

**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE
REGULARIDAD INTERNACIONAL -IRI-
CASO PÁCTICO:
PROYECTOS VIALES EN COLOMBIA.**

PAOLA CAROLINA BUENO CADENA

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ DC
DICIEMBRE 2006**

**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE
REGULARIDAD INTERNACIONAL -IRI-.**

**CASO PÁCTICO:
PROYECTOS VIALES EN COLOMBIA.**

PAOLA CAROLINA BUENO CADENA

Proyecto Para Optar al Título Magíster en Ingeniería Civil

DIRECTORES:

ING. GERMAN LLERAS

ING. CARLOS BENAVIDES

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

BOGOTÁ DC

DICIEMBRE 2006

“La Universidad de los Andes no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus estudiantes en sus trabajos de grado. Solo velará porque el trabajo sea guiado bajo una sólida fundación técnica sin que atente contra ninguna persona o entidad.”

DIRECTIVOS UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Rector Carlos Angulo Galvis

Vicerrector Asuntos Académicos José Rafael Toro

Vicerrectora Asuntos Administrativos Consuelo Carrillo Alonso

Secretaria General Maria Teresa Tobón

Director de Investigaciones José Luis Villaveces

Decano de la Facultad de Ingeniería Alan Gauthier

Director del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental Jorge Acevedo

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigaciones en Materiales y obras Civiles de la Universidad de los Andes –CIMOC-. Al Ing. Carlos Benavides por sus aportes técnicos en cuanto a la medición e interpretación de resultados del IRI. Al Ing. Jose Ignacio Rengifo por su ayuda en cuanto a las mediciones topográficas y al Ing. Germán Lleras por su asesoría.

FICHA TÉCNICA

TÍTULO Estudio, cálculo y medición del Índice de Rugosidad Internacional-IRI.
Caso práctico: Proyectos viales en Colombia

TEMA: Aclaraciones técnicas en cuanto a la implementación del IRI como parámetro para la recepción de proyectos viales en la ciudad de Bogotá.

OBJETO DE ESTUDIO: Plantear una solución objetiva a los problemas técnicos que se han generado mediante una serie de recomendaciones y una evaluación de la aplicabilidad de las exigencias en los proyectos de Bogotá.

ALCANCE: Describir y analizar el concepto básico del Índice de Regularidad Internacional y su aplicación al caso de las construcciones en Bogotá. También, analizar, calibrar y patronar el equipo de medición que emplea la Universidad de los Andes – Analizador de perfil longitudinal APL-.

UBICACIÓN ACADÉMICA: Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

PALABRAS CLAVES: Rugosidad, Índice de Rugosidad Internacional IRI, Analizador de perfil longitudinal APL, Nivel de Servicio NDS.

RESUMEN

El Índice de Rugosidad Internacional -IRI- se ha establecido recientemente en Colombia como parámetro de control para la recepción de proyectos viales. Sin embargo, se han presentado problemas y confusiones técnicas alrededor del tema por parte de los constructores y del Distrito. Este documento expone la aplicabilidad y validez de las exigencias en cuanto al IRI en el caso de las construcciones en Bogotá. De la misma forma, se muestran los resultados de la calibración y la validación del Analizador de perfil longitudinal (APL) de la Universidad de los Andes empleado para la determinación del IRI. Finalmente se analizan las mediciones sobre cinco tramos experimentales.

TABLA DE CONTENIDO

	PAG.
1. INTRODUCCIÓN	11
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. OBJETIVOS	16
3.1. Objetivo general	16
3.2. Objetivos específicos	16
4. CONCEPTUALIZACIÓN	18
4.1. Definición del índice de regularidad internacional -IRI- y equipos de medición	18
4.2. Relación del IRI con la calidad del servicio	23
4.3. Valores de la rugosidad en pavimentos de hormigón	25
4.4. Medida del iri mediante la navegación inercial utilizando el APL	28
4.5. Problemática actual	30
4.5.1. Compatibilidad de mediciones	31
4.5.2. Equipos y montajes representativo de una o dos huellas.	32
5. METODOLOGIA DE MEDICIONES DE CAMPO	34
5.1. Calibración y funcionamiento del apl de la Universidad de los Andes	35
5.1.1. Calibración en el laboratorio	36
5.1.2. Calibración en campo	36
5.2. Efecto de la regularidad superficial en el nivel de servicio de los tramos seleccionados	42
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46

6.1.	Aplicabilidad de las exigencias en el caso de las construcciones en Bogotá.	46
6.2.	Resultados de la medición del IRI con topografía.	50
6.3.	Resultados de la calibración del APL.	51
6.3.1.	Resultados de la calibración en el laboratorio.	51
6.3.2.	Resultados de la calibración en el campo.	53
6.4.	Resultados de las mediciones de la relación del IRI con la velocidad a flujo libre.	59
7.	CONCLUSIONES	63
8.	BIBLIOGRAFÍA	67
9.	ANEXOS	81

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Calificación de la calidad de la vía de acuerdo al IRI para rutas asfálticas o con tratamiento superficial.	26
Ilustración 2	Equipo Analizador de perfil longitudinal.	28
Ilustración 3	Esquema del analizador de perfil longitudinal.	30
Ilustración 5	Calibración de laboratorio.	53
Ilustración 6	Escala de rugosidad.	49

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1	Nivelación con miray nivel. Calibración de campo.	54
Gráfica 2	Nivelación con miray nivel. Calibración de campo.	54
Gráfica 3	Nivelación con miray nivel. Calibración de campo.	55

Gráfica 4 Nivelación con mira y nivel. Calibración de campo.	55
Gráfica 5 Nivelación con mira y nivel. Calibración de campo.	56
Gráfica 6 Correlación entre los resultados APL- Topografía	58

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Equipos para determinar la regularidad.	20
Tabla 2 Resultados de las iteraciones en el SPDA PL..	57
Tabla 3 Mediciones de velocidad en los tramos en estudio	60
Tabla 4 Resultados de las mediciones sobre los tramos..	61



1. INTRODUCCIÓN

La rugosidad, son las alteraciones del perfil longitudinal directamente relacionadas con el estado de una vía en su capa superficial. Esta propiedad afecta no solo la seguridad y la comodidad de los usuarios, sino que también influye en los costos de operación de los vehículos que transitan por una determinada vía. El Índice de Regularidad Internacional (IRI) es una propiedad del perfil de una vía definido por el Banco Mundial como una escala estándar para la medición de la rugosidad. El IRI está definido por la norma NLT-330/98 como “un valor promedio sobre una longitud L , que se puede emplear en sistemas de gestión de firmes para la conservación de pavimentos, en donde se evalúa la regularidad superficial de grandes redes de carretera o como elemento de control de calidad de la regularidad superficial de obras de pavimentación”.

Recientemente en Colombia, particularmente en la ciudad de Bogotá, se ha introducido el concepto del IRI como un parámetro de control para la recepción de diferentes proyectos viales. Sin embargo, se han presentado problemas que impiden recibir las obras y suscribir el acta de finalización de las mismas. Estos problemas tienen su origen en los abismos técnicos y en la falta de claridad -con respecto a la medición, cálculo e interpretación del IRI- con la que cuentan los técnicos de nuestro país.



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

El Distrito decidió incluir este índice como parámetro para la entrega de las obras y los constructores aceptaron los términos exigidos. No obstante, los constructores al ejecutar los proyectos fueron percibiendo algunos aspectos que imposibilitarían la entrega de las obras por la no obtención del valor requerido de IRI. Por ejemplo, algunos han tenido que construir el pavimento en tramos cortos por problemas con la adquisición de predios. Esto hace que los constructores quieran descontar ciertas zonas de medición como las juntas de construcción, mientras otros quieran descontar las que han denominado “interferencias” como los pozos de inspección y las alcantarillas, entre otros. Lo que con todo este tema se puede advertir, es la gran confusión existente entre los técnicos y los constructores. No se tiene claridad en los procedimientos, ni en las metodologías, equipos, uso, aplicación, interpretación y validez de los mismos.

