de Servicio Actual, Serviciabilidad.



Abstract

At present in Mexico the method of design of pavements presented in the AASHTO 1993 guide is widely used, which requires for its application the knowledge of the value of the PSI (Present Serviciability Index) in its stage of operation of the pavement (P_o), as well as in the final stage of its useful life (P_t).

Knowing the value of the P_o is of the utmost importance, because it reflects the inherent conditions of the construction process and, above all, the practices that exist in the Mexican environment, with the labor and equipment available in road construction, so that the taking recommended values in other countries could lead us to make big mistakes that would lead to an over-design or sub-design of the pavement, which in turn would have economic consequences not only in the rehabilitation and maintenance of the pavement, but also in the user's operating costs. Using a P_o value higher than what is actually obtained in the start-up of the road leads to an apparently premature failure of the pavement, with the consequent expense that would require the rehabilitation of the pavement before it was planned. On the contrary, using a P_o value lower than that obtained in the field, would result in estimating a pavement life lower than what the pavement will actually present, leading to an additional expense in the initial construction of the pavement, resulting in greater thicknesses than the really necessary.

In the present work we obtain the statistically most probable value that can be presented of the P_o in the Mexican environment, in order to provide the pavement designers with an adequate value to be used in the AASHTO 1993 guide.

Keywords: International Roughness Index (IRI), Present Serviciability Index (PSI), Serviciability.



I. Introducción

El transporte terrestre por carretera comenzó un rápido proceso de transformación y desarrollo a partir de 1920 cuando los automóviles de uso personal ganaban cada vez más amplia aceptación y difusión. La demanda de caminos transitables en cualquier época del año, adecuados a la velocidad creciente de los vehículos a motor motivó el desarrollo de procedimientos de diseños empíricos, racionales y de nuevas tecnologías (Cal y Mayor, 2007).

En nuestro país el transporte por carretera es el de mayor contribución a la actividad nacional, por lo que es necesario que opere en base a parámetros de eficiencia. Por la red carretera fluye el 80% de las cargas que se mueven en el territorio y el 98% del movimiento de pasajeros; además, permite desarrollar los aspectos comercial, social e industrial, por lo que la influencia de las condiciones del camino en los costos de operación de los vehículos es significativa (Cal y Mayor, 2007).

Con la finalidad de diseñar estructuralmente los pavimentos, en nuestro país se había utilizado durante varios años el método desarrollado en los años sesentas por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1961) y actualmente llamado AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (AASHTO, 1993).

Es importante diferenciar entre las características funcionales y estructurales que presentan los pavimentos, ya que, si bien son características completamente distintas entre sí, son complementarias para poder tener una evaluación completa del estado del pavimento. Dicho lo anterior, es común encontrar pavimentos que presenten una adecuada capacidad estructural, mientras que su capacidad funcional puede ser deficiente como, por ejemplo, la presencia de escalonamiento entre losas en pavimentos de concreto o un mal tendido de la carpeta asfáltica pueden derivar en un camino altamente incómodo en su circulación, sobre todo si



se opera con velocidades altas, como es el caso de autopistas o vías federales importantes.

Es importante recalcar que las características funcionales no sólo dependen del nivel de irregularidad o confort que presenta la superficie del pavimento, sino también de otros parámetros tales como, el coeficiente de fricción y la textura, entre otros.

Con la finalidad de tomar en consideración las características funcionales de los pavimentos, se han desarrollado metodologías que toman en cuenta tal característica mediante diferentes índices, tal es el caso del método AASHTO 1993, que considera dentro de la ecuación del comportamiento del pavimento el indicador PSI (Present Serviceability Index), el cual considera como una de las variables de mayor peso la irregularidad superficial del camino, la cual, además de verse afectada por deficiencias en los procesos constructivos, la existencia de fallas en el pavimento, tal como, baches, agrietamiento, roderas, etc., provocan deficiencias en el confort de circulación del pavimento.

De lo anterior, se deriva que un pavimento no sólo puede fallar estructuralmente, sino también, funcionalmente, por lo que es importante conocer las limitantes en los procesos constructivos en el medio mexicano, ya que como se habló anteriormente, una falla funcional puede alcanzarse más rápido si se tienen pavimentos construidos con deficiencias desde la puesta en operación o recién rehabilitados, esto sobre todo cuando se inducen deformaciones en la superficie de rodamiento o en cualquier capa que conforma el pavimento, debido principalmente a los malos procesos constructivos.

Por lo tanto, en el presente trabajo se presenta una propuesta del valor del PSI inicial a utilizar en el modelo AASHTO 1993, como punto de partida o inicio en la degradación de la curva de comportamiento del pavimento, acorde a las posibilidades del medio mexicano, con la finalidad de modelar adecuadamente el comportamiento a lo largo de su vida útil.



Para realizar lo anterior, se han utilizado valores del IRI (Índice Internacional de Rugosidad), aprovechando las correlaciones existentes en la actualidad entre dicho valor y el PSI, además de ser un parámetro que se evalúa de manera común en nuestro medio, lo que facilita su aplicación.

De esta manera, en el presente trabajo se presenta un valor del PSI inicial obtenido a partir de correlaciones entre dicho valor y el IRI, el cual a su vez se determinó en varios tramos de la red carretera mexicana, los cuales fueron evaluados recién fueron construidos o puestos en operación. Obtenida dicha información, se procedió a realizar un análisis estadístico para obtener el intervalo de confianza, con lo cual se podrá obtener un intervalo de valores más probables a ser utilizados en el modelo AASHTO 1993, lo cual nos permitirá modelar situaciones más realistas y acordes al medio mexicano.

Dirección General de Bibliotecas UAQ



II. Antecedentes

II.I Concepto de serviciabilidad

En la evaluación de la calidad del pavimento puede existir una dificultad conceptual, ya que es importante tener claro para qué se está evaluando, es decir, para determinar su capacidad estructural o bien su condición funcional. Si bien, cualquiera que sea la finalidad de la evaluación, actualmente existen equipos de evaluación de alto desempeño que permiten obtener los parámetros necesarios, aunque independientemente de ello es importante que todos se ciñan a una misma normativa o metodología estandarizada para poder obtener resultados comparables entre sí, de tal manera que los resultados no varíen significativamente de una persona a otra o de un equipo a otro, es decir, cualquier método que se utilice debe carecer de toda subjetividad con la finalidad de eliminar errores de apreciación entre diferentes evaluadores, y de un pavimento a otro. Para resolver esta dificultad, en la prueba AASHO desarrollada en la década de los 60's se presentó un método cuyas suposiciones son las siguientes (de Sominihac, 2005):

- El pavimento debe proporcionar confort y seguridad al usuario.
- El confort y la calidad del rodado es un aspecto subjetivo o de opinión del usuario.
- La serviciabilidad puede determinarse a partir del promedio de las evaluaciones de todos los usuarios. Este procedimiento da origen al PSR (Present Serviciability Rating), el cual, por su naturaleza tiene carácter subjetivo.
- Hay algunas características del pavimento que pueden medirse objetivamente y pueden relacionarse con las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento permite obtener un índice objetivo denominado PSI (Present Serviciability Index).



- El comportamiento del pavimento puede ser representado por la historia de la serviciabilidad de dicho pavimento.

Como se dijo, la serviciabilidad es entonces la percepción u opinión que tienen los usuarios acerca del nivel de servicio que tienen el pavimento. Es por ello que la opinión de dichos usuarios es la que debe ser medida o calificada para obtener el nivel de serviciabilidad.

Con esta finalidad, se definió una escala de evaluación de 0 a 5, donde 0 representa un camino intransitable, mientras que 5 un pavimento con superficie en perfectas condiciones. En la tabla 1 se muestra la escala de evaluación (AASHO, 1961):

Tabla 1. Escala de calificación de serviciabilidad según AASHO.

Calificación		Descripción
Númerica	Verbal	
5 – 4	Muy buena	Sólo pavimentos nuevos (o casi nuevos) son lo suficientemente suaves y sin deterioro para clasificar en esta categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos o reencarpetados durante el año de inspección normalmente se clasifican como muy buenos.
4 – 3	Buena	Los pavimentos de esta categoría, si bien no son tan suaves como los “Muy buenos”, entregan un manejo de primera clase y muestran muy poco o ningún signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden empezar a mostrar algún signo de roderas y agrietamiento aleatorio. Los pavimentos rígidos pueden estar comenzando a mostrar evidencias de un leve deterioro superficial, como desconches y fisuras menores.
3 – 2	Regular	En esta categoría la calidad del manejo es notablemente inferior a la de los pavimentos nuevos, y puede presentar problemas para altas velocidades de tránsito. Los defectos superficiales en pavimentos flexibles pueden incluir roderas, baches y agrietamiento. Los pavimentos rígidos en este grupo pueden incluir fallas en las juntas, agrietamiento, escalonamiento de juntas y bombeo de finos.
2 – 1	Mala	Los pavimentos en esta categoría se han deteriorado hasta un punto donde pueden afectar la velocidad de tránsito de flujo libre. Los pavimentos flexibles pueden presentar grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye desprendimiento, agrietamiento y roderas, y ocurre en un 50% o más de la superficie. El deterioro en pavimentos rígidos incluye desconche de juntas, escalonamiento, baches, agrietamiento y bombeo.
1 – 0	Muy mala	Los pavimentos en esta categoría se encuentran en una situación de extremo deterioro. Los pavimentos se pueden circular a velocidades reducidas y con considerables problemas de manejo. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75% o más de la superficie.



II.II Calificación de la serviciabilidad

El procedimiento a seguir para la determinación de la serviciabilidad es la de formar un grupo de 5 personas para formar un panel evaluador, el cual representa a los usuarios de los caminos. Una vez seleccionadas las personas, estas en un mismo vehículo recorren los tramos de caminos indicados, con lo que cada uno emite a su juicio su opinión subjetiva acerca de la calidad de rodamiento o irregularidad del pavimento, lo cual se registra en una cartilla especialmente diseñada para tal fin. En la prueba AASHO cada calificación individual se denomina IPSR (Individual Present Serviabiability Rating) y con el promedio de estos valores se obtiene el PSR (Present Serviabiability Rating) de cada tramo evaluado. Además de lo anterior, se juzga conveniente que cada evaluador describa su opinión acerca de la condición general en el sentido de encontrar o no adecuado el estado del pavimento, siempre desde el punto de vista subjetivo del usuario del camino, ya que con esta información es posible determinar el umbral de la serviciabilidad final (Arriaga et. al, 1998).

En la tabla 2 se esquematiza el formato de la AASHO para la determinación de la serviciabilidad.

Tabla 2. Formulario de calificación AASHO.

Calificador: _____	Fecha: _____
¿Aceptable?	Calificación
Sí _____	5 _____
No _____	4 _____ Muy bueno
Indeciso _____	3 _____ Bueno
	2 _____ Regular
	1 _____ Malo
	0 _____ Muy malo
Identificación del tramo _____	
Calificación del tramo _____	



II.III Rugosidad en los pavimentos

Como comentario inicial, es importante mencionar que en el desarrollo del presente trabajo se denominará a las irregularidades superficiales que se presentan en los caminos como “Rugosidad”, como una mala traducción del inglés “Roughness”, sobre todo debido a lo ya extendido en el medio mexicano de este término que se ha relacionado con la calidad del rodado.

Habiendo aclarado lo anterior, conviene antes de entrar en materia definir por tanto el término “rugosidad”. La rugosidad se define como las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan adversamente a la calidad del rodado, seguridad y costos de operación vehicular (de Sominihac, 2005).

En la práctica, la rugosidad tiene el mayor efecto en la evaluación de los usuarios que califican la calidad del rodado. Por eso, aun cuando las ecuaciones contienen términos relacionados con el deterioro visual, muchas investigaciones y agencias viales relacionan directamente el PSI con la rugosidad. Uno de los grandes problemas que se encuentran los técnicos acerca del tema es que existen en diferentes países técnicas y equipos distintos para valorar la comodidad y calidad de la rodadura de los vehículos y para comparar experiencias obtenidas derivadas de los datos obtenidos, con lo que se vuelve una tarea imposible realizar dichas comparaciones.

Como consecuencia de lo mencionado anteriormente, se planteó a nivel internacional la tarea de desarrollar un índice único y común al cual referirse, que fuera independiente del equipo o técnica de obtención de la geometría del perfil, y que además representara significativamente a los usuarios circulando en un vehículo tipo medio a una velocidad promedio, de donde se desarrolló el concepto, definición y método de cálculo del IRI (Índice Internacional de Rugosidad) (Sayers, 1986).



II.IV Índice internacional de rugosidad

El IRI es un indicador estadístico de la irregularidad superficial del pavimento, al igual que otros indicadores representa la diferencia entre el perfil longitudinal teórico (recta o parábola continua perfecta, $(IRI=0)$), y el perfil longitudinal real existente en el instante de la medida.

El perfil real de una carretera presenta siempre valores del IRI superiores a cero, esto debido a condicionantes en los procedimientos constructivos. Una vez puesta en servicio la carretera, comienza a desarrollarse un proceso de degradación del pavimento en donde se generará un incremento del IRI de manera paulatina hasta llegar a valores lo suficientemente altos como para llegar a ser intransitable ($ISA=0$).

El IRI se determina mediante el cálculo matemático realizado a partir de las ordenadas o cotas del perfil longitudinal, obtenida por cualquier técnica o equipo de medida del perfil (equipo topográfico, equipos electrónicos con láser, etc.).

Las consideraciones más importantes sobre el IRI son:

- Su principal ventaja reside en que el IRI es un modelo matemático cuyo resultado es independiente de la técnica o equipo con que se haya obtenido el perfil.
- Para el cálculo del IRI es importante considerar la representatividad de las ordenadas que se introducen, es decir, la confiabilidad de la técnica o equipo con el que se obtiene el perfil y la frecuencia del muestreo del mismo.
- La precisión de los equipos de medida de la irregularidad superficial es uno de los temas más delicados y complejos de decidir y valorar.

Actualmente se puede decir que la medida del IRI es ampliamente aceptado y utilizado en prácticamente todo el mundo.



II.V Métodos para medir la regularidad superficial de los pavimentos

En la actualidad existen diversos métodos para determinar la regularidad superficial, los cuales se clasifican principalmente en dos grupos, atendiendo sobre todo a qué tanto se aproximan sus resultados al valor real del IRI (Karamihas & Sayers, 1998).

a) Clase 1. Perfiles de precisión

Esta clase representa los más altos niveles de precisión para la obtención del IRI. Un método Clase 1 requiere que el perfil longitudinal de una huella sea medida en forma precisa y que sea definido por una serie de elevaciones en puntos separados a una pequeña distancia. En la actualidad los métodos con estadal y nivel fijo, así como los modernos equipo láser que pueden realizar mediciones a velocidades por encima de los 80 km/h pertenecen a esta clasificación.

b) Clase 2. Otros métodos perfilométricos

Esta clase abarca los métodos que, si bien obtienen el IRI a partir de un perfil longitudinal, no presentan la precisión de los de Clase 1. En esta clasificación se incluyen también algunos perfilómetros de alta velocidad antiguos como el perfilómetro inercial GMR (General Motor Research) (de Sominihac, 2005).

II.VI Índice de serviciabilidad en el diseño de pavimentos AASHTO 1993

Como se definió anteriormente, la serviciabilidad de un pavimento es definida como su habilidad de servir al tráfico (vehículos ligeros y pesados) que por este circula. Si bien, cualquier pavimento desde el punto de vista teórico puede presentar cualquier valor entre la escala de 0 a 5, es importante recalcar que el rango de valores reales en la práctica se adapta a un intervalo más cerrado, ya que sería imposible obtener valores por ejemplo de 5, ya que los procedimientos constructivos conllevan ciertas variaciones en los perfiles longitudinales respecto al teórico, lo cual necesariamente nos llevará a obtener un valor más bajo. Por otro lado, también sería impráctico



considerar que un camino puede llegar a caer hasta valores cercanos o iguales a cero, ya que no tendría mucho sentido llevar el pavimento a tan bajo nivel en donde ya no sería posible siquiera transitarlo.