Este trabajo de Tesis presenta un análisis de las metodologías encontradas y de los procedimientos establecidos acerca del IRI. En síntesis este proyecto aplica los conceptos que han sido mundialmente estudiados al caso de las construcciones en Bogotá – sin referirse a ninguna en específico- identificando la ambigüedad que se maneja alrededor de este tema e intentando entender las condiciones y razones **técnicas** de cada uno de los actores involucrados en el proceso.

Como una segunda parte experimental, se debe calibrar el analizador del Perfil Longitudinal (APL) de la Universidad de Los Andes. De esta manera será posible realizar mediciones en diferentes vías, determinado así diferentes valores de



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

rugosidad. Finalmente se intentará demostrar que la velocidad de flujo libre de los vehículos varía de acuerdo con el valor del IRI. De esta manera se propone calcular el nivel de servicio basado en la metodología convencional, pero ahora incluyendo un factor que había sido hasta entonces erróneamente despreciado en las evaluaciones de calidad: la regularidad superficial de las vías.

Como proyecto de grado no puede ser reproducido total ni parcialmente por ninguna persona ni entidad puesto que se trata de un estudio con fines netamente académicos enfocados hacia los principios del aprendizaje. Este estudio se divide en dos partes básicas: una teórica y una experimental. En la sección teórica se profundiza en la bibliografía existente, y también se aplica al caso de carreteras urbanas en las cuales no se ha ahondado. Por otra parte en la sección experimental se emplean los conceptos emitidos, para de esta forma adaptar y acercar la ideología con la pragmática.



2. JUSTIFICACIÓN

“El índice de Regularidad Internacional, que tan de moda se ha puesto en los últimos 3 años en nuestras carreteras y autovías, aún sigue siendo incomprensible para la mayoría de los técnicos¹”.

El propósito imparcial del trabajo, es llenar el vacío que se tiene acerca de la medición y del concepto de este parámetro en las vías. La situación actual en el país es la siguiente: los dueños de los proyectos solicitan en los contratos un valor de IRI específico para los tramos que se van a construir o incluso que ya están construidos. Sin embargo, hay constructores que argumentan la inestabilidad de los parámetros de exigencia y cuestionan la aplicabilidad de los conceptos tomados de los estudios y de las experiencias de otros países. El abismo técnico alrededor de este tema es muy fuerte y por tanto se presentan demandas y ausencia de fallos bajo preceptos de conceptos técnicos apropiados, generando la imposibilidad de suscribir el acta de finalización de los contratos. Por esta razón es de gran importancia analizar la teoría en cuanto al IRI, los procedimientos, la norma, los equipos y la aplicabilidad de estos conceptos en la situación actual de los proyectos de la ciudad. El fin último de este trabajo de Tesis es determinar bajo que condiciones y/o circunstancias tienen o no los constructores la razón.

Reconociendo la importancia de la funcionalidad de la vía como reflejo de la rugosidad de la misma se propone un estudio similar al realizado por el Instituto

¹ Melis, Manuel (1992, p 26).



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

Mexicano del Transporte el cual consiste en una metodología adaptada para la evaluación del nivel de servicio. Esta metodología estará basada en el Manual de capacidad vial y niveles de servicio de la Secretaría de Tránsito².

² El resultado de este trabajo **no podrá** ser utilizado como base para ningún argumento en cuanto al tema, puesto que se trata de un trabajo de investigación propio y no de un documento técnico de la Universidad de los Andes.



3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

El presente trabajo de Tesis tiene por objeto el Estudio del modelo, cálculo y medición del índice de Regularidad Internacional (IRI) en pavimentos flexibles y rígidos como parámetro de confortabilidad al transitar en vías urbanas. Lo anterior, con el fin de plantear una solución objetiva a los problemas técnicos que se han generado mediante una serie de recomendaciones y una evaluación de la aplicabilidad de las exigencias en los proyectos de Bogotá.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir y analizar el concepto básico del Índice de regularidad internacional, su historia, sus preceptos y su aplicación al caso de Bogotá.
- Establecer los parámetros de medición que se deben tener en cuenta para obtener un índice representativo y de esta forma poder juzgar certeramente la calidad del pavimento con respecto a su rugosidad.
- Examinar y estudiar el equipo de medición que emplea la Universidad de los Andes para poder llevar a cabo las mediciones comparativas entre los dos tipos de pavimento y de esta forma obtener conclusiones fehacientes.
- Realizar la calibración y el patronamiento del APL de la Universidad de los Andes.



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

- Definir las confusiones que se han presentado entre los técnicos colombianos al rededor de este tópico. Asimismo, interpretar los argumentos de cada una de las posiciones.
- Establecer el efecto de la regularidad superficial en el nivel de servicio que ofrece una determinada vía.
- Aplicar los conceptos teóricos al caso de las construcciones de la ciudad de Bogotá y analizarlos mediante trabajo de campo. De la misma forma, establecer parámetros de calificación de la calidad del servicio relacionados con el IRI y con la capacidad vial.



4. CONCEPTUALIZACIÓN

El presente capítulo tiene por objeto presentar sintetizadamente los conceptos técnicos que existen alrededor del IRI: su definición, aplicación, análisis y medición. Así mismo se explica el funcionamiento del equipo con el que la Universidad de los Andes, a través de su Centro de investigación en materiales de obras civiles (CIMOC), lleva a cabo las mediciones del Índice de Regularidad. Este numeral tiene por objeto el discernimiento del concepto de la rugosidad en el perfil de una vía y de todos los aspectos que abarca la concentración al caso de las obras en Bogotá³. En primera instancia se define el IRI y se cuantifica su relación con la calidad del servicio para de esta manera explicar la problemática actual de varios proyectos viales de la ciudad de Bogotá.

4.1. DEFINICIÓN DEL INDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL -IRI- Y EQUIPOS DE MEDICIÓN

La evolución del comportamiento de los pavimentos es una tarea que constantemente los constructores deben realizar. Esta evolución corresponde a la respuesta de la estructura frente a las cargas solicitadas. A su vez se debe determinar la “serviciabilidad” que la vía ofrece a los usuarios. Esta serviciabilidad se ve marcada por el deterioro de la estructura multicapa que en un principio fue

³ El estado del arte que se resume a continuación es de autoría propia pero está basado en los diferentes estudios que se han adelantado acerca del IRI en el ámbito nacional e internacional.



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

diseñada para soportar las cargas del tráfico y el clima. Uno de los principales indicadores del desgaste de una vía o de un tramo es el valor de la rugosidad de la superficie. Para esto se debe tener en cuenta que las fallas y el comportamiento de los pavimentos flexibles y de los pavimentos rígidos son diferentes.

Por otra parte, la regularidad en la superficie afecta no solo la calidad del servicio percibido por los usuarios sino que también repercute en la seguridad de la vía y en los costos de operación de los vehículos que transitan por ella. La regularidad no solo es un indicador de confort y de seguridad en las vías. Es decir, afecta directamente la operación de los vehículos tales como desgaste de llantas, consumo de combustible, repuestos etc. De acuerdo a esto, determinar el estado de la regularidad de la superficie de las vías en cualquier momento de su vida útil, es de gran importancia para establecer criterios de mantenimiento y bajo un sistema de calidad eficiente lograr implantar acertadas acciones preventivas y correctivas.

Las medidas de rugosidad indican las irregularidades en la capa de rodadura o en las placas de concreto, según sea el tipo de pavimento. Debido a su importancia, a través de la historia se han desarrollado diversas metodologías y equipos para la cuantificación de la regularidad superficial en los pavimentos. La siguiente tabla muestra resumidamente los diferentes tipos de equipos existentes para la cuantificación de la regularidad superficial:

**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ****Tabla 1 Equipos para determinar la regularidad. Fuente: Washington Department of Transport.**

EQUIPO	GRADO DE PRECISIÓN	IMPLEMENTACIÓN	COMPLEJIDAD DEL EQUIPO	OBSERVACIONES
Perfilógrafos	Media	Control de calidad y recepción de obras	Simple	Estos equipos no son prácticos para evaluar la condición de redes viales.
Tipo respuesta	Media	Monitoreos de la red vial	Compleja	Los resultados obtenidos entre estos equipos no son comparables ya que dependen de la dinámica particular del vehículo y no son estables en el tiempo.
Nivel y estadía	Muy alta	Mediciones del perfil del pavimento y calibraciones	Simple	El uso de estos equipos para proyectos largos es impráctico y los costos son muy elevados.
Dipstick	Muy alta	Mediciones del perfil del pavimento y calibraciones	Muy simple	Se utiliza para mediciones del perfil de pavimentos en longitudes relativamente pequeñas.
Perilómetro inercial	Muy alta	Monitoreos y recepción de proyectos viales	Muy compleja	Equipos de alta precisión que permiten la comparación de resultados y son estables en el tiempo. Además pueden ser utilizados para calibración de los equipos tipo respuesta.