De lo anterior se desprenden ciertos límites que se recomiendan sobre todo en la guía de diseño de pavimentos AASHTO (AASHTO, 1993), en donde se mencionan los valores posibles de considerar en el diseño de pavimentos; claro está que estos valores deberán utilizarse a menos que no se cuente con registros reales de los posibles valores a obtener en los pavimentos.

La base del diseño presentado en la guía AASHTO 1993 es el concepto de serviciabilidad mencionado previamente, es decir, se busca diseñar estructuras de pavimento para el nivel de tráfico deseado, así como para un cierto nivel de serviciabilidad inicial (al momento de poner en operación el pavimento) y otro final (en el momento en que se considera que pavimento no cumple con el desempeño deseado). Tomando en consideración que el resultado obtenido por esta metodología es altamente sensible a este parámetro, resulta imprescindible evaluar los valores de serviciabilidad inicial y final reales que se pueden obtener en la red de carreteras mexicanas con la finalidad de obtener valores más confiables a la hora de analizar las estructuras.

Es importante mencionar que el método de la AASHTO 1993 es utilizado en la mayoría de los diseños de pavimentos que hoy en día se realizan en el medio mexicano, de ahí la importancia de tener una base teórica que fundamente los valores reales posibles de obtener del índice de serviciabilidad inicial y final.

La guía AASHTO 1993 recomienda el uso del valor del índice de serviciabilidad inicial de 4.2, por ser el valor original obtenido en pavimentos flexibles de nueva construcción en la prueba AASHO, así como de 4.5 para pavimentos rígidos de nueva construcción.

La guía también recomienda algunos valores que se pueden adoptar para el índice de serviciabilidad final, en función sobre todo de la importancia de la carretera y del



porcentaje de personas que consideran inaceptable el pavimento. Los valores se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Valores del índice de serviciabilidad final sugeridos en la guía AASHTO 1993.

Nivel de servicio terminal	% de personas que consideran inaceptable el pavimento.
3	12
2.5	55
2	85

Por tanto, aunque la guía incluye algunos valores del índice de servicio inicial y final en caso que no se cuente con información particular de la zona, en donde se tomen en cuenta los procedimientos constructivos y otros factores importantes que definirán el desempeño del pavimento, es importante conocer los valores reales que se derivan de las prácticas mexicanas con la finalidad de obtener diseños más cercanos a la realidad, ya que dichos valores impactan de manera directa los espesores finales obtenidos, pudiendo obtener estructuras sub-diseñadas o sobre-diseñadas que de igual manera impactarán en la economía del país.

En México a pesar de que ya hace varias décadas que se diseñan los pavimentos para el propósito específico que demandan las carreteras mexicanas, hasta ahora no se cuenta con estudio que indique cuál es valor del P_o (Índice de Serviciabilidad Presente Inicial) que debe tomarse, por lo que desde ya hace varios años hasta épocas más recientes se han utilizado los valores recomendados en manuales norteamericanos para efectuar tal diseño. El P_o es un parámetro muy importante en el diseño del pavimento, y el valor que se adopte para realizar los cálculos afecta directamente los resultados obtenidos, siendo la ecuación general de la AASHTO 1993 para determinar los ejes equivalentes que resiste el pavimento altamente sensible a este dato.



II.VII Relación entre el IRI y el índice serviciabilidad

La relación que existe entre la serviciabilidad y la rugosidad se establece comúnmente a partir de los valores del IRI obtenidos, así como los valores del PSR, ambos parámetros definidos anteriormente. Por un lado, se obtienen los valores del IRI por medio de un perfilómetro láser, y por el otro se obtienen los distintos valores del PSR como los promedios para cada tramo de las calificaciones individuales obtenidas por cada persona del panel de evaluadores.

Es importante recordar que el IRI mide la regularidad del camino, factor con más peso en la determinación del PSR, ya que es lo que el panel de evaluadores siente en primera instancia, y por tanto considera más significativo para la determinación de la calificación asignada a cada tramo.

Cuando se establecen ecuaciones que predicen los valores del PSR a partir de mediciones objetivas como la rugosidad, entonces se habla de PSI (Present Serviciability Index) para diferenciarlo del PSR (Present Serviciability Rating) que proviene directamente del panel de usuarios (evaluación subjetiva).

Como se verá más adelante, si bien existe una metodología objetiva para la determinación del PSI, ésta resulta engorrosa y lenta cuando se consideran varios kilómetros de carretera, además que desde hace ya varias décadas se optó a nivel mundial por utilizar el IRI como indicador de la rugosidad, por lo cual resulta de suma importancia tener una referente del PSI a partir del IRI, el cual podría calcularse a partir de ecuaciones ya existentes que correlacionan ambos parámetros, por lo que el problema se reduce sólo a determinar el valor más común del IRI obtenido de un muestreo aleatorio e independiente de diferentes tramos recién construidos en el medio mexicano, para poder determinar por medio de correlaciones el valor del PSI inicial (P_0) que debe adoptarse en el diseño.

En este momento podríamos preguntarnos si efectivamente el perfil longitudinal es el parámetro que más influye en la determinación de la rugosidad, de tal manera



que sirva para ser correlacionado directamente con el PSI, el cual toma en cuenta además de dicho perfil, la existencia de baches, agrietamiento y deformaciones. En realidad, cuando se realiza la evaluación del IRI se debe recordar que los valores obtenidos se ven afectados por la existencia de baches, roderas, y agrietamientos, así como efectos ambientales; como se puede apreciar en el modelo de deterioro utilizado por HDM-4 (Highway Development & Management), por lo que la aportación a la irregularidad que estos parámetros tienen sobre el IRI queda incluida en los valores obtenidos (Keraly & Odoki, 1987).

II.VIII Determinación del índice de serviciabilidad

En forma simultánea a la calificación de la serviciabilidad de tramos característicos realizada por la prueba AASHO, se buscó establecer una relación entre esta calidad de servicio y otros indicadores del deterioro de la superficie de rodado. Desde el punto de vista de los usuarios, quedó en evidencia que las causas determinantes en la calificación de la serviciabilidad eran las deformaciones del perfil longitudinal, las irregularidades producidas por baches y sellado de grietas, las variaciones del perfil transversal, así como el desprendimiento de áridos en los bordes y las grietas. Se realizaron, en consecuencia, medidas de los diferentes parámetros que caracterizan el estado físico del pavimento para los tramos calificados con la serviciabilidad (PSR) (de Sominihac, 2005).

a) Medida de los indicadores de deterioro

En primer término, y como indicador de la deformación longitudinal, se midió la irregularidad superficial del pavimento, es decir, las desviaciones del perfil longitudinal. En un tramo homogéneo, la dispersión de esta distribución es constante en todo el tramo.

El instrumento usado para medir las variaciones del perfil longitudinal en la prueba AASHO fue el perfilómetro longitudinal mostrado esquemáticamente en la figura 1.

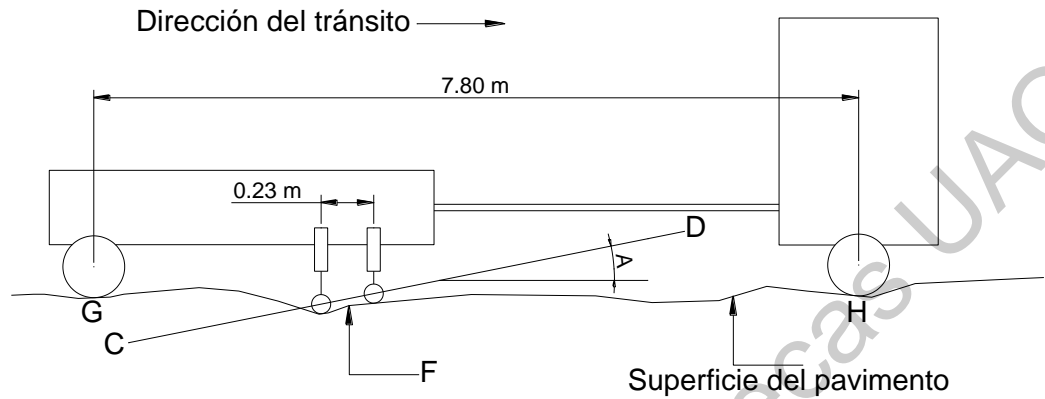


Figura 1. Perfilómetro longitudinal AASHO.

Se trata de un perfilómetro remolcado por un vehículo a una velocidad de 8 km/h. La irregularidad del pavimento es medida mediante el cambio de ángulo entre dos líneas de referencia, una de las cuales está determinada por la línea CD que une los centros de dos pequeñas ruedas separadas a 0.23 m, y la otra línea GH que une el punto de apoyo del eje de ruedas trasero del perfilómetro y el punto de apoyo del eje de ruedas traseras del vehículo de arrastre. Por tratarse de ángulos pequeños, la tangente del ángulo A es interpretada como la pendiente del pavimento sobre una distancia de ejes de 0.23 m. Un mecanismo de funcionamiento permanente permitió obtener el registro continuo de la pendiente a intervalos de 0.30 m conforme el perfilómetro recorre el tramo a medir.

De entre las múltiples variables con que se midió la irregularidad del pavimento, el promedio de las varianzas de la pendiente en ambas huellas, demostró la mejor correlación estadística con la calificación de serviciabilidad, por lo que se adoptó como una de las variables claves en el deterioro de un pavimento. El valor de SV (varianza de la pendiente longitudinal) es un parámetro que representa la rugosidad



de la sección del pavimento, y corresponde a la varianza de la distribución de irregularidades (AASHO, 1961).

En cuanto a las deformaciones transversales, para los pavimentos de asfalto, se midieron las diferencias de cota existentes entre el centro de cada huella y una línea que conecta dos puntos ubicados (transversalmente) a 0.61 m de su eje. Estas medidas se repitieron para ambas huellas cada 6 m, calculándose finalmente el promedio de la profundidad de las roderas, parámetro que demostró una buena correlación con la calificación de la serviciabilidad.

En cuanto al deterioro de la superficie en pavimentos asfálticos, se determinó el porcentaje de daño que presentaba agrietamiento tipo piel de cocodrilo. Se encontró que las grietas aisladas y finas no influyen de manera significativa en la serviciabilidad. Por último, se consideró también la superficie de baches para correlacionarla con la serviciabilidad.

b) Expresión analítica del índice de serviciabilidad

Una vez medidos los diferentes indicadores de deterioro señalados en el punto anterior, en los tramos de pavimentos seleccionados en la prueba AASHO para diferentes localidades de modo de cubrir todo el espectro de posibilidades de formas y grados de deterioro, se procedió a buscar una posible correlación entre la calificación de la serviciabilidad y los valores numéricos de los mencionados indicadores de deterioro medidos sobre el pavimento de cada tramo de prueba.

Fue hecho entonces un análisis de regresión estadístico que relacionó el PSR con las fallas medidas. Como resultado de este análisis se obtuvieron las ecuaciones del índice de serviciabilidad presente, el cual es una estimación del PSR basado en la rugosidad y el deterioro.

De esta manera, el índice obtenido por la ecuación de regresión incluye los términos de rugosidad y deterioro, los cuales se correlacionan bien con la estimación subjetiva del PSR de un grupo de usuarios. La ecuación original para pavimento



asfáltico desarrollada para el cálculo del PSI se muestran a continuación (Ullidtz, 1987):

$$PSI = 5.03 - 1.9 \log(1 + SV) - 1.38RD^2 - 0.01\sqrt{C + P} \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

SV=varianza de la pendiente longitudinal (in/ft²).

RD=rodera promedio, in.

C=superficie agrietada, ft².

P=superficie con bacheada, ft².

Considerando el alto grado de correlación existente entre la calificación de la serviciabilidad por parte del usuario y ciertas variables que miden cuantitativamente el deterioro físico de un pavimento, el concepto inicial de serviciabilidad (en términos de la opinión de un usuario), fue reemplazado por un índice de serviciabilidad (PSI) calculado según la relación anterior, a partir de algunos parámetros medidos con absoluta objetividad.

Como se puede observar en la ecuación original del PSI obtenida por la AASHO, este valor depende además de las características del perfil longitudinal, de otros parámetros como agrietamiento, deformaciones y baches, sin embargo, existen estudios en donde se demuestra que se puede determinar el PSI correlacionándolo sólo con el valor de SV. En el desarrollo de la ecuación siguiente se encontró un coeficiente de correlación entre el PSI y SV de 0.88, lo cual demuestra que los valores de baches, grietas y deformaciones influyen poco en el valor final del PSI (Yoder & Witczac, 1975).

$$PSI = 4.29 - 0.40\sqrt{SV} \dots\dots\dots(2)$$

Donde SV es la varianza del perfil evaluado.

II.IX Serviciabilidad y curva de comportamiento de un pavimento

La evaluación del comportamiento del pavimento implica inevitablemente estudiar la respuesta funcional de un tramo o sección de camino. Para analizar este comportamiento funcional del pavimento se necesita información de la calidad de rodadura durante el periodo en estudio y de los datos históricos de tránsito que ha estado solicitando al pavimento durante ese periodo.

La historia del deterioro de la calidad de rodadura o nivel de servicio es lo que se define como curva de comportamiento del pavimento. En la figura 2 se muestra la variación del ISA (Índice de Servicio Actual) a lo largo del tiempo para un pavimento.

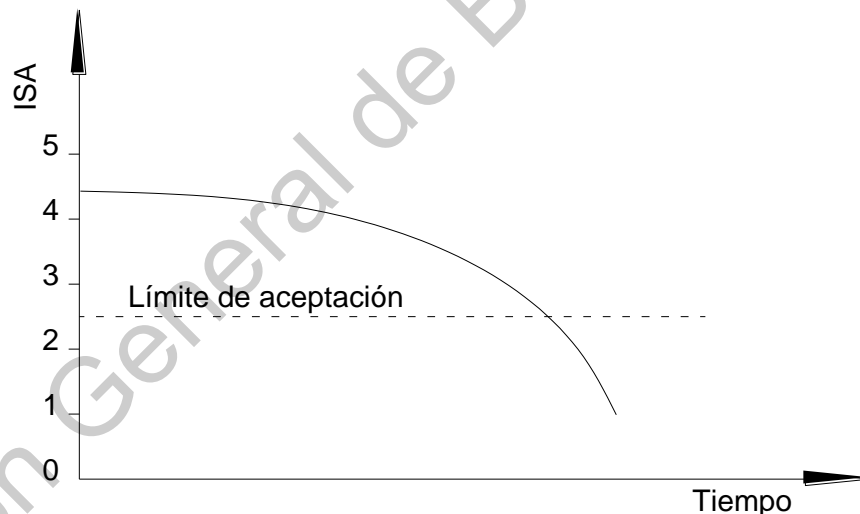


Figura 2. Historia del deterioro de un pavimento.

El índice de serviciabilidad se registró periódicamente para cada uno de los circuitos de prueba de la experiencia AASHO, durante todo el tiempo en que ésta se realizó. Este registro constituyó la historia del comportamiento del pavimento desde su puesta en servicio hasta el fin de la prueba, reflejada en un indicador único que,



incluyendo parámetros del deterioro físico, estima el nivel de servicio al usuario en cada momento de la prueba.

Como puede apreciarse, si bien el concepto original de serviciabilidad y su calificación por parte del usuario son claramente subjetivos, es posible pasar luego a la idea de un índice de serviciabilidad que, medido en términos cuantitativos, representa esa misma capacidad de servir del pavimento al usuario.