El IRI fue desarrollado de acuerdo al experimento internacional IRRE (international Roughness Experiment) con el objetivo de unificar la cuantificación de la rugosidad y en respuesta a las confusiones que se estaban presentando por las diversas técnicas y equipos existentes. La ASTM E-950-98 separa los equipos en cuatro clases diferentes. Esta clasificación se hace de acuerdo a los intervalos longitudinales de almacenamiento de datos y a la resolución de mediciones verticales. Las clases son las siguientes:



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

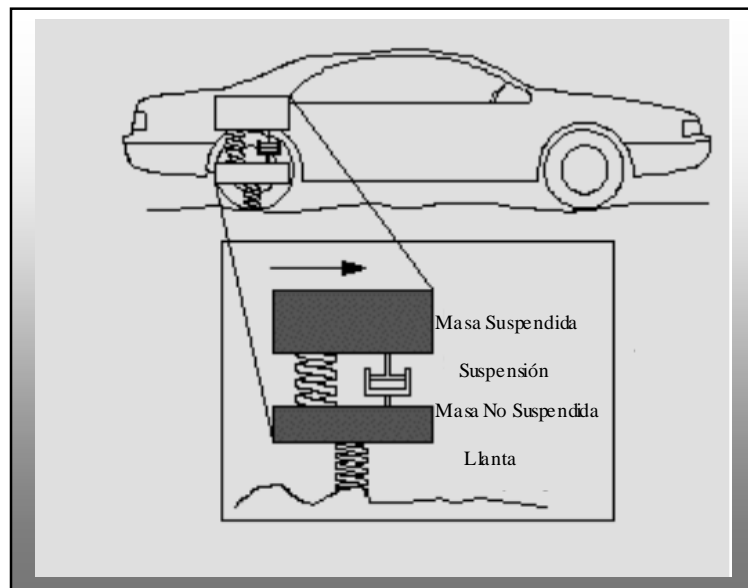
- Clase I –Perfiómetros de precisión-: Son los métodos más precisos para la determinación del IRI. Estos métodos solicitan la medición precisa del perfil longitudinal de una huella. Algunos ejemplos de los métodos de esta clase son: mira y nivel, viga y nivel y nuevos perfilómetros. La característica más importante de los métodos de clase I es su alta calidad en las mediciones. Sin embargo, no son recomendables para la toma de grandes cantidades de datos debido a la incertidumbre asociada y a la baja producción de estos equipos. Existen también perfilómetros dinámicos que son rápidos y además brindan mediciones de alta calidad, pero su costo es muy alto.
- Clase II- Otros métodos perfilométricos-: Al igual que los métodos de Clase I se fundamentan en el cálculo del perfil en el sentido de la vía. No obstante, no ofrecen la precisión de los primeros.
- Clase III –Estimaciones- : Estos métodos se basan en sistemas de medición por reacción y en la posterior conversión de estos datos a la escala IRI utilizando ecuaciones de correlación. Las ecuaciones de calibración se obtenían generalmente de la calibración de los equipos utilizados para la medición por respuesta con los equipos correspondientes a la clase I.
- Clase IV – métodos subjetivos-: Los métodos de esta clase son utilizados cuando los requerimientos de la precisión de la información no son altos o cuando hay razones económicas fuertes. Estos métodos consisten en la estimación de la rugosidad mediante la determinación de la comodidad de los usuarios o mediante la utilización de equipos sin calibrar para tener órdenes de magnitud cercanos al real.



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

El IRI se define con el modelo matemático del cuarto de coche (ver Ilustración 1) que simula la suspensión y el movimiento de las masas de un cuarto de vehículo. El IRI en unidades de pendiente, se determina como desplazamiento acumulado sobre la distancia recorrida.

Ilustración 1 Modelo del Cuarto de coche. Fuente: Adaptado de Ventura, J. et al.



La masa suspendida representa el chasis del carro, mientras que el movimiento de la masa no suspendida representa el ensamblaje de la rueda. Entre las masas se muestra un resorte y un amortiguador que actúan como la suspensión del sistema, mientras que el resorte que aparece al final caracteriza la capacidad de compresión del neumático de la rueda.

En conclusión el IRI indica la diferencia entre el alineamiento longitudinal teórico y el perfil que se mide después de que la vía se encuentra funcionando o después de su



construcción. Es en este punto donde se introducen los patrones de los procesos constructivos en los valores del IRI y consecuentemente en la calidad del servicio.

4.2 RELACIÓN DEL IRI CON LA CALIDAD DEL SERVICIO

Un pavimento se diseña principalmente de acuerdo a las cargas solicitadas a lo largo de su vida útil. Pese a esto los pavimentos presentan una curva de comportamiento que decrece a medida que el número de ejes equivalentes acumulados va aumentando en el tiempo. Este deterioro físico afecta negativamente el nivel de servicio de una vía aunque determina la necesidad de intervención y de inyección de capital para el mantenimiento de la misma. Uno de los principales inconvenientes de los constructores es que se han visto obligados a cumplir con el mismo valor del IRI en la etapa de mantenimiento de los proyectos viales, que el determinado en la etapa de construcción.

“El IRI -índice de Regularidad internacional- es una medida estándar de regularidad superficial en las carreteras, aceptada por el Banco Mundial en 1986”. En la bibliografía referente al nivel de serviciabilidad en relación con el IRI, se encuentran tres modelos. Estos modelos se resumen a continuación⁴:

- Modelo empleado por el HDM 111 –Paterson 87 -: Esta relación es aplicable para pavimentos hechos con materiales bituminosos. La Ecuación se dedujo

⁴ Solminihaç, H. (2001, p 109)



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

en base a datos recogidos de cuatro fuentes distintas. Brasil, Texas, Sudáfrica y Pensilvania.

$$PSI = 5e^{\left(\frac{-IRI}{5.5}\right)}$$

Ecuación 4-1 Índice de Serviciabilidad presente.⁵

- Modelo desarrollado por B. Al-Omari y M.I. Darte – Al Omari, 1994-: Estas relaciones fueron desarrolladas separadamente para pavimentos asfálticos y de hormigón, en base a información de los Estados de Louisiana, Michigan, New Jersey, New México, Ohio e Indiana en los Estados Unidos de América. A pesar de lo anterior, por la inexistencia de diferencias significativas entre los modelos, se recomendó el uso de la siguiente relación no lineal para todo tipo de pavimento:

$$PSI = 5e^{(-0.26IRI)}$$

Ecuación 4-2 Índice de Serviciabilidad presente.

- Modelo desarrollado por Dujstín-Arroyo –Dujstín, 95-: A partir de los datos obtenidos por el equipo de investigación del AASHTO Road test, se obtienen las ecuaciones para cada tipo de pavimento:

$$\text{Hormigón : } PSI = 7.10 - 2.19(IRI)^{0.5}$$

$$\text{Asfalto : } PSI = 5.85 - 1.68(IRI)^{0.5}$$

Ecuación 4-3 Índice de Serviciabilidad presente.

⁵ PSI: Índice de serviciabilidad presente.



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

Los anteriores modelos son la base para la determinación de la relación entre el IRI y una medida de calidad del servicio que representa la variación de la serviciabilidad o la condición del pavimento con respecto a la regularidad del mismo. Se puede observar que a medida que el valor del IRI aumenta, es decir a medida que la condición de la vía se hace deficiente, el índice de serviciabilidad presente disminuye.