Finalmente, es posible determinar una relación que explica la evolución del índice de serviciabilidad en función de las características de diseño de un pavimento y las cargas solicitantes. Esta información empírica forma la base de las ecuaciones de diseño estructural desarrolladas a partir de la prueba AASHO.

II.X Caracterización de la rugosidad de los pavimentos

La rugosidad se define como las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan adversamente a la calidad del rodado, seguridad y costos de operación del vehículo. En las ecuaciones para el PSI, la medida de la rugosidad indicada por la variación de la pendiente SV, domina los valores estimados de serviciabilidad. En la práctica, esto significa que la rugosidad tiene el mayor efecto en la evaluación de los usuarios que califican la calidad del rodado.

Por eso, aunque las ecuaciones contienen términos relacionados con el deterioro visual, muchas investigaciones y agencias viales relacionan directamente el PSI con mediciones de rugosidad.

Uno de los problemas con los que se encuentran los técnicos a la hora de valorar la calidad y comodidad de la rodadura de los vehículos y de comparar entre países, es la gran diversidad de técnicas, equipos e indicadores existentes en cada país.

Como consecuencia de ello se planteó a nivel internacional el interés de desarrollar un índice único y común al que referirse, que fuera independiente del equipo y

técnica de obtención de la geometría del perfil y que además representara significativamente el conjunto de las percepciones de los usuarios circulando en un vehículo medio a una velocidad media. Estas necesidades dieron lugar a la celebración del experimento internacional denominado IRRE (International Road Roughness Experiment), uno de cuyos frutos fue el desarrollo del concepto, definición y método de cálculo del IRI (Sayers, 1986).

II.XI Desarrollo del concepto IRI

La definición del IRI se establece a partir de conceptos asociados a la mecánica vibratoria de sistemas dinámicos; en base a ella un vehículo se puede modelar, simplificadaamente, por un conjunto de masas ligadas entre sí y con la superficie de la carretera mediante resortes y amortiguadores.

El movimiento sobre el perfil de la carretera produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las masas. Todo el sistema queda regido por la primera ley de Newton: Fuerza = Masa x Aceleración.

La importancia de este concepto va directamente relacionada con el comportamiento del pavimento en su vida útil. En la figura 3 se puede observar cómo un pavimento con IRI inicial más bajo puede soportar muchos más vehículos que uno con mayor IRI inicial.

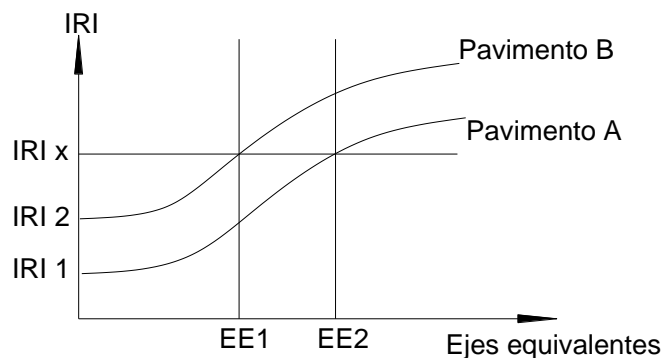


Figura 3. Curvas para pavimentos con IRI distinto.



II.XII Definición del IRI

EL IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie del camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico, está definido por el valor de la referencia de la pendiente promedio rectificadas $RARS_{80}$ (Reference Average Rectified Slope, razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida) producto de la simulación del modelo del cuarto de carro RQCS (Reference Quarter Car Simulation), para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h. Es calculado a partir de las elevaciones de la superficie medidas mediante un levantamiento topográfico o perfilometría (de Sominihac, 2005).

El IRI es la acumulación del movimiento entre la masa amortiguada y la no amortiguada, cuando se simula el paso del modelo del cuarto de carro, o técnicamente llamado RTRRMS (Response Type Road Roughness Measuring System), normalizado por el largo del perfil. El IRI también llamado por su nombre técnico $RARS_{80}$, debe cumplir con las siguientes cinco condiciones (Sayers, 1986):

- Es calculado a partir de un solo perfil. El intervalo de muestreo del perfil debería ser menor a 300 mm para cálculos precisos. La resolución requerida depende del nivel de rugosidad, necesitándose resoluciones más finas para pavimentos más lisos. Una resolución de 0.5 mm en la obtención del perfil es apropiada para todas las condiciones.
- Se asume que el perfil tiene una pendiente constante entre puntos contiguos de elevación.
- El perfil es primero suavizado mediante el uso de medias móviles cuyo largo base es de 250 mm. Esto es realizado por dos motivos; la idea es simular el comportamiento de la envolvente de los neumáticos y reducir la sensibilidad de la simulación del cuarto del carro al espaciamiento de muestreo del perfil longitudinal.



- El perfil suavizado es filtrado utilizando la simulación del cuarto de carro, RQCS (Reference Quarter Car Simulation), con sus parámetros específicos, a una velocidad de 80 km/h.
- El movimiento de la suspensión simulada es acumulada y dividida por el largo del perfil para así obtener el valor de IRI, es de esta forma que el IRI es expresado, generalmente en unidades m/km o in/mi.

II.XIII Conceptos derivados de la definición

Si se cuenta con el IRI calculado de dos secciones contiguas, el IRI sobre la sección que es la suma de las dos es simplemente el promedio de los IRI de cada sección. A una velocidad de simulación de 80 km/h, la inicialización afecta la respuesta del modelo del cuarto de carro. La mejor forma de tratar con este problema es comenzar a medir el perfil 20 m antes de la sección a evaluar. El cálculo del IRI esta linealmente relacionado con las variaciones en el perfil, es decir si las elevaciones del perfil aumentan al doble, el resultado del cálculo del IRI también aumentará al doble.

El IRI está definido como una propiedad de un solo perfil longitudinal, por lo tanto, si se desea establecer un valor por pista se deberían establecer ciertos criterios de cuántos perfiles tomar, generalmente se toman los perfiles en ambas huellas de cada pista para así derivar un valor por pista.

Los sitios de prueba utilizados en el desarrollo del concepto de IRI contaban con un largo mínimo de 320m. El IRI puede ser calculado sobre cualquier longitud de camino; sin embargo, los usuarios deben entender que el cálculo del IRI depende altamente sobre qué longitud es acumulado. Es fundamental entender la relación que existe entre variación de rugosidad a lo largo del camino y el largo del camino sobre el cual la rugosidad es promediada.

II.XIV Modelo del cuarto de carro (Quarter Car o Golden Car)

El modelo del vehículo que se utiliza para filtrar el perfil longitudinal y luego calcular el IRI es el modelo del cuarto de carro o también llamado RQCS (Reference Quarter Car Simulation). El modelo del cuarto de carro utilizado en el algoritmo para el cálculo del IRI es sólo lo que su nombre indica: un modelo de una sola rueda, para la cual su condición de amortiguación se ha preestablecido, y no representa ningún vehículo en particular (ASTM, 1995). El modelo es mostrado esquemáticamente en la figura 4: incluye una rueda, representada por un resorte, k_t , la masa del eje representado por la rueda, m_u , un resorte k_s y un amortiguador c_s , y la masa m_s soportada por la suspensión de la rueda.

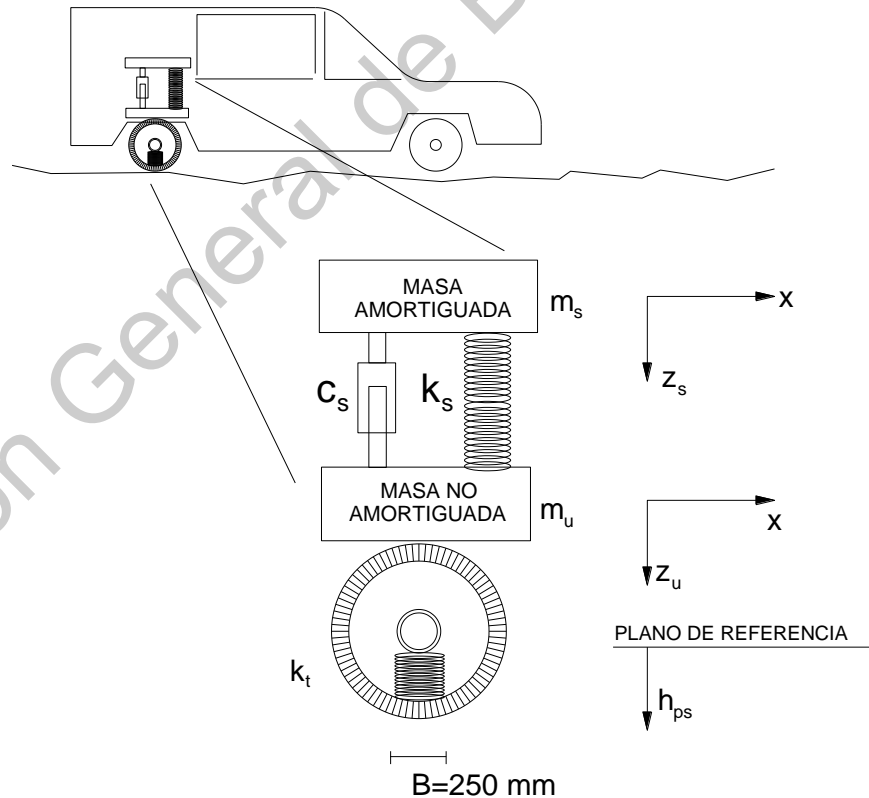


Figura 4. Modelo del cuarto de carro.



Ecuación del movimiento de la masa amortiguada:

$$m_s \ddot{z}_s = k_s (z_u - z_s) + c_s (\dot{z}_u - \dot{z}_s) \dots\dots\dots(3)$$

Ecuación del movimiento de la masa no amortiguada:

$$m_u \ddot{z}_u = k_s (z_s - z_u) + k_T (h_{ps} - z_u) + c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

\dot{z}_s y \dot{z}_u representan el cambio o variación de la distancia vertical correspondiente a la masa no amortiguada.

z_s : altura de la masa amortiguada.

z_u : altura de la masa no amortiguada.

Estas ecuaciones planteadas como un sistema de ecuaciones diferenciales quedan de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_s \\ \dot{z}_s \\ \dot{z}_u \\ \dot{z}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{u} & \frac{c}{u} & -\frac{k_1+k_2}{u} & -\frac{c}{u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_s \\ z_s \\ z_u \\ z_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_1}{u} \end{bmatrix} h_{ps} \dots\dots\dots(5)$$

Donde las condiciones iniciales son:

\dot{z}_s y \dot{z}_u se asumen iguales a la altitud del perfil al inicio del recorrido



\dot{z}_s y \dot{z}_u se asumen iguales al cambio del perfil por segundo a una velocidad de simulación de 80km/h (a una velocidad de 80km/h se recorren alrededor de 11 m en medio segundo).

Los parámetros del modelo de cuarto de carro son:

$$U = m_u/m_s = 0.15 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$k_2 = k_s/m_s = 63.3 (s^{-2}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$c = c_s/m_s = 6.0 (s^{-1}) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$k_1 = k_t/m_s = 653 (s^{-2}) \quad \dots\dots\dots(9)$$

Las variables son:

c_s : Razón de amortiguación

h_{ps} : Elevación del perfil suavizado

k_s : razón de suspensión

k_t : razón de suspensión del neumático

m_s : masa amortiguada (carrocería del modelo)

m_u : masa no amortiguada (rueda y eje)

z_s : altura de la masa amortiguada

z_u : altura de la masa no amortiguada

Las ecuaciones diferenciales que definen el movimiento de las masas de este modelo más las condiciones iniciales, para un perfil dado mediante una serie de puntos discretos, son las que permiten el cálculo de IRI.



II.XV Pasos para el cálculo del IRI a partir del perfil longitudinal

Para el cálculo del IRI se seguirán los siguientes pasos (Sayers, 1986):

Medir el perfil longitudinal con un espaciamiento de muestreo no superior a 300 mm y una resolución de 0.5 mm:

$$(h_{pi}, h_{pi+1}, h_{pi+2}, \dots) \dots\dots\dots(10)$$

Inicializar las variables para la simulación del modelo del cuarto de carro:

$$S_s, \dot{S}_s, S_u, \dot{S}_u)_1 = ((h_{p,Lo/D} - h_{p,1})/L_0, 0, (h_{p,Lo/D} - h_{p,1}) /L_0, 0) \dots\dots\dots(11)$$

Con $L_0 = 11$ m y $D =$ espaciamiento de muestreo no mayor a 300 mm.

Suavizar el perfil mediante el uso de medidas móviles, con un largo base de 250 mm:

$$(h_{pi}, h_{pi+1}, h_{pi+2}, \dots) \dots\dots\dots(12)$$

Simular el modelo del cuarto de carro, sobre el perfil suavizado, para obtener el movimiento de las masas amortiguada y no amortiguada:

$$(S_{si}, S_{si+1}, S_{si+2}, \dots) \dots\dots\dots(13)$$



Calcular el IRI mediante la siguiente formula:

$$IRI = \frac{1}{n} \sum_{j=i}^n |s_{sj} - s_{uj}| \dots\dots\dots(14)$$

Donde:

L = longitud del perfil simulado

V = velocidad de simulación, 80 km/h

n = número de muestras del perfil, L/D

s = pendientes filtradas de las masas, perfil discreto

II.XVI Equipos para evaluar la rugosidad

a) Descripción del método

Las mediciones del IRI de las clases 1 y 2 sólo pueden obtenerse a partir del perfil longitudinal del camino. El perfil está descrito por la serie de valores de altura de las cotas de la superficie, espaciados a cortos intervalos a lo largo de la huella de la rueda. Para resumir los cientos de miles de números que componen el perfil, se aplica en procedimiento de análisis que calcula el IRI como un parámetro estadístico único que cuantifica la rugosidad. Cualquier computadora es apta para esta tarea de calcular el IRI.

Debido a que el IRI corresponde a un recorrido determinado a lo largo del camino, los responsables de la medición del perfil deben tener una clara idea de por donde pasa la rueda dentro del carril de tráfico. Las dos huellas de rodadura de los neumáticos de vehículos que circulan habitualmente proporcionaran medidas que son las más representativas de la rugosidad, y en consecuencia se recomienda que las medidas se hagan sobre esas huellas.



b) Exactitud necesaria

Precisión: Aunque la rugosidad no se conoce hasta haber medido el perfil y calculado el IRI, con la experiencia del profesional se podrá juzgar cuándo la rugosidad es suficientemente elevada como para poder reducir las exigencias de precisión. Los requisitos de exactitud de las cotas de altura para las mediciones perfilométricas de clases 1 y 2, se han calculado utilizando estas relaciones obtenidas experimentalmente (ASTM, 1995):

Precisión de clase 1 (en mm) menor o igual a $0.25(IRI)$, en m/km.....(15)

Precisión de clase 2 (en mm) menor o igual a $0.50(IRI)$, en m/km.....(16)

Intervalo de muestreo: El espaciado máximo de las muestras que se utiliza en las mediciones perfilométricas es de 250 mm y 500 mm para las clases 1 y 2 respectivamente, y es válido para todos los tipos de pavimentos, salvo en los casos en que la rugosidad está sumamente localizada y se “pasara por alto” si se utilizaran los intervalos de muestreo indicados. Ejemplos de rugosidad localizada son las juntas de alquitrán, los baches y parches pequeños. Puesto que el análisis para el cálculo del IRI no puede proporcionar información que no figure en la medición del perfil, es absolutamente esencial que la cota de altura del perfil se mida a intervalos suficientemente cortos para captar las fuentes de rugosidad más importantes.

Banda de onda: Por razones técnicas, los instrumentos perfilométricos abarcan solo una gama limitada del espectro de longitudes de onda que, se espera incluirán los aspectos cualitativos del camino que revisten interés. Al hacer el cálculo del IRI ocurre una reducción adicional del contenido informativo del perfil. El análisis del IRI actúa como un filtro al eliminar toda la información sobre el perfil que no está contenida en la banda de 1.3 a 30m (colinas y valles, textura). Las longitudes de onda que no estén situadas dentro de esta banda no contribuyen a la rugosidad percibida por vehículos que recorren el camino a velocidades cercanas a los 80 km/h (Kraemer, 2004).



Existen dos grupos principales de perfilómetros: los estáticos y los dinámicos. Los sistemas estáticos de precisión consiguen las medidas más exactas del perfil longitudinal. Sin embargo, su bajo rendimiento los hace inadecuados para estudios que no sean muy especiales, como los de investigación, o en países en que la mano de obra sea muy barata. Los métodos pseudo-estáticos no suelen ser mucho más rápidos que en los anteriores y además producen medidas que no son muy indicativas del perfil longitudinal.

Los perfilómetros dinámicos proporcionan perfiles a gran velocidad que, aunque no son réplica exacta del perfil longitudinal del camino (filtran los componentes del perfil con longitudes de ondas inferiores y superiores a ciertos valores), sí son exactos en la zona de longitudes de onda que influyen en la regularidad superficial.

Entre los equipos de medición estáticos se pueden mencionar los levantamientos de mira y nivel, el perfilómetro de barra del TRRL (Transport and Road Research Laboratory), Face Dispstick, MERLIN, entre otros (Karamihas & Sayers, 1998).

De los equipos de medición dinámicos más comunes se tienen los perfilógrafos mecánicos y los perfilómetros inerciales, este último es el que se utilizará en el presente trabajo, dada su rapidez y precisión obtenida en las mediciones (Karamihas & Sayers, 1998).

Perfilómetros inerciales: Consiste en un furgón o Van con instrumentos que mide los perfiles en ambas huellas de rodadura al conducirse a lo largo de un camino. La referencia inercial se consigue con acelerómetros verticales. La distancia hacia la superficie, determinada en un principio mediante un sistema mecánico con ruedas de seguimiento, se hace actualmente con sensores sin contacto con el pavimento (ópticos, acústicos o laser, según el modelo). Las señales del acelerómetro se integran dos veces para determinar la posición del cuerpo del perfilómetro. Cuando esta señal se añade a la señal de posición del seguidor de carretera se obtiene el perfil. A continuación, se muestra un perfilómetro láser de última generación.



Imagen 1. Perfilómetro láser

II.XVII Relaciones entre PSI e IRI

La relación entre la serviciabilidad y la rugosidad se establece a partir de los valores de rugosidad y los resultados de PSR. El IRI es el Índice de Rugosidad Internacional, que fue obtenido en cada tramo a través de un perfilómetro láser, y que se expresa en m/km. Se debe recordar que el IRI del tramo es el promedio del IRI sobre el perfil de cada huella, y considerado para la longitud total del tramo que debe ser de 400 metros. El PSR es el promedio para cada tramo de las calificaciones individuales de los miembros del panel evaluador. Cuando se establecen ecuaciones que predicen los valores de PSR a partir de mediciones objetivas como la rugosidad, entonces se habla de PSI o “Present Serviceability Index” para diferenciarlo del “Present Serviceability Rating” que proviene directamente del panel de usuarios.

Si bien, existen varios modelos en la literatura que relacionan el PSI con el IRI, en nuestro caso en particular utilizaremos el modelo empleado por el HDM III (Highway Development Management), el cual se desarrolló para pavimentos de asfalto y se dedujo en base a datos recogidos de cuatro fuentes distintas: Brasil, Texas, Sudáfrica y Pennsylvania. La ecuación exponencial es la siguiente (Shahin, 2005):



$$PSI = 5e^{(-IRI/5.5)} \dots\dots\dots(17)$$

II.XVIII Análisis estadístico de la información

Con la finalidad de obtener límites de aceptación de diferentes parámetros, se juzga conveniente realizar una revisión objetiva de los datos basado en un análisis estadístico que elimine errores de apreciación o interpretación, que a juicio de cada persona podrían ser muy diferentes entre sí, permitiendo de esta manera obtener valores razonables de dichos límites de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de los resultados obtenidos, en donde se incluya la realidad de los posibles valores inherente a la propia naturaleza de los datos.

De lo anterior se desprende la necesidad de realizar un análisis con la finalidad de obtener una estimación razonable de los posibles valores a obtener en campo del IRI (o PSI) en pavimentos flexibles de reciente construcción, y de esta manera tener un panorama de los posibles resultados que se pueden obtener para poder fijar de manera realista los límites de aceptación o rechazo.

En lo que sigue se hará uso de los intervalos de confianza, ya que de esta manera se puede conseguir un rango de posibles valores a obtener, en lugar de sólo un estimado puntual.

Aunque un estimado puntual es el mejor valor individual para estimar un parámetro poblacional, no nos da ninguna indicación precisa de qué tan bueno es este mejor estimado. Los estadísticos desarrollaron el intervalo de confianza o estimado de intervalo, consistente en un rango (o intervalo) de valores, en lugar de sólo un valor. El intervalo de confianza se asocia con un nivel de confianza, como es 0.95 (o 95%), por ejemplo. El nivel de confianza nos ofrece la tasa de éxitos del procedimiento que se usa para construir el intervalo de confianza. El nivel de confianza suele expresarse como la probabilidad o área $1 - \alpha$, donde α es el complemento del nivel



de confianza. Para un nivel de confianza del 0.95 (o 95%), $\alpha=0.05$. Para un nivel de confianza del 0.99 (o 99%), $\alpha=0.01$.

Cuando reunimos un conjunto de datos muestrales, podemos calcular la media muestral \bar{x} y esa media muestral por lo regular es diferente de la media poblacional μ . La diferencia entre la media muestral y la media poblacional es un error de la estimación (E). El margen de error E se expresa como sigue (Triola, 2004).

$$E = t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(18)$$

donde $t_{\alpha/2}$ tiene n-1 grados de libertad.

Dada la forma en que se define el margen de error E, existe una probabilidad de 1 - α de que una media muestral sea errónea (diferente de la media poblacional μ) por más de E.

Utilizando el margen de error E ahora identificaremos el intervalo de confianza para la media poblacional μ .

$$\bar{x} - E < \mu < \bar{x} + E \dots\dots\dots(19)$$

donde:

$$E = t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(20)$$

donde: μ es la media poblacional, E es el margen de error de la estimación, s es la desviación estándar muestral, y n es el número de datos que contiene la muestra.

Es importante mencionar que para nuestro caso en particular no se utilizó la distribución de probabilidad normal, debido principalmente a que se desconoce la desviación estándar poblacional σ , dato que es necesario conocer para la aplicación de dicha distribución, ya que si en principio se tuviera este dato es seguramente porque se conoce la población. La suposición de una σ conocida no es muy realista,



porque el cálculo de σ requiere que conozcamos todos los valores de la población, pero si conociésemos todos los valores de la población calcularíamos fácilmente el valor de la media poblacional μ ; por lo tanto, no habría necesidad de estimar μ .

La importancia de la obtención del intervalo de confianza para un determinado experimento es de suma importancia para una adecuada interpretación de los resultados, y sobre todo para fijar límites razonables de los posibles resultados que se obtendrían en posteriores experimentos, ya que como se mencionó anteriormente, el estimado puntual es el mejor valor individual para estimar un parámetro poblacional, sin embargo, no nos da ninguna indicación precisa de qué tan bueno es este mejor estimado, por lo que se puede caer en un error en la interpretación de nuevos datos obtenidos en experimentos similares, pudiendo llegar a concluir que los resultados son incorrectos sólo porque hay una diferencia sustancial respecto a otros datos anteriores, lo cual no sucedería si se usa un intervalo de confianza o rango de valores usuales, ya que la variabilidad de los resultados pudiera ser parte de la naturaleza del experimento y aunque se obtengan valores muy diferentes entre sí, éstos podrían llegar a estar dentro del intervalo de confianza, demostrando su validez y eliminando el error en la interpretación de los datos.

De lo anterior se deduce que para fijar los límites de aceptación de cualquier parámetro si se conocen datos muestrales, se puede optar por utilizar los límites inferior o superior del intervalo de confianza, ésto con la finalidad de evitar caer en el error común de fijar límites de aceptación a experimentos cuyos valores por su naturaleza podrían nunca llegar a cumplir con los límites fijados, ya que carecerían de una base científica y de toda objetividad, dejando dichos valores sólo a la apreciación del evaluador que fija estos límites.



III. Hipótesis

El valor del PSI de 4.20 recomendado en la guía AASHTO 1993 para pavimentos flexibles, el cual se obtuvo de acuerdo a las condiciones y procedimientos constructivos de Estados Unidos de América, es significativamente superior al que se puede obtener en el medio mexicano.

Mediante un análisis estadístico de las mediciones realizadas en carreteras nuevas puestas en operación se establecerá un valor mínimo de PSI de diseño que representa el valor real para las carreteras mexicanas para ser utilizado en el método AASHTO 1993 para pavimentos flexibles.

IV. Objetivo

Determinar el valor del PSI (Índice de Serviciabilidad Presente) Inicial más probable, a partir de la medición del IRI (Índice Internacional de Rugosidad) en pavimentos flexibles de reciente construcción, con la finalidad de proporcionar un valor congruente del PSI a ser utilizado en la ecuación de la AASHTO 1993 para el diseño de pavimentos en el medio mexicano.

V. Material y Métodos o Metodología.

V.I Equipo y método para la obtención del IRI en campo

Con la finalidad de obtener los datos del IRI se utilizó un perfilómetro láser, el cual se puede definir como un sistema avanzado de medición de parámetros de la superficie de rodamiento a altas velocidades de operación (hasta 100 km/hr). Los parámetros pueden ser el IRI y la profundidad de rodera, hasta la textura superficial.



Las mediciones del perfilómetro se realizan en las dos rodadas (izquierda y derecha) de cada uno de los carriles de circulación. En ambas rodadas se miden dos perfiles longitudinales para los cuales se puede calcular, en tiempo real, el IRI a los intervalos de distancia especificados por el usuario, lo cual usualmente es de 20 m.

Por la precisión de los dispositivos empleados y el sesgo máximo de las mediciones, el equipo cumple con todas las especificaciones de la Clase 1 de acuerdo a la Norma ASTM E950-98 (ASTM, 1998).

Para la medición del IRI se utiliza un sistema de doble láser. La función del sistema láser es medir dos perfiles longitudinales continuos y así calcular el valor de IRI.

Para obtener de manera precisa el perfil longitudinal en ambas rodadas del vehículo de prueba en un carril dado, el perfilómetro dispone de dos acelerómetros, los cuales tienen como función determinar la aceleración vertical cuando el vehículo está en movimiento, de tal suerte que todas las lecturas de distancia vertical siempre quedan referidas al mismo eje. De esta manera, se registran todos los movimientos verticales del vehículo, causados por la irregularidad del pavimento y los cambios de velocidad durante el recorrido, entre otros factores.

A partir del perfil longitudinal se calcula en tiempo real el IRI. El modelo físico utilizado es el del Banco Mundial (Shahin, 2005), también conocido como de “un cuarto de carro” (Ver Figura 5). Este modelo trata de reproducir el comportamiento de un vehículo circulando a una velocidad determinada en respuesta a las irregularidades de la superficie; así que las masas m_1 y m_2 se mueven verticalmente. Dicho movimiento es medido en forma de aceleración por los acelerómetros antes mencionados.

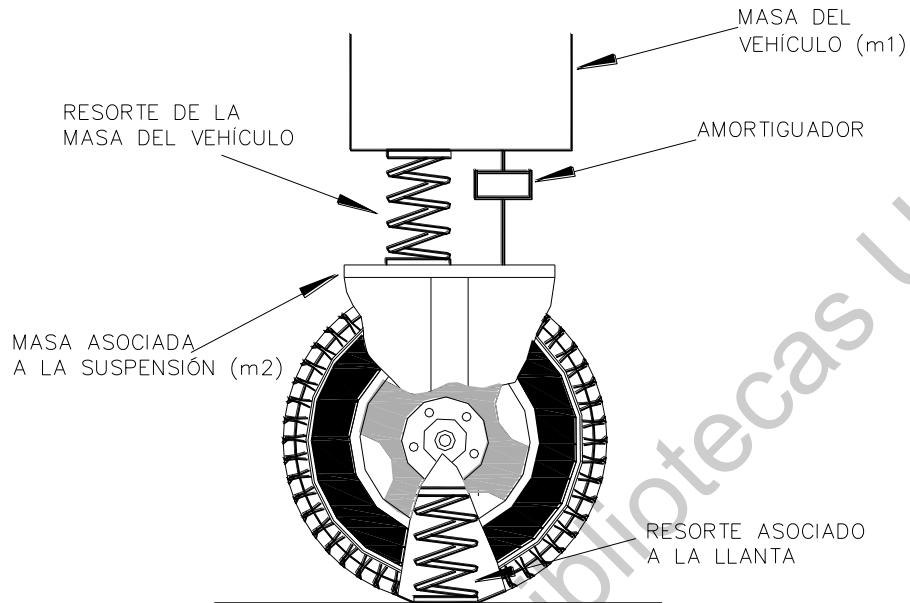


Figura 5. Modelo cuarto de carro propuesto por el Banco Mundial.

Es importante mencionar que el dato de la velocidad de recorrido es fundamental para el correcto cálculo del IRI, por lo que el equipo está provisto de un dispositivo óptico que permite medir con alta precisión la distancia recorrida y la velocidad de circulación. El vehículo cuenta con un transductor óptico de distancias DMI por sus siglas en inglés (Distance Measurement Instrument), el cual sirve para medir estos dos parámetros.

El procedimiento seguido en campo para la obtención del IRI se enumera a continuación:

1. Lo primero es ubicar el vehículo de prueba en un punto de cadenamiento conocido, con la finalidad de poder referenciar las mediciones tomadas a dicho punto.

2. Posteriormente se capturan los datos de entrada que requiere el programa de operación del vehículo de prueba, estos son: nombre de la carretera, tramo evaluado, kilómetro inicial y el intervalo de medición.



Imagen 2. Pantalla de datos iniciales del perfilómetro láser

3. Una vez realizado el llenado de la pantalla de inicio, se procede a verificar el funcionamiento de los acelerómetros, lo cual se muestra en la pantalla en color verde si éstos están operando de manera adecuada, así como también se verifica que el GPS se encuentre operando de manera satisfactoria, si bien, este último no es necesario, se recomienda su uso, sobre todo para tener también las coordenadas de referencia del tramo evaluado.
4. Terminados los pasos anteriores, se procede a comenzar la captura de datos, lo cual se inicia con el comienzo del movimiento del vehículo, el cual se acelera de manera gradual, evitando cambios en la velocidad de manera brusca, hasta llegar entre 80 km/h y 100 km/h, velocidad que será sostenida en la medida de lo posible durante el trayecto de la prueba, si bien no es esto estrictamente necesario, ya que, el vehículo de prueba puede obtener valores del IRI desde los 20 km/h.



5. En todo momento de la prueba se debe estar atento con la finalidad de indicar “marcas” a lo largo del recorrido, las cuales se utilizan para registrar puntos singulares como: juntas en los puentes, topes, botones vibradores, y en general, cualquier elemento que pudiera afectar los datos obtenidos.
6. El término de la medición se puede realizar estando el vehículo en movimiento o detenido, por medio de la opción “Stop” que se presenta en la misma carátula del programa.
7. Una vez finalizada la medición, se pueden extraer los datos en formato de texto para su posterior uso en cualquier programa comercial de análisis de datos.