En este trabajo de tesis se pretende establecer una valoración del nivel de servicio que ofrece la vía en estudio mediante la medición de la rugosidad en la superficie del pavimento. Esta cuantificación de calidad del servicio se puede hacer de dos maneras diferentes. La primera a través de la determinación de los índices de serviciabilidad en base a los modelos presentados anteriormente pero previamente calibrados y adaptados a las condiciones de la ciudad de Bogotá. La segunda se fundamenta en una adaptación de la metodología tradicional para la determinación del nivel de servicio. Esta adaptación consiste en la vinculación del valor del IRI como parámetro para determinar el nivel de servicio de una vía.

4.3 VALORES DE LA RUGOSIDAD EN PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

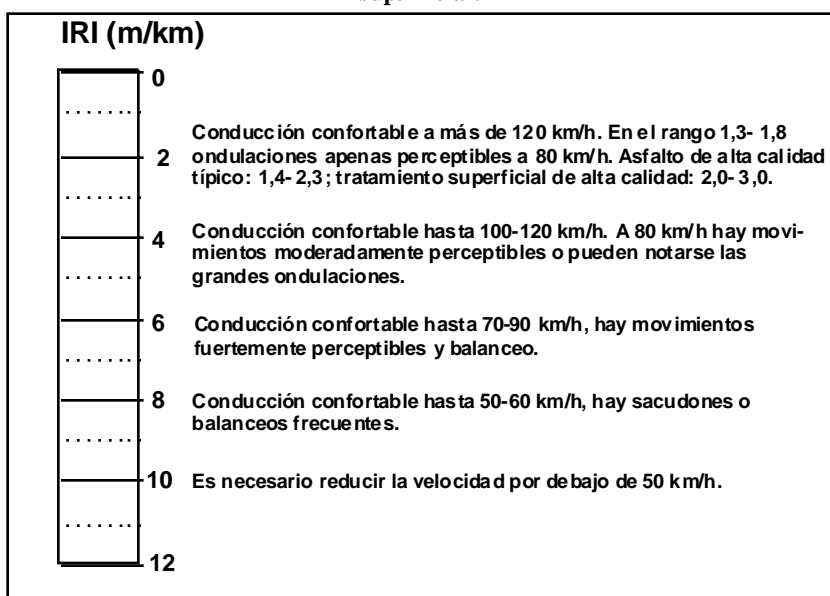
Una de los constantes argumentos de los constructores es que con los pavimentos rígidos o semirígidos las exigencias deben ser menores. Lo anterior atendiendo a que los pavimentos hechos con placas de concreto tienen una rugosidad inicial mayor que la de los pavimentos flexibles.



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

La bibliografía al respecto llega a tocar parcialmente este tema. Es decir, varios estudios afirman que aunque la rugosidad de los pavimentos rígidos es mayor, es posible cumplir con los estándares de calidad definidos por la American Society for testing and materials (ASTM) para pavimentos flexibles. La siguiente figura fue tomada de la ASTM E1926-98- "Standard Practice for computing International Roughness Index of roads from longitudinal profile measurements"- e indica la calificación de la calidad de la vía con respecto al IRI en pavimentos flexibles.

Ilustración 2 Calificación de la calidad de la vía de acuerdo al IRI para rutas asfálticas o con tratamiento superficial.



Diferentes experimentos alrededor del mundo han podido comprobar que si se siguen determinados parámetros de construcción es posible tener pavimentos de hormigón con un IRI comparable con el máximo esperado para pavimentos asfálticos de alta calidad. Por ejemplo, un estudio en Argentina llevó a cabo mediciones del IRI en diferentes secciones de pavimento rígido donde se variaban



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

los equipos, las técnicas y los métodos constructivos. Este estudio llevado a cabo por Dalamier y Torrent efectuó mediciones del IRI en ocho secciones de pavimentos de hormigón construidas en este país entre 1995 y 1999. Se encontró lo siguiente:

1. Con pavimentadoras potentes y modernas, con logísticas apropiadas de producción y transporte del hormigón y con personal entrenado y experimentado, a todos los niveles, es posible construir rutas de hormigón con una rugosidad comparable a la de rutas asfálticas de alta calidad.
2. Los resultados obtenidos en las distintas Secciones varían mucho, según la tecnología aplicada en cada una de ellas. El IRI promedio de las Secciones varió desde valores cercanos a 4 m/km a valores inferiores a 2 m/km.
3. Los valores de IRI obtenidos fueron disminuyendo cronológicamente, lo que revela la importancia de la transferencia de experiencia y “know-how” de una obra a la siguiente.

De acuerdo a este estudio se puede observar que el valor del índice de rugosidad varía según el método constructivo y la estrategia de solución empleada. Este estudio así como muchos otros demuestra que ha sido posible cumplir con valores de rugosidad semejantes en pavimentos construidos con asfalto o con losas de concreto.



4.4. MEDIDA DEL IRI MEDIANTE LA NAVEGACIÓN INERCIAL UTILIZANDO EL APL

“Para determinar el IRI mediante el APL se emplea un modelo matemático que simula la suspensión y masas de la cuarta parte de un vehículo tipificado que circula a 80km/h por el tramo de carretera que se pretende evaluar⁶. El IRI es una medida que depende de longitud del tramo y se obtiene mediante la simulación de la vibración relativa de las dos masas de un vehículo.

Para el segmento experimental de este trabajo de Tesis se utilizará el APL de la Universidad de los Andes. Este equipo fue diseñado por Laboratoire Central des Ponts et Chaussées y puede ser utilizado en cualquier tipo de pavimento. El equipo que permite llevar a cabo pruebas sobre varios tipos de pavimento en diversas condiciones ambientales, se muestra a continuación:

Ilustración 3 Equipo Analizador de perfil longitudinal. Fuente: Archivo CIMOC.



⁶ Tomado de la definición de la NLT-330



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

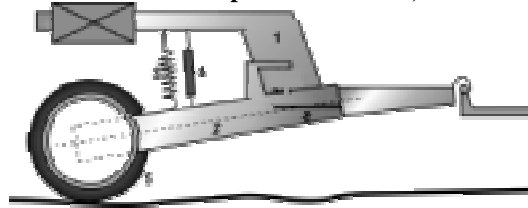
Este equipo consta básicamente de un chasis, un resorte, una rueda, un amortiguador y un sistema de adquisición de datos. Se determinan los desplazamientos verticales de las dos masas (masa suspendida y masa no suspendida) con relación a la longitud y mediante la formulación de un sistema de ecuaciones diferenciales y la aplicación de la metodología planteada por el Banco Mundial, se determina el índice⁷. El laboratorio de estructuras, geotecnia y pavimentos de la Universidad de los Andes, desarrolló un software que permite calcular el valor del IRI. Este software permite introducir las calibraciones periódicas que se le hacen al equipo.

El APL consta de un remolque de medida tirado por una camioneta y un sistema de registro de datos colocado en el interior del vehículo remolcante. El remolque está constituido por un chasis, una rueda y un acelerómetro ubicado en el centro de rotación de la rueda. El chasis (1) se apoya en un brazo con la rueda (2) por medio de un resorte (3) y de un amortiguador (4) que permite que se asegure un contacto permanente de la rueda (5) sobre la carretera⁸. Esta rueda puede soportar sin perder algún contacto aceleraciones verticales de 10g. El acelerómetro ubicado sobre el eje de rotación de la rueda, registra el movimiento de la misma permitiendo luego determinar el perfil longitudinal de la vía. La suspensión es blanda y de elevado amortiguamiento permitiendo una respuesta óptima. La medición se hace siempre en la huella izquierda del carril que se transita como se observa en la Ilustración 3.

⁸ Ver Ilustración 4.

**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

Ilustración 4 Esquema del analizador de perfil longitudinal.
Fuente: Adaptado de Murillo, C.