Cabe mencionar que mientras se efectúa la medición se pueden ver los valores del IRI en tiempo real, con lo que se puede verificar constantemente que la toma de datos se está realizando de manera correcta.

V.II Tipo y tamaño de la muestra utilizada en el análisis de datos

Los métodos de análisis de datos que se utilizan en el presente trabajo toman en consideración que el tipo de muestra sea aleatoria simple, por lo que en la recolección de datos se tomó en consideración el cumplimiento de tal definición: Una muestra aleatoria simple de n sujetos se selecciona de manera que cada posible muestra del mismo tamaño n tenga la misma posibilidad de ser elegida (Gutierrez & de la Vara, 2012).

El requisito de muestra aleatoria simple se cumple debido a que la probabilidad de seleccionar cualquier kilómetro evaluado del IRI de una carretera, tiene la misma probabilidad de ser seleccionado que cualquier otro, si se toma en cuenta que dada un base de datos en donde se tengan promedios por kilómetro del IRI la probabilidad de seleccionar cualquiera siempre es la misma.



Para determinar qué tan grande debe ser una muestra para estimar correctamente la media poblacional se considerará la siguiente expresión (Triola, 2004):

$$n = \left[\frac{Z_{\alpha/2} \sigma}{E} \right]^2 \dots\dots\dots(21)$$

Donde:

n = tamaño de la muestra requerida

σ = desviación estándar poblacional

E = margen de error deseado

α = es el complemento del nivel de confianza

$Z_{\alpha/2}$ = puntuación z que separa un área de $\alpha/2$ en la cola derecha de la distribución normal estándar.

La expresión anterior requiere que se sustituya un valor conocido de la desviación estándar poblacional, pero esta, en realidad se desconoce. Para solucionar esta situación se ha considerado utilizar una regla práctica para desviaciones:

$$\sigma = \text{rango}/4 \dots\dots\dots(22)$$

Con una muestra de 87 valores o más, seleccionada al azar de una población con distribución normal, el rango/4 nos da un valor que es igual o mayor que σ al menos el 95% de las veces (Box & Hunter, 2008). De esta manera, si se considera un rango de la muestra de datos de 1.71 m/km (diferencia entre el valor máximo y mínimo del conjunto de datos), se tiene un valor estimado de la desviación estándar poblacional de 0.43 m/km. En el anexo 1 se presenta una tabla con los datos de la muestra utilizada en el análisis.

Otro dato importante es definir el margen de error que se desea considerar en el análisis. Tomando en cuenta que el rango de datos del IRI para una carretera recién pavimentada oscila comúnmente entre 1.25 y 3.25 m/km (Karamihas & Sayers, 1998), se juzga conservador el utilizar un margen de error del 5%, el cual representa



una variación de entre 0.06 y 0.16 m/km, respecto al intervalo anterior. De esta manera se utilizará para la determinación del tamaño de la muestra un valor del error de 0.06 m/km, con la finalidad de estar del lado de la seguridad, ya que cualquier error debe ser conservador, en el sentido de que vuelva n muy grande y no muy pequeña.

Por lo tanto, para una confianza del 95% de que la media muestral estará a 0.06 m/km de la media poblacional, se requiere por lo menos el siguiente tamaño de muestra (redondeado al valor inmediato superior):

$$n = \left[\frac{z_{\alpha/2} \sigma}{E} \right]^2 = \left[\frac{(1.96)(0.43)}{0.06} \right]^2 = 198$$

De esta manera, se concluye que el tamaño de muestra utilizado de 269 en el análisis realizado en el presente trabajo, es correcto y superior al mínimo necesario para tener una confianza del 95% de que el valor estimado de la media muestral estará a no más del 5% del valor de la media poblacional.

Es importante mencionar que, aunque los datos obtenidos del IRI por medio del perfilómetro son a cada 20 m, se optó por utilizar el valor promedio en segmentos de 1 km, ya que actualmente es como se suele evaluar la condición superficial de las carreteras.

Lo anterior se justifica por la aplicación del teorema del límite central, el cual plantea que, para una población con cualquier distribución, la distribución de las medias muestrales se aproxima a una distribución normal conforme aumenta el tamaño de la muestra. En otras palabras, si el tamaño de la muestra es lo suficientemente grande, la distribución de las medias muestrales puede aproximarse por medio de una distribución normal, incluso si la distribución original no está distribuida normalmente.

Considerando lo anterior, en el presente trabajo se utilizó una muestra de valores medios del IRI de 269, obtenida a partir de un conjunto de muestras independientes de 50 datos cada una (valores a cada 20 m en un kilómetro).



Lo mencionado previamente es de suma importancia si se considera que al evaluar una carretera en México se suele tomar el valor medio por cada kilómetro, y no los valores individuales a cada 20 m, por tanto, es de nuestro particular interés conocer la estimación del valor medio poblacional del IRI de las medias muestrales para un kilómetro (porque estamos trabajando con valores medios de muestras de 50 datos individuales, y no con un solo dato del IRI para 20 m).

De esta manera, la interpretación del resultado obtenido será en relación al valor medio del IRI para un kilómetro, y no para un valor individual de 20 m.

Por último, cabe mencionar que los datos se obtuvieron al evaluar diferentes tipos de carreteras: A2 (dos carriles con acotamientos), A4 (cuatro carriles con acotamientos) y A4S (cuatro carriles con acotamientos y faja central separadora). Esto no supone un riesgo en cuanto a la naturaleza de los datos, ya que el procedimiento constructivo para una carretera de nueva construcción es el mismo en todos los casos, obteniéndose valores comparables entre sí.

V.III Evaluación de la normalidad de la muestra

Los métodos estadísticos utilizados en la presente tesis requieren que los datos sean una muestra aleatoria simple de una población con una distribución normal.

Por lo tanto, se evaluará qué tanto se alejan de la normalidad los datos de la muestra utilizada en el análisis. Se utilizarán básicamente dos criterios: 1. Inspección visual del histograma para ver si tiene forma de campana; y 2. Construcción de una gráfica cuantilar normal.

En la figura 6 se muestra el histograma de frecuencias de la muestra utilizada para el análisis, en el cual se nota una distribución con forma de campana, semejante a una distribución normal. En el anexo 1 se presenta una tabla con los datos de la muestra utilizada en el análisis.

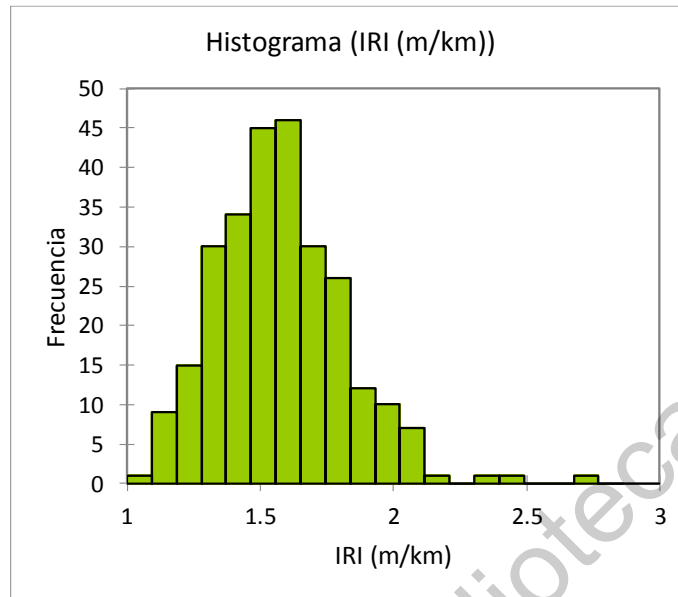


Figura 6. Histograma de valores medios muestrales del IRI

En la figura 7 se muestra la gráfica cuantilar normal, en donde se aprecia que los datos se ajustan bastante bien a una línea recta, mostrando un coeficiente de determinación de 0.966, por lo que se puede concluir que se trata de una muestra distribuida normalmente.

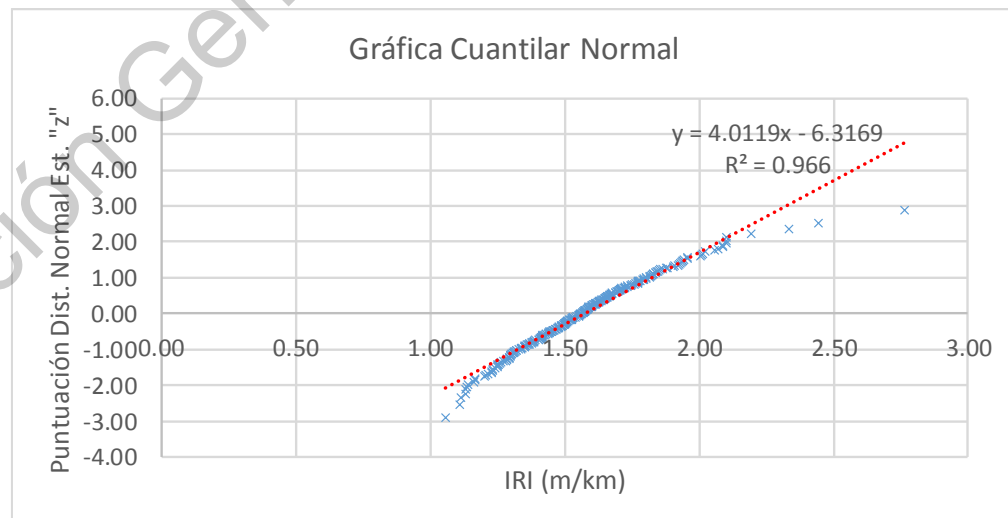


Figura 7. Gráfica cuantilar normal



Además de lo anterior, hay que recordar que se trabaja con una distribución de las medias muestrales, las cuales como consecuencia del teorema del límite central se pueden aproximar por medio de una distribución normal, incluso si la población original de valores individuales no está distribuida normalmente.

En conclusión, se puede considerar que la distribución de las medias muestrales considerada en el presente análisis se puede aproximar a una distribución normal.

V.IV Descripción del experimento

En general, el experimento consistió en evaluar varios segmentos de 1 km para determinar el valor medio del IRI, a partir de valores individuales a cada 20 m obtenidos con perfilómetro láser en pavimentos de flexibles de nueva construcción.

Posteriormente a partir de correlaciones existentes se obtuvo el valor correspondiente del PSI, de tal manera que por medio de una prueba estadística de hipótesis se pueda descartar el uso del valor del PSI inicial de 4.2 en México, recomendado por la AASHTO 1993 para su aplicación en Estados Unidos de América.

Así mismo, el valor obtenido queda como recomendación para ser utilizado en México para el diseño de pavimentos flexibles nuevos.

En seguida, se enumeran los pasos seguidos para la realización del experimento:

1. Identificación del problema: el valor del PSI inicial propuesto en la guía AASHTO 1993 es superior al que se puede obtener en carreteras en el medio mexicano. Así mismo, no se conoce un valor de referencia del PSI inicial que su pueda utilizar para el diseño de pavimentos flexibles de nueva construcción en el método AASHTO 1993, de uso extendido en México.



2. Identificación de las variables o factores involucrados: si bien, existen varios factores que afectan el valor del PSI, como las variaciones en el perfil longitudinal, baches, grietas y la existencia de roderas, se ha demostrado que la varianza del perfil longitudinal es el factor que se correlaciona más fuertemente con los valores del PSI.
3. Selección de la variable de respuesta: debido a que el factor que más afecta al PSI es la varianza del perfil longitudinal, se optó por utilizar el IRI como variable de respuesta para correlacionarla con el PSI por medio de expresiones existentes, de tal manera que se pudieran obtener una gran cantidad de datos para formar una muestra lo suficientemente robusta, para que el análisis de la información arrojará datos confiables.

Con la finalidad de obtener la muestra de valores del IRI, se utilizó un perfilómetro láser Clase 1, de tal forma que la obtención de datos fuera lo suficientemente precisa y rápida, alejada de la subjetividad del PSR. Posteriormente, se utilizó una correlación entre IRI y PSI para obtener los valores del análisis.

4. Elección del diseño experimental: en esta etapa se determinó el tamaño de muestra mínimo para una confianza del 95%, siendo el objetivo del experimento, conocer si el PSI recomendado por la AASHTO 1993 difiere significativamente del valor real obtenido en carreteras mexicanas, para pavimentos flexibles de nueva construcción.
5. Realización del experimento: en esta etapa se obtuvieron datos del IRI en campo por medio de perfilómetro láser a cada 20 m, para posteriormente determinar el valor medio muestral para cada kilómetro evaluado. En esta fase es importante recalcar que en todos los casos se evaluaron segmentos de carretera con pavimento flexible de nueva construcción.



6. Análisis estadístico de los datos: en esta fase se realizó el análisis de datos y determinación de la normalidad de los valores medios muestrales. Así mismo, se realizó la justificación del uso de la distribución t para el análisis de datos, estimación del valor medio del IRI para segmentos de un kilómetro a partir de la distribución t , así como, la estimación del intervalo de confianza para el IRI considerando la distribución t .

También se realizó una prueba de hipótesis simple considerando la distribución t , con la finalidad de probar que el valor del PSI inicial de 4.2 recomendado en la guía AASHTO 1993, es demasiado alto en relación a los posibles valores obtenidos en el medio mexicano.

7. Conclusiones y recomendaciones: una vez que se han analizado los datos, se obtuvieron conclusiones prácticas acerca de los resultados y se recomendaron algunos cursos de acción.

V.V Procedimientos analíticos y estadísticos

Una vez que se ha determinado que la muestra presenta una distribución aproximadamente normal, queda aplicar procedimientos estadísticos bien conocidos para el análisis de datos y establecer conclusiones bien fundamentadas.

En el presente trabajo se utilizaron los siguientes procedimientos estadísticos para el análisis de datos:

1. Se utilizaron gráficas de histograma de frecuencias y cuantilar normal, para evaluar qué tanto se aproxima la distribución de las medias muestrales a una distribución normal.

De acuerdo a lo determinado anteriormente, el histograma de frecuencias tiene una distribución aproximadamente normal, así como, la gráfica cuantilar



normal obtenida presenta una tendencia muy cercana a la línea recta, por lo que se puede concluir que se trata de una distribución normal.

2. Se utilizó la distribución de probabilidad normal para estimar el tamaño mínimo de la muestra requerida para una confianza del 95%. Si bien, para utilizar una distribución normal es necesario conocer la desviación estándar poblacional, ésta se estimó a partir de la regla práctica del rango/4, la cual ha demostrado que el 95% de las veces se obtienen valores mayores a la desviación estándar poblacional (Box & Hunter, 2008), así podemos decir que estamos del lado de la seguridad, en lo que se refiere a no tratar con tamaños de muestra menores al mínimo necesario.

La regla práctica del rango/4 para estimar la desviación estándar poblacional sólo se aplicó para la determinación del tamaño de la muestra mínima requerida, ya que en los análisis subsecuentes se utilizó la desviación estándar de las medias muestrales.

Del análisis anterior, se encontró que se requiere un tamaño de muestra mínimo de 198, siendo el tamaño de muestra utilizado de 269 en el análisis realizado en el presente trabajo, superior al mínimo necesario para tener una confianza del 95% de que el valor estimado de la media muestral estará a no más del 5% del valor de la media poblacional.

3. Determinación del intervalo de confianza para un 95%, considerando la distribución t de Student. Se estimó el intervalo de confianza para conocer el posible rango de valores estimados del valor medio del IRI, ya que, si bien, la estimación de la media poblacional es el mejor estimado que se puede tener con la muestra de datos disponible, no nos dice qué tan buena es tal estimación, de ahí que se hace necesario estimar el intervalo de confianza.