El vehículo está unido al remolque por medio de un cardan y, por esta razón, el movimiento del vehículo no influye sobre las medidas. Durante el curso de la medida el movimiento vertical de la rueda provoca una aceleración sobre el eje de la misma, esta aceleración se registra por medio de un acelerómetro, que convierte esta señal en un voltaje proporcional a la medida. El voltaje que arroja el sensor se transmite a un sistema de adquisición de datos que realiza la conversión análogo digital para ser almacenada en la computadora portátil ubicada en el interior de la camioneta⁹.

4.5 PROBLEMÁTICA ACTUAL

La determinación del IRI es uno de los principales parámetros de control para la recepción de proyectos viales. A la fecha, se han presentado problemas con la entrega de las obras ya construidas y por construir para la adecuación de proyectos viales de la ciudad de Bogotá D.C. Estos problemas obedecen al incumplimiento del valor del IRI exigido en los contratos suscritos. En este proceso se ven involucrados varios actores. Por una parte se tiene la posición de los constructores de las obras y por otra parte la de los técnicos representantes del Distrito. Entre estos actores se ha generado una problemática por las dificultades referentes a la suscripción del

⁹ La descripción del APL fue Tomada de Murillo, C. (2000^a y 2000b)



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

acta de finalización de las obras. La problemática obedece básicamente a que no se tienen claros los conceptos de medición e interpretación del IRI. Adicionalmente, se presentan confusiones en la manera de analizar y auditar los resultados de medición. Por esta razón esta investigación pretende establecer los parámetros bajo los cuales se debería medir, analizar y evaluar la rugosidad en las obras de la ciudad. También se intenta explicar conceptos técnicos que han sido motivo de confusiones y de discusiones por parte de los actores implicados en este conflicto.

Se aclara nuevamente que son solo recomendaciones y que bajo ningún motivo este documento está avalado por la Universidad de los Andes para ser utilizado como soporte técnico relativo al tema.

4.5.1. Compatibilidad de mediciones

El IRI es una propiedad del perfil longitudinal de la vía. Existen diversas metodologías y equipos para su cuantificación. Aunque el perfil más exacto se obtiene de los resultados de medición con mira y nivel, no es práctico ni económico cuantificar este índice con estos equipos topográficos. A lo largo de los años se han desarrollado equipos tales como el APL, el ROMDAS, el DIPSTICK, el PRORUT entre otros. Sin embargo, no todos los perfilómetros miden con igual exactitud cada una de las propiedades de la superficie de las vías. “la Validez de un perfilómetro depende de la intensidad de su uso¹⁰. Por ejemplo el DIPSTICK es útil para realizar

¹⁰ Sayers, Karanikas. (1996, p 11)



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

una medición de rugosidad pero no es bueno para mostrar algunos rasgos del perfil que son más pequeños que la distancia entre sus apoyos.

Por otra parte, para hacer comparables dos mediciones se debe garantizar que la distancia sobre la que se mide el IRI sea la misma, debido a que este es un valor promedio sobre una determinada longitud. Adicionalmente, se debe asegurar que se está midiendo sobre la misma línea del perfil longitudinal de la vía.

Por otra parte, los equipos presentan diferencias de precisión. En este aspecto se ha encontrado que los perfilómetros inerciales –como el APL de la Universidad de los Andes– arrojan resultados de gran exactitud y precisión en cuanto a la rugosidad se refiere. Sin embargo, es frecuente que se intenten comparar directamente los resultados arrojados por dos equipos cuyo funcionamiento es diferente. Para lograr una comparación representativa se debe tener en cuenta la calibración y el patronamiento de cada equipo, esto es establecer una escala unificada para poder confrontar los resultados. De esta manera se establece una relación entre los resultados del equipo y los resultados teóricos reales que pueden ser evaluados mediante la correcta calibración del mismo o mediante la validación de sus resultados. Solo teniendo en cuenta este procedimiento, se hacen comparables las mediciones entre diferentes equipos.

4.5.2. Equipos y montajes representativo de una o dos huellas

Existen diferentes modelos para la evaluación de la rugosidad superficial. Por ejemplo, el analizador del perfil longitudinal APL es clasificado como un equipo de



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

medición de una huella del carro mientras que el equipo ROMDAS determina un IRI representativo de las dos huellas. Se han presentado confusiones al intentar comparar los resultados entre equipos diferentes y que además no han determinado el perfil en el mismo sitio del corredor estudiado, es decir bajo la misma línea longitudinal. Existen diferentes equipos – ver Tabla 1- cuya complejidad y grado de precisión son diferentes. Por lo tanto no es correcto intentar comparar directamente los resultados provenientes de dos equipos con características disímiles. De acuerdo a esto el Instituto de Transporte de la Universidad de Michigan emitió un artículo desarrollado por Thomas Gillespie¹¹, en este artículo se afirma lo siguiente:

Un aspecto relevante de la medición del IRI que se ha prestado para confusiones es la escogencia de equipos representativos de una o dos huellas. Las consecuencias de esta escogencia no son triviales. El valor del IRI – se asume que se escoge exactamente en la misma línea del perfil – de un sistema basado en una sola huella es 10 a 20% menor que el promedio del IRI obtenida con un equipo representativo de las dos huellas.

También se afirma en este estudio que pesar que cualquier equipo puede ser válido en cierta forma para determinar las propiedades del perfil, el equipo estándar es aquel representativo de una sola huella pues provee unas indicaciones mas precisas de las condiciones de la vía.

¹¹ Gillespie(1992, p 11)



5. METODOLOGIA DE MEDICIONES DE CAMPO

Este capítulo tiene por objeto el planteamiento de la metodología de la segunda parte de este trabajo de Tesis: Las mediciones de campo. Estas mediciones van encaminadas hacia diferentes fines. El primero, la calibración del APL. El segundo, la determinación de la influencia de la rugosidad superficial en el nivel de servicio que ofrece una vía. El tercero y no menos importante es lograr la comparación de las mediciones en diferentes tipos de pavimento y poder de esta forma identificar si las exigencias hechas en la actualidad en los pavimentos rígidos en las calzadas de Transmilenio son admisibles o no.

5.1. REVISIÓN DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

Con el fin de abordar el tema del IRI desde un punto de vista técnico, se realizó una revisión completa de la documentación existente a nivel internacional y nacional. Esta revisión incluye el estudio de textos, documentos emitidos por técnicos de la ciudad, artículos avalados y demás. También se consultaron normas y documentos del Banco Mundial relacionados con la presente investigación.

5.2. REVISIÓN DEL CASO DE ESTUDIO DE BOGOTÁ

Con el fin de entender la problemática de la ciudad, se investigó la posición y los argumentos de cada uno de los actores involucrados en el proceso. Esta información se recopiló con el fin de proponer una solución a las controversias –sin referirse a ningún proyecto en específico- que se han presentado últimamente.



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

Este documento no podrá ser reproducido ni total ni parcialmente por ninguna persona ni entidad como base para la solución de ningún conflicto legal. Se trata de una investigación técnica, imparcial, autónoma y exenta de cualquier presión. La Universidad de los Andes no se hace responsable de los conceptos emitidos en investigaciones como ésta. El fin de este artículo es proponer una serie de soluciones técnicas y determinar bajo qué condiciones se puede dar término a las contradicciones que se han presentado.

5.3 CALIBRACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL APL DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

El presente numeral explica la metodología a seguir para la calibración del APL para la medición del IRI (ver Ilustración 3). Este equipo fue diseñado por un laboratorio francés y adaptado por la Universidad de Los Andes con el sistema de navegación inercial. Esta modificación que captura registros de alta resolución no influye en la calidad de las mediciones, simplemente adapta el equipo a su utilización en las vías urbanas de Colombia debido a que los rangos que originalmente captaba el equipo estaban por debajo de los rangos de IRI que se manejan en la malla vial de las ciudades del país.

La calibración que se manejará con el APL consta de dos partes: una calibración en laboratorio en la cual se obtiene la respuesta frecuencial del APL y otra calibración en campo en la cual se comparan los resultados del IRI medido con mira y con nivel (método mas preciso) –patronamiento- y los determinados mediante el APL. A



continuación se resume la metodología que se empleará para adelantar la investigación

5.3.1. CALIBRACION EN EL LABORATORIO

Para la calibración en el laboratorio se utiliza como excitador un sistema de mesa vibratoria vertical. Se generan frecuencias desde 1Hz hasta 25 Hz. En cada procedimiento se registra la señal de entrada y la señal de salida del sistema mesa-APL.

Para cada frecuencia de excitación generada se registran las señales de entrada por medio de un acelerómetro sísmico de alta precisión y las señales de salida por medio del acelerómetro ubicado en la llanta del APL. El programa SPDA PL desarrollado en el Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles captura todos los registros y calcula la función de transferencia promedio. La función de transferencia es la que articula el comportamiento en frecuencias de la señal de entrada con respecto a la de salida.

5.3.2. CALIBRACION EN CAMPO

En esta parte, se realiza el levantamiento topográfico de cinco vías diferentes para obtener el perfil longitudinal de las mismas. Cada tramo de vía es de 100 metros netos sin interferencias y las lecturas se realizan con un intervalo de 0.25m para un total de 400 por cada tramo. A continuación se describen los tramos seleccionados. Las condiciones del estado de la vía corresponden a auscultaciones visuales



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

aparentes y no indican la calidad de los materiales de obra ni del proceso constructivo:

- 1 Tramo 1: Carrera 65 B calle 17A: Este tramo de vía consiste en un pavimento flexible por el que transita un gran porcentaje de vehículos pesados. Esta vía se observó en estado regular por presentar hundimientos en su superficie. La longitud se midió hacia el norte, sobre la carrera a partir de la dirección dada.
- 2 Tramo 2: Carrera 68 A calle 19: Consiste en una vía flexible de muy mala calidad, el pavimento presentaba fallas de piel de cocodrilo, hundimientos y pérdida de material en bloques. La longitud se midió hacia el norte, sobre la carrera a partir de la dirección dada.
- 3 Tramo 3: Carrera 69 calle 19A: Consiste en un pavimento rígido nuevo, de excelente calidad. No se observó ningún tipo de falla. La longitud se midió hacia el occidente, sobre la calle a partir de la dirección dada.
- 4 Tramo 4: Carrera 4 número 54: Consiste en un pavimento rígido de mala calidad, con fallas de juntas y asentamientos entre las losas. La longitud se midió hacia el oriente, sobre la calle a partir de la dirección dada.
- 5 Tramo 5: Carrera 68 A calle 21: Consiste en un pavimento flexible nuevo de buenas condiciones aparentes. El día que se efectuaron las mediciones, la vía había cumplido una semana de funcionamiento. La longitud se midió hacia el norte, sobre la carrera a partir de la dirección dada.



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

A continuación se muestran las fotografías de los tramos seleccionados. La línea del perfil longitudinal que se seleccionó para la medición se muestra resaltada en la fotografía.

Tramo 1 : Pavimento flexible en estado regular.



Tramo 2 : Pavimento flexible en mal estado.





**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

Tramo 3 : Pavimento rígido en buen estado .



Tramo 4 : Pavimento rígido en mal estado.





Tramo 5 : Pavimento flexible en buen estado.



Se procede a abcisar desde el inicio hasta el final de la línea del perfil, un segmento de 100 m para cada tramo. Posteriormente se cuadra el nivel de precisión hasta asegurar que esté perfectamente nivelado. De esta manera se desplaza la mira cada 0.25 m sobre la línea del perfil y se toman las lecturas de vista superior, inferior y central por cada punto de medición. A continuación, se hace circular el equipo APL por el mismo sector de vía donde se realiza la nivelación, a una velocidad de aproximadamente 20 Km/h. Se sigue el procedimiento que aparece a continuación (Murillo, 2000a) para la calibración del APL y para el correspondiente cálculo del IRI en los tramos seleccionados.

- 1 Señal medida de aceleración: Para cada una de las vías se obtiene la señal producida por el terreno y registrada por el acelerómetro ubicado en el APL.



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

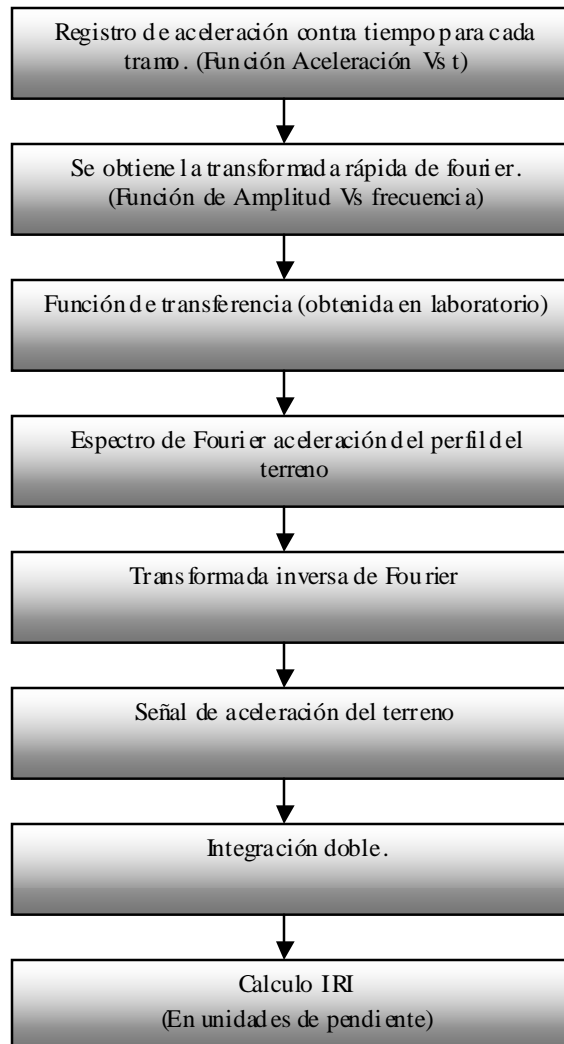
- 2 Espectro de Fourier señal original: Para las señales anteriores se calcula el espectro de Fourier que determina la composición frecuencial de la señal registrada.
- 3 Función de transferencia: Con la función de transferencia obtenida mediante la calibración en laboratorio se hace la correlación entre la aceleración producida por el terreno y la aceleración medida en el APL.
- 4 Transformada inversa de Fourier: Al realizar la correlación de espectros de Fourier se obtiene un nuevo espectro que corresponde al espectro de aceleraciones del perfil longitudinal.
- 5 Señal de aceleración del terreno: Corresponde al resultado de la transformada inversa de Fourier sobre el espectro de aceleración del perfil longitudinal.
- 6 Integración doble de la señal (navegación inercial): Se realiza una doble integración de la aceleración respecto al tiempo para determinar el perfil longitudinal.
- 7 Cálculo del IRI: Con los datos obtenidos se calcula el IRI bajo la norma NLT 330.

Para dar fin a la calibración del equipo APL, se deben realizar mediante el programa SPDAPL diferentes iteraciones guiadas por el error promedio. De esta forma ajustan los valores obtenidos mediante mira y nivel y los obtenidos mediante el APL.

En resumen, el cálculo del IRI y el lenguaje del programa SPDAPL se realiza bajo la siguiente metodología.



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ



5.4 EFECTO DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL EN EL NIVEL DE SERVICIO DE LOS TRAMOS SELECCIONADOS

El Índice de Regularidad o Rugosidad Internacional (IRI) se aceptó como estándar de medida sobre la regularidad superficial de un camino por el Banco Mundial desde



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

1986¹². Por lo tanto es un indicador esencial al momento de calificar la calidad del servicio que ofrece una vía puesto que influye directamente en los costos de operación, en la confortabilidad y en la seguridad del usuario.

➤ Marco conceptual

Uno de los principales objetivos de la segunda parte de este trabajo de Tesis, es la estimación de la importancia del IRI en la determinación del Nivel de Servicio (NDS), mediante unas mediciones de campo que así lo demuestren. En Colombia los procedimientos de estimación del nivel de servicio (NDS) en una carretera se llevan a cabo en base al Manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte de la Secretaría de Tránsito del 2005.