Como no conocemos la desviación estándar poblacional, la estimamos con el valor de la desviación estándar muestral, pero ésta introduce otra fuente de baja confiabilidad, especialmente con muestras pequeñas. Para poder mantener el nivel de confianza deseado del 95%, compensamos esta falta de confianza adicional ampliando el intervalo de confianza, utilizando los valores críticos $t_{\alpha/2}$ de una distribución t de Student, que son más grandes que los valores críticos $z_{\alpha/2}$ de la distribución normal.

Para el análisis se utilizó la distribución del IRI de medias muestrales para tramos de 1 km mostrada en la figura 8:

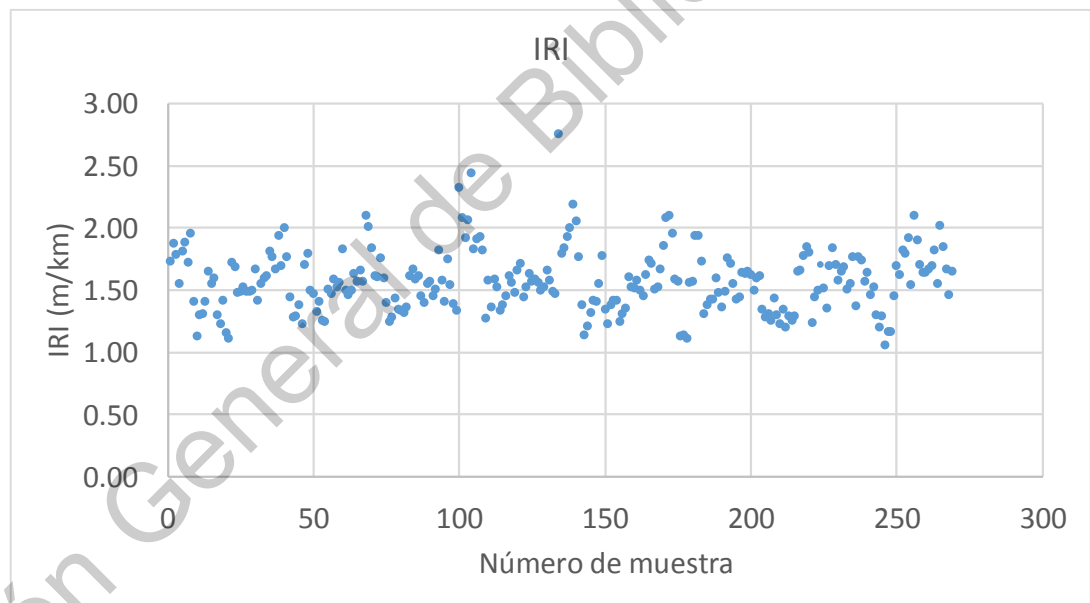


Figura 8. Distribución de medias muestrales del IRI.

En el anexo 1 se presenta una tabla con los datos de la muestra utilizada en el análisis.



Por lo tanto, el intervalo de confianza es (Triola, 2004):

$$\bar{x} - E < \mu < \bar{x} + E \dots\dots\dots(23)$$

Donde:

- μ : media poblacional
- \bar{x} : media muestral
- s: desviación estándar muestral
- n: número de valores muestrales
- E: margen de error

$$E = t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} = \dots\dots\dots(24)$$

$t_{\alpha/2}$: valor crítico de la distribución t , que separa un área de $\alpha/2$ en la cola derecha de la distribución t .

Considerando un nivel de confianza del 95% y tomando en cuenta que el tamaño de muestra (n) es de 269, se tiene que los grados de libertad (gl=n-1) son 268, por lo tanto, el valor crítico $t_{\alpha/2}$ es de 1.969, además de la distribución de datos de la muestra se tiene una desviación estándar muestral de 0.245 m/km, y la media es de 1.575 m/km.

Con estos datos calculamos el margen de error:

$$E = t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} = 1.969 * \frac{0.245}{\sqrt{269}} = 0.029 \text{ m/km}$$

De esta manera, con una media muestral de 1.57 m/km y un error de 0.029 m/km, se estima el intervalo de confianza para estimar la media poblacional:

$$\begin{aligned} \bar{x} - E &< \mu < \bar{x} + E \\ 1.575 - 0.029 &< \mu < 1.575 + 0.029 \\ 1.55 &< \mu < 1.60 \end{aligned}$$



Con base en los resultados muestrales dados, tenemos una confianza del 95% de que los límites de 1.55 m/km y 1.60 m/km realmente contienen del valor de μ , la media poblacional del IRI.

Considerando la siguiente correlación entre el IRI y el PSI (Shahin, 2005):

$$PSI = 5e^{(-IRI/5.5)} \dots\dots\dots(25)$$

De esta manera, se puede expresar el intervalo de confianza en términos del PSI, considerando los valores del intervalo de confianza del IRI obtenido anteriormente y sustituyendo en la ecuación 25, obteniéndose el siguiente intervalo para el PSI:

$$3.78 < \mu < 3.74$$

De manera similar a lo anterior, podemos decir que, con base en los resultados muestrales dados, tenemos una confianza del 95% de que los límites de 3.78 y 3.74 m/km realmente contienen del valor de μ , en este caso, la media poblacional del PSI.

4. Estimación puntual de la media del IRI por medio de la distribución t o de Student utilizando el intervalo de confianza.

Con la finalidad de calcular el valor medio de la mejor estimación puntual del IRI y PSI, se utilizó el intervalo de confianza calculado anteriormente.

Para el IRI se tiene lo siguiente:

$$\bar{x} = \frac{(\text{límite de confianza superior})+(\text{límite de confianza inferior})}{2} \dots\dots\dots(26)$$



$$\bar{x} = \frac{(1.55) + (1.60)}{2} = 1.575 \text{ m/km}$$

Aplicando la correlación entre IRI y PSI utilizada anteriormente, se tiene que el valor medio del PSI es de 3.76.

5. Prueba de hipótesis o prueba de significancia. Se utilizó una prueba de significancia utilizando la distribución t , con la finalidad de probar la hipótesis acerca de si el valor del PSI obtenido es significativamente menor al recomendado por la Guía AASHTO 1993.

Con la finalidad de evaluar la eficacia de la prueba para reconocer si una hipótesis nula es falsa, se determinó lo que en estadística se denomina como la *potencia* de una prueba. Una potencia de al menos 0.80 es un requisito común para determinar que una prueba de hipótesis es efectiva (Triola, 2004).

Si consideramos del análisis realizado hasta este momento, que la diferencia entre el PSI medio encontrado de 3.76 y el propuesto por AASHTO de 4.20 es de 0.44, podemos calcular la potencia de la prueba, considerando una desviación estándar de 0.16 y un nivel de significancia de 95%. En la figura 9 se muestra una gráfica en donde se presentan los valores del PSI determinados a partir de la correlación con el IRI mostrada anteriormente, esto para cada valor de la distribución muestral considerada. De esta distribución muestral se obtiene una desviación estándar de 0.16:

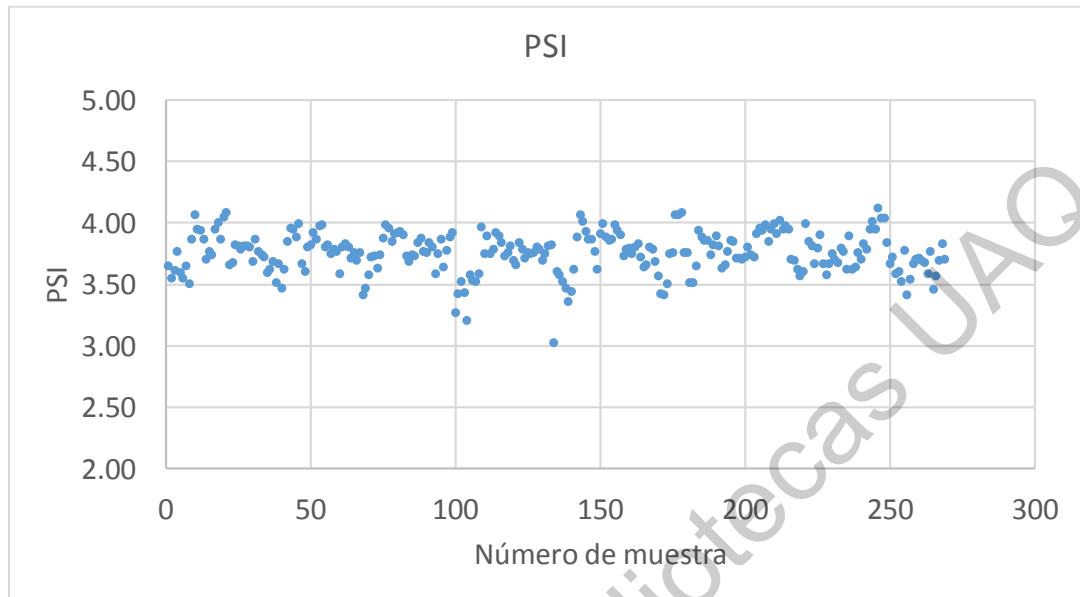


Figura 9. Distribución de medias muestrales del PSI.

En el anexo 1 se presenta una tabla con los datos de la muestra utilizada en el análisis.

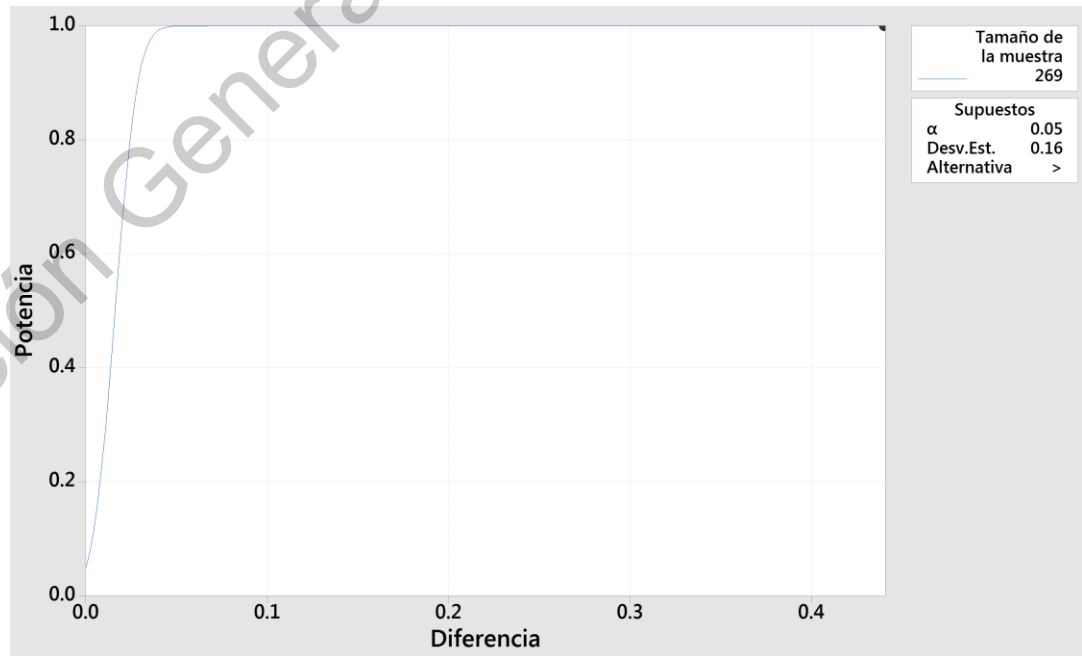


Figura 10. Curva de la potencia para prueba t.



De esta manera, considerando los datos mencionados anteriormente, se procedió a calcular la potencia de la prueba, dicho valor se calculó utilizando el programa Minitab. En la figura 10 se muestra el resultado obtenido.

De la figura 10 se observa que la potencia de la prueba es mayor que 0.8, siendo el valor obtenido de 0.99, aproximadamente. De esta misma figura se puede observar que la potencia se incrementa si el valor de la diferencia aumenta, siendo esta diferencia entre el valor encontrado de 3.76 y el valor de referencia, en este caso de 4.20, lo cual era de esperarse si se considera que mientras mayor sea dicha diferencia, mayor es el nivel de significancia de los resultados.

Con la finalidad de someter a prueba una afirmación acerca de una media poblacional mediante el uso de un método formal de prueba de hipótesis se utilizará el siguiente estadístico de prueba (Montgomery, 2014):

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \dots\dots\dots(27)$$

Donde:

n: tamaño de muestra

\bar{x} : media muestral

μ : media poblacional o valor de referencia

s: desviación estándar muestral

La hipótesis nula se plantea como:

$$H_0: \mu = 4.20$$

Y la hipótesis alternativa:

$$H_1: \mu < 4.20$$



Considerando el valor de la media muestral determinado anteriormente del PSI de 3.76, una desviación estándar muestral de 0.16 y una muestra de 269, se procede a realizar el cálculo del estadístico de prueba:

$$t = \frac{3.76 - 4.20}{\frac{0.16}{\sqrt{269}}} = -45.10$$

Comparando el estadístico de prueba con el valor crítico de una distribución t para un nivel de significancia del 95% (prueba de cola izquierda) de -1.65, se concluye que existe evidencia suficiente para no sustentar la afirmación de que la media poblacional del PSI inicial en el medio mexicano sea igual a 4.20, como lo establece la guía AASHTO 1993.

VI. Resultados y discusión.

VI.I Resultados

Con base al análisis realizado anteriormente, en seguida se mencionan los resultados obtenidos:

1. Como los límites del intervalo de confianza de 3.78 y 3.74 no contienen el valor del PSI recomendado por la AASHTO 1993 de 4.20, es muy posible que la media poblacional del PSI inicial en México sea cualquier valor que se encuentre entre dicho intervalo, lo que sugiere que el valor de 4.20 no sea representativo de las condiciones prevalecientes en los pavimentos flexibles de nueva construcción en el medio mexicano, debido a que no se encuentra dentro del intervalo obtenido.
2. Considerando los resultados de la distribución de medias muestrales, tomando en cuenta la diferencia entre el valor medio obtenido de 3.76 y el valor de 4.20 recomendado en la guía AASHTO 1993, se obtuvo una potencia



de la prueba de 0.99, por lo cual, se acepta que la prueba es lo suficientemente eficaz para considerar que los resultados obtenidos son adecuados y significativos.

3. Con base en el resultado de la prueba de hipótesis, se establece que no hay evidencia suficiente para sustentar la afirmación de que el valor del PSI inicial es cuando menos de 4.20.
4. En la figura 11 se muestra la variación de los ejes equivalentes que resiste un pavimento hipotético respecto al PSI.

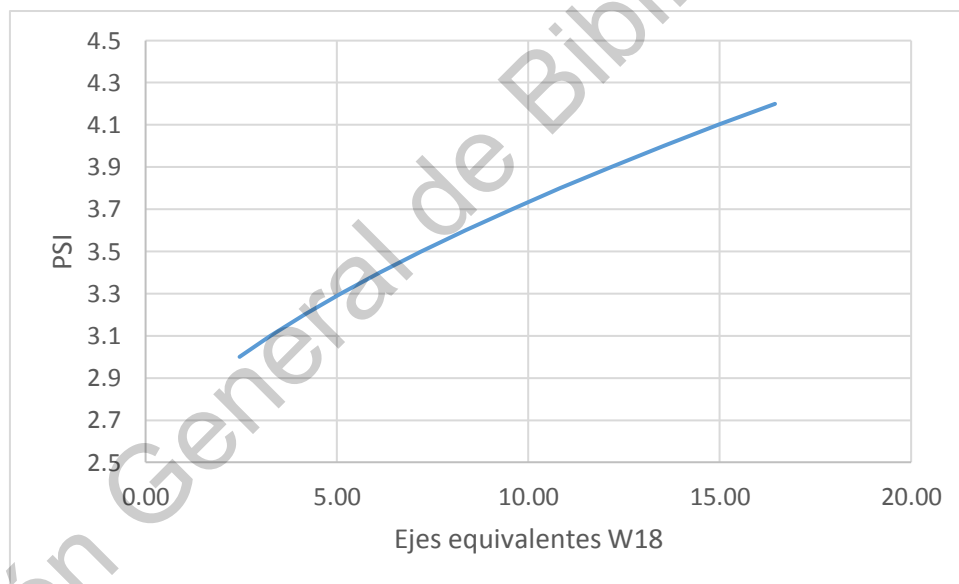


Figura 11. Variación del PSI respecto a los ejes equivalentes W18.