Existen distintas metodologías según el tipo de vía (autopistas, vías multicarril, vías de dos carriles etc). Para las vías de dos carriles se emplea una metodología adaptada a las condiciones de las vías del país que incluye el concepto del IRI. Sin embargo pese al mal estado de la malla vial de Bogotá, el valor del IRI no se toma en cuenta en todas las metodologías. Por esta razón, este estudio también propone la adaptación de las metodologías tradicionales mediante la inclusión de un nuevo factor que relacione la velocidad de flujo libre con la regularidad superficial del pavimento.

➤ Planteamiento y metodología

Lo que se busca en este numeral es demostrar el efecto en la reducción de velocidad de flujo libre por causa de la regularidad superficial del pavimento y que

¹² Sayers Michael W, Gillespie Thomas D, V. Queiroz Cesar A.

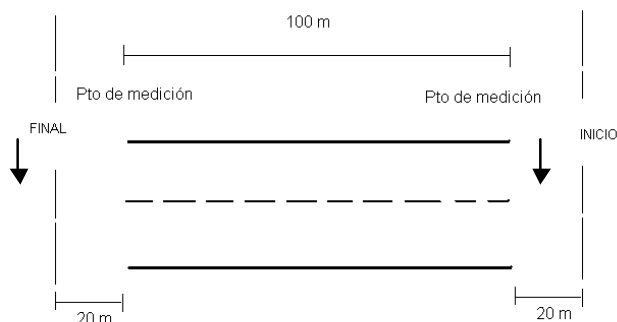


**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

por tanto se debería incluir en las determinaciones de los niveles de servicio de todo tipo de carreteras. Para esto se plantea la siguiente metodología:

1. Se seleccionan los tramos de vías de múltiples carriles de distintas zonas de la ciudad de Bogotá. Para facilitar los cálculos se estudiaron los mismos tramos que se utilizaron para la calibración de campo del APL.
2. Se lleva a cabo una auscultación visual del estado del pavimento y se detectan las fallas que cada tipo de vía presenta.
3. Se ubican dos puntos (inicio y final) fuera de los 100 metros que fueron medidos con el APL y con mira y nivel. Estos puntos fueron ubicados a 20 metros del segmento de medición así:

Ilustración 5 Esquema de medición de velocidades



4. Se ubica un vehículo en el punto de inicio a aproximadamente 20 metros del segmento de medición y una persona dentro del vehículo con un cronómetro. El vehículo inicia su recorrido y cuando pase por el primer punto de medición debe ir a 2000 revoluciones por segundo. El conductor debe garantizar que durante todo el segmento de medición, el motor tenga las mismas



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

revoluciones. Esto se hace para obtener valores comparables entre los tramos de medición. Cuando el vehículo atraviese la primera línea de medición, la persona debe registrar el tiempo, igualmente cuando atraviese el segundo punto de medición.

5. Se repiten 30 veces las mediciones sobre cada tramo.
6. Se obtiene la velocidad media de recorrido de cada tramo de estudio.
7. Se analizan los datos y se determina la influencia de la regularidad superficial en la velocidad media de recorrido y por ende en el nivel de servicio de la carretera¹³.

¹³ El manual de la STT dice que el parámetro que define el nivel de servicio es la velocidad media de recorrido.



6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados analíticos y experimentales obtenidos mediante la investigación y las mediciones adelantadas en el presente trabajo de tesis. Los resultados metódicos exponen la aplicabilidad del concepto del IRI en los proyectos viales de la ciudad de Bogotá y los resultados cuantificados muestran los resultados de la calibración del perfilómetro y de las demás mediciones planteadas.

6.1. APLICABILIDAD DE LAS EXIGENCIAS EN EL CASO DE LAS CONSTRUCCIONES EN BOGOTÁ.

Las controversias que se han presentado entre las partes involucradas aducen a la falta de claridad con relación a las características de medición del IRI y a la incorrecta interpretación de los resultados de las mismas. Los pavimentos flexibles en buenas condiciones arrojan un IRI cercano a los 3 m/km. Las exigencias a los constructores varían pero son semejantes a un valor de IRI característico de un pavimento asfáltico. Este es el principal argumento de los constructores, máxime el rayado, procedimiento habitual en la construcción del pavimento rígido de estas troncales. Con respecto a los métodos constructivos en la ciudad de Bogotá, se debería tener en cuenta lo siguiente:

- El valor del IRI exigido no deberá ser igual en la etapa de construcción que en la etapa de mantenimiento. Lo anterior va de acuerdo a que el pavimento



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

se desgasta y por ende la rugosidad se altera con el uso del mismo. La calidad de un pavimento disminuye en el tiempo, sin embargo puede mantenerse en un estado óptimo o un nivel de servicio C si se realizan intervenciones adecuadas. Además se debe tener en cuenta para el caso de los proyectos viales de la ciudad, que estos se encuentran en servicio incluso desde antes de la terminación de la etapa de construcción. Se propone que el valor del IRI debe variar con respecto al valor obtenido al recibir la obra por lo menos en 0.5 m/km.

- Las exigencias frente al tema del IRI se tomaron de acuerdo a las exigencias de la bibliografía referente. Sin embargo se debería tener en cuenta que un valor del IRI cercano a los 3m/km se alcanza en un pavimento de material bituminoso, en carreteras rurales. En este tipo de carreteras no se presentan las interferencias que en una troncal en la ciudad de Bogotá se pueden presentar. Es importante anotar que la continuidad de la obra influye considerablemente en la rugosidad de la misma. Adicionalmente, cuando las construcciones se llevan a cabo en la zona urbana se tienen ciertos problemas de logística frente al transporte del concreto y de los materiales en sí. Todo lo anterior tiene directa implicación con el valor del IRI.
- En las construcciones como las de los tramos pertenecientes a las troncales del sistema Transmilenio, los constructores han tenido problemas con la adquisición de los predios. Lo anterior hace que la continuidad de la vía se



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

interrumpa y por ende se afecte la regularidad de la misma. Estos inconvenientes no se han tenido en cuenta con lo que se puede estar exigiendo un valor del IRI igual a vías que han tenido procesos constructivos diferentes.

- Si se requiere comparar las mediciones de dos equipos diferentes se está incurriendo un error o por lo menos si se esperan que los resultados sean iguales. Una diferencia de un 20%, en el caso mas extremo, es considerable y debe ser tomada en cuenta para poder avalar los resultados de un equipo de una huella frente a los resultados de un equipo de dos huellas o viceversa. Se debe considerar también la ubicación de la línea longitudinal sobre la vía sobre la cual se realizan las mediciones y el patronamiento de cada equipo.

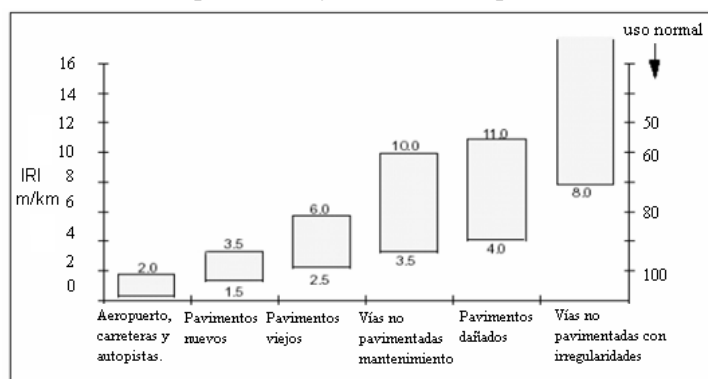
La escala del IRI que se maneja mundialmente no hace referencia a que tipo de pavimento (ver Ilustración 6). Sin embargo, aunque se ha demostrado que se pueden obtener valores del IRI comparables en los dos tipos de pavimento, se deben tener consideraciones con la evaluación en pavimentos específicamente en los rígidos. Lo anterior no implica que necesariamente se deban esperar valores menos exigentes a un pavimento hecho con losas de concreto. Previamente al establecimiento de requerimientos para la recepción de las obras en cuanto al IRI se refiere, se debe estudiar cada tramo de vía como un segmento independiente. Es necesario entonces, tener en cuenta las condiciones en las que la vía fue construida



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

y las variables que puedan afectar este índice y que no estén en las manos de los constructores.