El pavimento supuesto en este análisis consistió en una carpeta asfáltica de granulometría densa de 10 cm de espesor, una base hidráulica de 20 cm y una capa de subbase de 30 cm, desplantada esta estructura sobre una

subrasante de 1,020 kg/cm² de módulo de resiliencia. El método utilizado es el de la AASHTO en su versión 1993.

En esta gráfica se puede observar una disminución de aproximadamente un 30% en los ejes equivalentes resistentes, cuando se pasa de un valor del PSI de 4.2 a uno de 3.76, esta puede ser una causa común que los pavimentos presenten en la realidad una vida menor a la esperada en el cálculo.

5. Considerando un costo de \$2,600.00 por metro cúbico de carpeta asfáltica, el impacto económico que tendría la construcción de un sobre-espesor de esta capa, para conservar los mismos ejes equivalentes resistentes conforme decrece el valor del PSI se muestra en la figura 12.

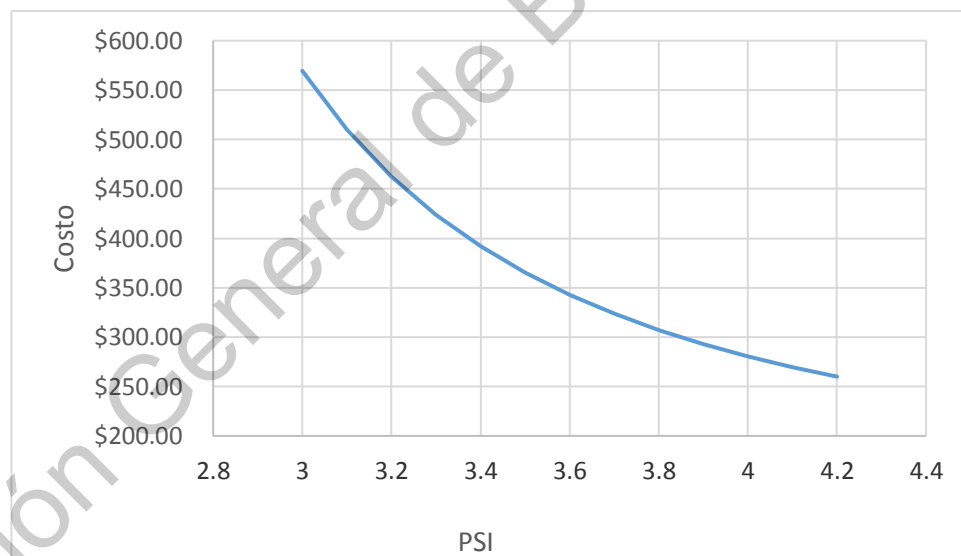


Figura 12. Variación del costo respecto al PSI.

De la figura 12 se puede observar que existe un incremento en el costo de aproximadamente un 18% si se pasa de un valor del PSI de 4.2 a uno de 3.76, conservando los mismos ejes equivalentes resistentes de la estructura del pavimento.



VI.II Discusión

Considerando los resultados obtenidos anteriormente, se observa que el valor del PSI inicial determinado a partir de la distribución de medias muestrales, se aleja demasiado del valor de referencia recomendado por la AASHTO 1993 de 4.20 para pavimentos flexibles de nueva construcción, por lo que es altamente probable que este valor no sea representativo de las condiciones comunes en el medio mexicano.

Lo anterior se deriva seguramente de que el valor del PSI de 4.20 se obtuvo bajo condiciones de campo altamente controladas, lo cual se aleja de las situaciones comunes que generalmente se presentan en obras en el campo mexicano, en donde el control de niveles se hace con equipo topográfico común, como nivel fijo y estación total, considerando puntos de control a cada 20 m, sin utilizar extendedora con sensores o algún equipo especial para asegurar una superficie uniforme, sino sólo motoconformadoras operadas manualmente.

Esto además de las tolerancias en niveles que presentan las dependencias como la actual Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la cual permite variaciones de niveles en la capa subrasante y subyacente de 3 cm y 5 cm, respectivamente (SCT, 2016). Estas variaciones permitidas afectan de manera directa el perfil longitudinal, lo cual a su vez afecta la regularidad de la superficie de rodamiento, ya que las capas del pavimento normalmente se construyen con espesores constantes, reflejando la irregularidad de las capas que subyacen.

En Estados Unidos de América y algunos países de Europa, es muy común que se utilice el perfilómetro desde la construcción de las primeras capas de terracería, así como, aquellas capas de pavimento que se construyen previamente a la capa de rodamiento, lo cual asegura un mejor control de calidad en lo que se refiere a la regularidad final obtenida, ya que, desde las primeras capas construidas, se



comienza a cuidar el perfil longitudinal, evitando realizar correcciones con las capas superiores que son más delgadas y costosas (AMAAC, 2010).

La utilización de extendedoras provistas con sensores y el uso frecuente del perfilómetro desde etapas tempranas de la construcción, permite obtener valores del IRI menores, situación que no prevalece en el medio mexicano, haciendo que los valores del PSI sean inferiores al esperado de 4.20.

Es importante considerar los valores obtenidos en la distribución de medias muestrales que se presentan en la presente tesis, debido sobre todo a que reflejan las condiciones prevalecientes en nuestro medio, alejadas la mayoría de las ocasiones de las condiciones altamente controladas que se tuvieron en el desarrollo de la metodología AASHTO 1993, y que afecta de manera directa los espesores obtenidos en los diseños, teniendo consecuencias no solo en el desempeño del pavimento, sino también, económicas.

VII. Conclusión.

En base al análisis desarrollado, tomando en consideración una distribución de medias muestrales obtenida al evaluar segmentos de 1 km de longitud, sobre pavimentos flexibles de nueva construcción, se concluye que no existe evidencia suficiente en el medio mexicano para sustentar la afirmación de que el valor medio poblacional del PSI inicial es 4.20, valor recomendado por el manual AASHTO 1993 para pavimentos flexibles de nueva construcción en los Estados Unidos de América.

Además de lo anterior, se sustenta en base a la realización de una prueba de hipótesis con un nivel de confianza del 95% y una potencia de 0.99, que el valor real del PSI inicial es menor a 4.20.



Considerando el resultado obtenido del intervalo de confianza, se concluye que el valor verdadero del PSI inicial en el medio mexicano puede ser cualquiera que se encuentre entre 3.78 y 3.74, lo cual considera un nivel de confianza del 95%.

El análisis se fundamentó en una muestra utilizada de tamaño 269, la cual es superior al tamaño mínimo necesario de 198, esto para tener una confianza del 95% de que el valor estimado de la media muestral del PSI inicial de 3.76, estará a no más del 5% del valor de la media poblacional.

De esta manera, se recomienda tomar en consideración un valor del PSI inicial de 3.76, para la determinación de los espesores en pavimentos flexibles de nueva construcción en el medio mexicano.

Dirección General de Bibliotecas UAQ



VIII. Bibliografía

AASHO. (1961). *Interim Guide for Design of flexible Pavement Structures*.

American Association of State Highway and Transportation Officials.

Washington, D.C.: AASHO.

AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for design of pavement structures*. American

Association of State Highway and Transportation Officials. Washington,

D.C.: AASHTO.

AMAAC. (2010). *El IRI definición e importancia. Recomendaciones para conseguir*

un buen IRI. México, D.F.: Asociación Mexicana del Asfalto A.C.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1961).

Interim Guide for Design of flexible Pavement Structures. Washington, D.C.:

AASHO.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993).

AASHTO Guide for design of pavement structures . Washington, D.C.:

AASHTO.

ASTM. (1995). *Standard Practices for Simulating Vehicular Response in*

Longitudinal Profiles of a Vehicular Traveled Surface ASTM E 1170-92.

Washington, DC: American Society for Testing Materials.

ASTM. (1998). *Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of*

Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling

Reference. Washington, DC: American Society for Testing Materials.

Box, G., & Hunter, S. (2008). *Estadística para investigadores. Diseño, innovación y*

descubrimiento. Barcelona, España: Reverté.

Cal y Mayor, R. (2007). *Ingeniería de tránsito. Fundamentos y aplicaciones*.

México: Alfaomega.



- de Sominihac, H. (2005). *Gestión de Infraestructura Vial*. Santiago de Chile: Alfaomega.
- Gutierrez, H., & de la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Karamihas, S., & Sayers, M. (1998). *The Little Book of Profiling*. Michigan: University of Michigan.
- Keraly, H., & Odoki, B. (1987). *Highway development management HDM-4. Analytical framework and model descriptions Volume 4*. Washington, D.C.: World Bank Publications.
- Kraemer, C. (2004). *Ingeniería de carreteras*. Madrid, España: McGraw-Hill.
- Montgomery, D. (2014). *Diseño y análisis de experimentos*. México, D.F.: Limusa Wiley.
- Sayers, M. (1986). *International experiment to establish correlations and standard calibration methods for road roughness measurement*. Washington, D.C.: World Bank.
- SCT. (2016). *N.CTR.CAR.1.01.009/16 Terracerías*. México, D.F.: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Shahin, M. Y. (2005). *Pavement management for airports, roads and parking lots*. New York, USA: Springer.
- Triola, M. F. (2004). *Elementary Statistics* (Novena edición ed.). Washington, D.C.: Pearson Education Inc.
- Ullidtz, P. (1987). *Pavement analysis*. Lingby, Denmark: Elsevier.
- Yoder, E. J., & Witczac, M. W. (1975). *Principles of pavement design*. Washington, D.C.: John Wiley & Sons.

ANEXO 1

Tramo N°	Cadenamien to inicial (km)	Cadenamien to final (km)	IRI (m/km)		IRI (m/km)	PSI
			Rodada Izquierda	Rodada Derecha		
1	0+000.00	1+000.00	1.63	1.84	1.73	3.65
2	0+000.00	1+000.00	1.85	1.91	1.88	3.55
3	0+000.00	1+000.00	1.75	1.82	1.79	3.61
4	0+000.00	1+000.00	1.49	1.61	1.55	3.77
5	0+000.00	1+000.00	1.79	1.84	1.82	3.59
6	0+000.00	1+000.00	1.82	1.94	1.88	3.55
7	0+000.00	1+000.00	1.89	1.56	1.72	3.65
8	0+000.00	1+000.00	2.13	1.78	1.96	3.50
9	0+000.00	1+000.00	1.54	1.29	1.41	3.87
10	0+000.00	1+000.00	1.18	1.08	1.13	4.07
11	0+000.00	1+000.00	1.37	1.23	1.30	3.95
12	0+000.00	1+000.00	1.40	1.23	1.31	3.94
13	0+000.00	1+000.00	1.54	1.29	1.41	3.87
14	0+000.00	1+000.00	1.67	1.64	1.66	3.70
15	0+000.00	1+000.00	1.65	1.47	1.56	3.77
16	0+000.00	1+000.00	1.64	1.56	1.60	3.74
17	0+000.00	1+000.00	1.28	1.32	1.30	3.95
18	0+000.00	1+000.00	1.26	1.19	1.23	4.00
19	0+000.00	1+000.00	1.40	1.43	1.42	3.86
20	0+000.00	1+000.00	1.13	1.19	1.16	4.05
21	0+000.00	1+000.00	1.11	1.12	1.11	4.08
22	0+000.00	1+000.00	1.94	1.51	1.72	3.66
23	0+000.00	1+000.00	1.73	1.65	1.69	3.68
24	0+000.00	1+000.00	1.53	1.42	1.48	3.82
25	0+000.00	1+000.00	1.49	1.50	1.49	3.81
26	0+000.00	1+000.00	1.59	1.46	1.52	3.79
27	0+000.00	1+000.00	1.52	1.46	1.49	3.81
28	0+000.00	1+000.00	1.53	1.45	1.49	3.81
29	0+000.00	1+000.00	1.57	1.43	1.50	3.80
30	0+000.00	1+000.00	1.71	1.64	1.67	3.69
31	0+000.00	1+000.00	1.55	1.28	1.42	3.87
32	0+000.00	1+000.00	1.64	1.46	1.55	3.77
33	0+000.00	1+000.00	1.66	1.54	1.60	3.74
34	0+000.00	1+000.00	1.62	1.62	1.62	3.72
35	0+000.00	1+000.00	1.80	1.83	1.81	3.60
36	0+000.00	1+000.00	1.86	1.68	1.77	3.62
37	0+000.00	1+000.00	1.81	1.54	1.67	3.69
38	0+000.00	1+000.00	2.07	1.82	1.94	3.51
39	0+000.00	1+000.00	1.69	1.71	1.70	3.67
40	0+000.00	1+000.00	2.09	1.92	2.01	3.47
41	0+000.00	1+000.00	1.82	1.72	1.77	3.62
42	0+000.00	1+000.00	1.39	1.49	1.44	3.85
43	0+000.00	1+000.00	1.32	1.24	1.28	3.96

Tramo N°	Cadenamien to inicial (km)	Cadenamien to final (km)	IRI (m/km)		IRI (m/km)	PSI
			Rodada Izquierda	Rodada Derecha		
44	0+000.00	1+000.00	1.36	1.23	1.30	3.95
45	0+000.00	1+000.00	1.44	1.32	1.38	3.89
46	0+000.00	1+000.00	1.27	1.18	1.23	4.00
47	0+000.00	1+000.00	1.83	1.58	1.71	3.67
48	0+000.00	1+000.00	2.10	1.49	1.80	3.61
49	0+000.00	1+000.00	1.65	1.36	1.50	3.80
50	0+000.00	1+000.00	1.53	1.42	1.47	3.83
51	0+000.00	1+000.00	1.32	1.34	1.33	3.93
52	0+000.00	1+000.00	1.40	1.42	1.41	3.87
53	0+000.00	1+000.00	1.26	1.26	1.26	3.98
54	0+000.00	1+000.00	1.22	1.28	1.25	3.98
55	0+000.00	1+000.00	1.47	1.55	1.51	3.80
56	0+000.00	1+000.00	1.50	1.44	1.47	3.83
57	0+000.00	1+000.00	1.68	1.49	1.59	3.75
58	0+000.00	1+000.00	1.64	1.42	1.53	3.79
59	0+000.00	1+000.00	1.69	1.43	1.56	3.76
60	0+000.00	1+000.00	1.94	1.72	1.83	3.59
61	0+000.00	1+000.00	1.54	1.46	1.50	3.81
62	0+000.00	1+000.00	1.49	1.44	1.47	3.83
63	0+000.00	1+000.00	1.50	1.50	1.50	3.80
64	0+000.00	1+000.00	1.73	1.54	1.64	3.71
65	0+000.00	1+000.00	1.69	1.46	1.58	3.75
66	0+000.00	1+000.00	1.78	1.55	1.67	3.69
67	0+000.00	1+000.00	1.56	1.57	1.57	3.76
68	0+000.00	1+000.00	1.98	2.22	2.10	3.41
69	0+000.00	1+000.00	1.85	2.18	2.01	3.47
70	0+000.00	1+000.00	1.73	1.96	1.85	3.57
71	0+000.00	1+000.00	1.55	1.68	1.62	3.73
72	0+000.00	1+000.00	1.54	1.67	1.61	3.73
73	0+000.00	1+000.00	1.72	1.81	1.76	3.63
74	0+000.00	1+000.00	1.74	1.47	1.60	3.74
75	0+000.00	1+000.00	1.52	1.29	1.40	3.87
76	0+000.00	1+000.00	1.35	1.15	1.25	3.98
77	0+000.00	1+000.00	1.33	1.24	1.29	3.96
78	0+000.00	1+000.00	1.56	1.32	1.44	3.85
79	0+000.00	1+000.00	1.42	1.28	1.35	3.91
80	0+000.00	1+000.00	1.43	1.25	1.34	3.92
81	0+000.00	1+000.00	1.33	1.31	1.32	3.93
82	0+000.00	1+000.00	1.48	1.25	1.36	3.90
83	0+000.00	1+000.00	1.49	1.74	1.61	3.73
84	0+000.00	1+000.00	1.35	2.00	1.67	3.69
85	0+000.00	1+000.00	1.31	1.88	1.59	3.74
86	0+000.00	1+000.00	1.65	1.58	1.62	3.73
87	0+000.00	1+000.00	1.52	1.40	1.46	3.84

Tramo N°	Cadenamien to inicial (km)	Cadenamien to final (km)	IRI (m/km)		IRI (m/km)	PSI
			Rodada Izquierda	Rodada Derecha		
88	0+000.00	1+000.00	1.51	1.30	1.40	3.88
89	0+000.00	1+000.00	1.69	1.41	1.55	3.77
90	0+000.00	1+000.00	1.67	1.48	1.57	3.76
91	0+000.00	1+000.00	1.48	1.42	1.45	3.84
92	0+000.00	1+000.00	1.48	1.54	1.51	3.80
93	0+000.00	1+000.00	1.91	1.73	1.82	3.59
94	0+000.00	1+000.00	1.63	1.53	1.58	3.75
95	0+000.00	1+000.00	1.45	1.36	1.41	3.87
96	0+000.00	1+000.00	1.73	1.77	1.75	3.64
97	0+000.00	1+000.00	1.55	1.55	1.55	3.78
98	0+000.00	1+000.00	1.49	1.29	1.39	3.88
99	0+000.00	1+000.00	1.42	1.26	1.34	3.92
100	0+000.00	1+000.00	2.74	1.92	2.33	3.27
101	0+000.00	1+000.00	2.20	1.98	2.09	3.42
102	0+000.00	1+000.00	1.90	1.94	1.92	3.53
103	0+000.00	1+000.00	2.26	1.88	2.07	3.43
104	0+000.00	1+000.00	2.86	2.03	2.44	3.21
105	0+000.00	1+000.00	2.04	1.63	1.84	3.58
106	0+000.00	1+000.00	2.21	1.60	1.91	3.53
107	0+000.00	1+000.00	2.16	1.70	1.93	3.52
108	0+000.00	1+000.00	2.07	1.57	1.82	3.59
109	0+000.00	1+000.00	1.32	1.22	1.27	3.97
110	0+000.00	1+000.00	1.81	1.36	1.58	3.75
111	0+000.00	1+000.00	1.51	1.22	1.37	3.90
112	0+000.00	1+000.00	1.66	1.51	1.59	3.75
113	0+000.00	1+000.00	1.65	1.41	1.53	3.79
114	0+000.00	1+000.00	1.49	1.19	1.34	3.92
115	0+000.00	1+000.00	1.45	1.31	1.38	3.89
116	0+000.00	1+000.00	1.60	1.30	1.45	3.84
117	0+000.00	1+000.00	1.68	1.55	1.61	3.73
118	0+000.00	1+000.00	1.65	1.48	1.57	3.76
119	0+000.00	1+000.00	1.50	1.47	1.49	3.82
120	0+000.00	1+000.00	1.76	1.57	1.66	3.70
121	0+000.00	1+000.00	1.70	1.72	1.71	3.66
122	0+000.00	1+000.00	1.46	1.43	1.45	3.84
123	0+000.00	1+000.00	1.54	1.51	1.53	3.79
124	0+000.00	1+000.00	1.67	1.60	1.63	3.71
125	0+000.00	1+000.00	1.60	1.54	1.57	3.76
126	0+000.00	1+000.00	1.70	1.48	1.59	3.75
127	0+000.00	1+000.00	1.73	1.40	1.56	3.76
128	0+000.00	1+000.00	1.59	1.41	1.50	3.81
129	0+000.00	1+000.00	1.60	1.45	1.53	3.79
130	0+000.00	1+000.00	1.79	1.52	1.66	3.70
131	0+000.00	1+000.00	1.64	1.52	1.58	3.75

Tramo N°	Cadenamien to inicial (km)	Cadenamien to final (km)	IRI (m/km)		IRI (m/km)	PSI
			Rodada Izquierda	Rodada Derecha		
132	0+000.00	1+000.00	1.59	1.40	1.49	3.81
133	0+000.00	1+000.00	1.55	1.41	1.48	3.82
134	0+000.00	1+000.00	3.04	2.49	2.76	3.03
135	0+000.00	1+000.00	1.92	1.68	1.80	3.60
136	0+000.00	1+000.00	1.77	1.90	1.84	3.58
137	0+000.00	1+000.00	1.88	1.99	1.93	3.52
138	0+000.00	1+000.00	1.99	2.02	2.01	3.47
139	0+000.00	1+000.00	2.17	2.22	2.19	3.36
140	0+000.00	1+000.00	1.98	2.13	2.06	3.44
141	0+000.00	1+000.00	1.76	1.78	1.77	3.62
142	0+000.00	1+000.00	1.53	1.24	1.39	3.89
143	0+000.00	1+000.00	1.21	1.06	1.14	4.07
144	0+000.00	1+000.00	1.24	1.19	1.22	4.01
145	0+000.00	1+000.00	1.39	1.24	1.32	3.93
146	0+000.00	1+000.00	1.55	1.28	1.42	3.86
147	0+000.00	1+000.00	1.47	1.35	1.41	3.87
148	0+000.00	1+000.00	1.70	1.41	1.55	3.77
149	0+000.00	1+000.00	1.84	1.72	1.78	3.62
150	0+000.00	1+000.00	1.37	1.33	1.35	3.91
151	0+000.00	1+000.00	1.16	1.30	1.23	4.00
152	0+000.00	1+000.00	1.23	1.54	1.39	3.89
153	0+000.00	1+000.00	1.24	1.61	1.42	3.86
154	0+000.00	1+000.00	1.40	1.43	1.42	3.86
155	0+000.00	1+000.00	1.28	1.22	1.25	3.98
156	0+000.00	1+000.00	1.31	1.31	1.31	3.94
157	0+000.00	1+000.00	1.40	1.32	1.36	3.91
158	0+000.00	1+000.00	1.60	1.62	1.61	3.73
159	0+000.00	1+000.00	1.48	1.57	1.53	3.79
160	0+000.00	1+000.00	1.55	1.48	1.52	3.80
161	0+000.00	1+000.00	1.56	1.60	1.58	3.75
162	0+000.00	1+000.00	1.50	1.49	1.50	3.81
163	0+000.00	1+000.00	1.45	1.47	1.46	3.84
164	0+000.00	1+000.00	1.69	1.56	1.63	3.72
165	0+000.00	1+000.00	1.93	1.56	1.75	3.64
166	0+000.00	1+000.00	1.76	1.67	1.72	3.66
167	0+000.00	1+000.00	1.50	1.52	1.51	3.80
168	0+000.00	1+000.00	1.53	1.53	1.53	3.79
169	0+000.00	1+000.00	1.75	1.60	1.67	3.69
170	0+000.00	1+000.00	2.01	1.72	1.86	3.56
171	0+000.00	1+000.00	2.06	2.11	2.09	3.42
172	0+000.00	1+000.00	2.11	2.09	2.10	3.41
173	0+000.00	1+000.00	2.04	1.87	1.96	3.50
174	0+000.00	1+000.00	1.61	1.56	1.59	3.75
175	0+000.00	1+000.00	1.60	1.54	1.57	3.76

Tramo N°	Cadenamien to inicial (km)	Cadenamien to final (km)	IRI (m/km)		IRI (m/km)	PSI
			Rodada Izquierda	Rodada Derecha		
176	0+000.00	1+000.00	1.12	1.15	1.13	4.07
177	0+000.00	1+000.00	1.18	1.10	1.14	4.06
178	0+000.00	1+000.00	1.18	1.04	1.11	4.09
179	0+000.00	1+000.00	1.61	1.51	1.56	3.76
180	0+000.00	1+000.00	1.70	1.45	1.58	3.75
181	0+000.00	1+000.00	1.88	1.99	1.94	3.52
182	0+000.00	1+000.00	2.24	1.63	1.94	3.51
183	0+000.00	1+000.00	2.10	1.37	1.73	3.65
184	0+000.00	1+000.00	1.46	1.15	1.31	3.94
185	0+000.00	1+000.00	1.53	1.24	1.38	3.89
186	0+000.00	1+000.00	1.61	1.26	1.43	3.86
187	0+000.00	1+000.00	1.41	1.44	1.42	3.86
188	0+000.00	1+000.00	1.70	1.49	1.60	3.74
189	0+000.00	1+000.00	1.59	1.37	1.48	3.82
190	0+000.00	1+000.00	1.43	1.31	1.37	3.90
191	0+000.00	1+000.00	1.50	1.48	1.49	3.82
192	0+000.00	1+000.00	1.77	1.75	1.76	3.63
193	0+000.00	1+000.00	1.77	1.65	1.71	3.66
194	0+000.00	1+000.00	1.54	1.56	1.55	3.77
195	0+000.00	1+000.00	1.45	1.41	1.43	3.86
196	0+000.00	1+000.00	1.53	1.36	1.44	3.84
197	0+000.00	1+000.00	1.72	1.57	1.64	3.71
198	0+000.00	1+000.00	1.63	1.64	1.63	3.72
199	0+000.00	1+000.00	1.58	1.72	1.65	3.70
200	0+000.00	1+000.00	1.55	1.70	1.63	3.72
201	0+000.00	1+000.00	1.45	1.55	1.50	3.81
202	0+000.00	1+000.00	1.69	1.51	1.60	3.74
203	0+000.00	1+000.00	1.62	1.63	1.62	3.72
204	0+000.00	1+000.00	1.42	1.28	1.35	3.91
205	0+000.00	1+000.00	1.38	1.18	1.28	3.96
206	0+000.00	1+000.00	1.38	1.24	1.31	3.94
207	0+000.00	1+000.00	1.35	1.16	1.25	3.98
208	0+000.00	1+000.00	1.51	1.36	1.44	3.85
209	0+000.00	1+000.00	1.41	1.19	1.30	3.95
210	0+000.00	1+000.00	1.35	1.11	1.23	4.00
211	0+000.00	1+000.00	1.39	1.32	1.35	3.91
212	0+000.00	1+000.00	1.24	1.17	1.20	4.02
213	0+000.00	1+000.00	1.35	1.24	1.29	3.95
214	0+000.00	1+000.00	1.34	1.18	1.26	3.98
215	0+000.00	1+000.00	1.28	1.31	1.29	3.95
216	0+000.00	1+000.00	1.61	1.69	1.65	3.70
217	0+000.00	1+000.00	1.34	1.99	1.67	3.69
218	0+000.00	1+000.00	1.46	2.09	1.78	3.62
219	0+000.00	1+000.00	1.54	2.16	1.85	3.57

Tramo N°	Cadenamien to inicial (km)	Cadenamien to final (km)	IRI (m/km)		IRI (m/km)	PSI
			Rodada Izquierda	Rodada Derecha		
220	0+000.00	1+000.00	1.65	1.95	1.80	3.60
221	0+000.00	1+000.00	1.30	1.19	1.24	3.99
222	0+000.00	1+000.00	1.44	1.45	1.44	3.85
223	0+000.00	1+000.00	1.49	1.51	1.50	3.81
224	0+000.00	1+000.00	1.71	1.70	1.70	3.67
225	0+000.00	1+000.00	1.56	1.47	1.52	3.80
226	0+000.00	1+000.00	1.35	1.37	1.36	3.91
227	0+000.00	1+000.00	1.80	1.60	1.70	3.67
228	0+000.00	1+000.00	1.93	1.76	1.84	3.58
229	0+000.00	1+000.00	1.67	1.73	1.70	3.67
230	0+000.00	1+000.00	1.67	1.50	1.58	3.75
231	0+000.00	1+000.00	1.64	1.67	1.65	3.70
232	0+000.00	1+000.00	1.78	1.60	1.69	3.68
233	0+000.00	1+000.00	1.52	1.51	1.51	3.80
234	0+000.00	1+000.00	1.52	1.59	1.56	3.77
235	0+000.00	1+000.00	1.68	1.86	1.77	3.62
236	0+000.00	1+000.00	1.50	1.26	1.38	3.89
237	0+000.00	1+000.00	1.79	1.76	1.77	3.62
238	0+000.00	1+000.00	1.88	1.61	1.75	3.64
239	0+000.00	1+000.00	1.59	1.56	1.57	3.76
240	0+000.00	1+000.00	1.74	1.55	1.65	3.71
241	0+000.00	1+000.00	1.62	1.32	1.47	3.83
242	0+000.00	1+000.00	1.62	1.44	1.53	3.79
243	0+000.00	1+000.00	1.30	1.30	1.30	3.95
244	0+000.00	1+000.00	1.24	1.17	1.21	4.02
245	0+000.00	1+000.00	1.30	1.29	1.29	3.95
246	0+000.00	1+000.00	1.08	1.04	1.06	4.13
247	0+000.00	1+000.00	1.21	1.12	1.17	4.04
248	0+000.00	1+000.00	1.22	1.12	1.17	4.04
249	0+000.00	1+000.00	1.54	1.37	1.45	3.84
250	0+000.00	1+000.00	1.87	1.53	1.70	3.67
251	0+000.00	1+000.00	1.69	1.56	1.63	3.72
252	0+000.00	1+000.00	1.83	1.83	1.83	3.59
253	0+000.00	1+000.00	1.86	1.73	1.79	3.61
254	0+000.00	1+000.00	1.91	1.93	1.92	3.52
255	0+000.00	1+000.00	1.58	1.50	1.54	3.78
256	0+000.00	1+000.00	2.04	2.16	2.10	3.41
257	0+000.00	1+000.00	1.98	1.83	1.90	3.54
258	0+000.00	1+000.00	1.71	1.71	1.71	3.66
259	0+000.00	1+000.00	1.61	1.69	1.65	3.71
260	0+000.00	1+000.00	1.84	1.45	1.64	3.71
261	0+000.00	1+000.00	1.74	1.60	1.67	3.69
262	0+000.00	1+000.00	1.87	1.52	1.69	3.67
263	0+000.00	1+000.00	1.96	1.70	1.83	3.59

Tramo N°	Cadenamien to inicial (km)	Cadenamien to final (km)	IRI (m/km)		IRI (m/km)	PSI
			Rodada Izquierda	Rodada Derecha		
264	0+000.00	1+000.00	1.62	1.49	1.55	3.77
265	0+000.00	1+000.00	2.13	1.91	2.02	3.46
266	0+000.00	1+000.00	2.09	1.62	1.85	3.57
267	0+000.00	1+000.00	1.80	1.53	1.67	3.69
268	0+000.00	1+000.00	1.54	1.39	1.47	3.83
269	0+000.00	1+000.00	1.77	1.54	1.65	3.70

Dirección General de Bibliotecas UAQ