Ilustración 6 Escala de rugosidad.
Fuente: Adaptado de Sayers, M, Gillespies, T. & Paterson W



- Dado que las construcciones en los tramos cuentan con diferentes interferencias tales como alcantarillas, pozos, cajas de inspección etc, se ha propuesto descontar ciertas zonas. No obstante, este procedimiento debe tener en cuenta que la longitud neta de medición debe realizarse en un tramo de mínimo 100 metros y que no es correcto reemplazar segmentos puesto que esto altera los resultados y el perfil. Estas exclusiones repercuten notoriamente en el resultado final de las mediciones. Pese a la falta de claridad por parte de los técnicos, se han considerado los segmentos a excluir pero se han reemplazado posteriormente en la misma longitud. Al reemplazar y mover segmentos dentro del análisis se está incurriendo en un error que refleja la incomprensión de la evaluación y cuantificación del índice de rugosidad existente entre los técnicos de nuestro país.



6.2 RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DEL IRI CON TOPOGRAFIA

En general, la bibliografía ha demostrado que obtener valores de IRI menores en pavimentos flexibles es más fácil que obtenerlos en pavimentos rígidos. Sin embargo, también se ha encontrado que bajo métodos constructivos exigentes como la utilización de equipos eficientes y producción adecuada de concreto es posible encontrar valores de rugosidad en pavimentos rígidos comparables con los de pavimentos flexibles. Los resultados de la medición se muestran en siguiente tabla:

Tabla 1. Resultados de la medición del IRI con mira y nivel.

Tramo	IRI m/km	Estado de la Vía	Tipo de Pavimento
5	2.9	Bueno	Flexible
3	4.05	Bueno	Rígido
1	6.73	Regular	Flexible
2	7.52	Malo	Flexible
4	22.06	Malo	Rígido

La bibliografía en general afirma que la rugosidad excesiva ha sido, tradicionalmente, una desventaja de los pavimentos de hormigón frente a los pavimentos asfálticos (Dallamier, 2000). De la tabla anterior se puede ver que el menor valor de rugosidad obtenido fue en el tramo 5 que corresponde a un pavimento flexible. No obstante, el valor del IRI en el tramo 3 de pavimento rígido es el segundo valor más bajo, no alcanza un rango suficiente para clasificarse como un pavimento nuevo según la Ilustración 6. Aunque los técnicos saben que los métodos constructivos, materiales, equipos y mano de obra utilizados en las vías afectan la rugosidad del pavimento, aún existe confusión con respecto al tema. Por un lado se afirma que es posible obtener valores de IRI comparables en los dos tipos



principales de pavimento bajo rigurosos requerimientos constructivos pero la bibliografía y por tanto los rangos de rugosidad que se manejan Internacionalmente - y que se quieren incorporar a los proyectos de Bogotá- con respecto al IRI se refieren a pavimentos flexibles de carreteras Nacionales. Por último aunque el tramo 3 contó con estrictos procedimientos de construcción no logró un IRI comparable con un pavimento asfáltico de condiciones buenas aparentes (tramo 5).

6.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL APL

Uno de los principales objetivos de este trabajo de tesis fue lograr el patronamiento del equipo analizador longitudinal de la Universidad de los Andes. Para esto se realizaron dos clases de calibración. La primera consistió en una calibración de laboratorio en la que se constató mediante una excitación generada por una mesa vibratoria, el funcionamiento del acelerómetro ubicado en el APL y se obtuvo la función de transferencia. La segunda consistió en una calibración de campo en la que se realizó una correlación del APL con el método topográfico.

6.3.1. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN EN EL LABORATORIO

A continuación se muestra un ejemplo de las señales que se registraron para la frecuencia de excitación de 20 Hz.



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

Ilustración 7 Señal de entrada

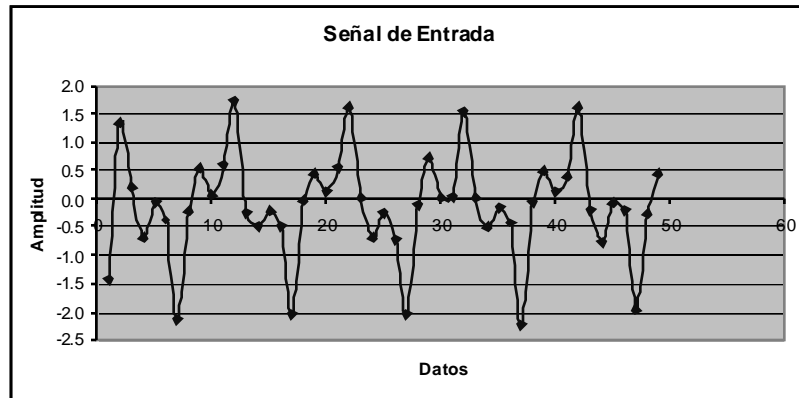
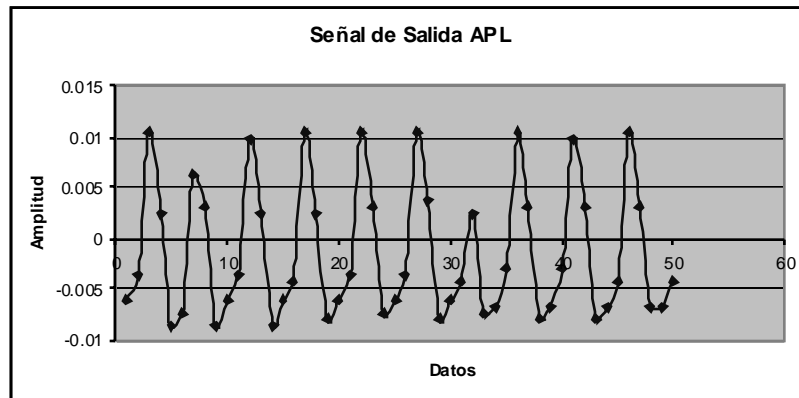


Ilustración 8 Señal de salida



Posteriormente se obtuvo la relación de las frecuencias de las señales de entrada y de salida. Esta se denomina Función de Transferencia de laboratorio, se debe obtener para cada frecuencia de excitación y está dada en el dominio de frecuencias mediante la Transformada de Fourier.

En esta parte se utilizó un software desarrollado en el CIMOC denominado Sistema de Procesamiento de datos Analizador de Perfil Longitudinal (SPDAPL). El programa ingresa los registros de las señales de entrada y de salida y calcula la función de



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

transferencia que va a ser posteriormente utilizada en el cálculo del IRI como se ve a continuación.

Ilustración 9 Calibración de laboratorio.



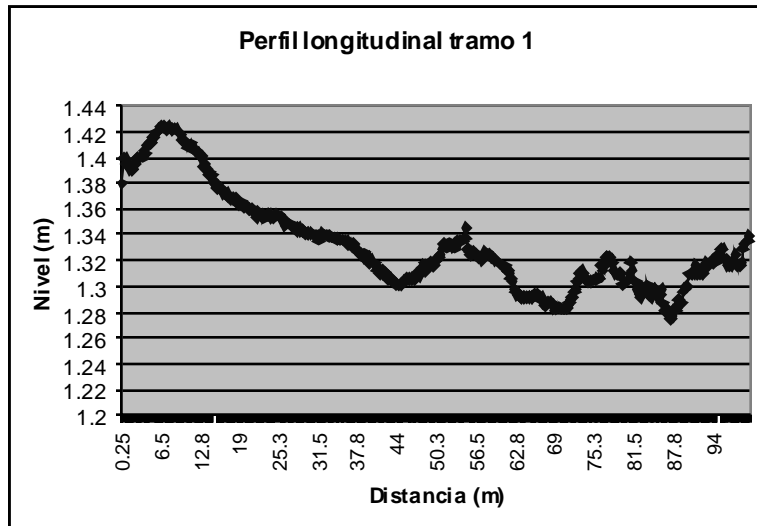
6.3.2. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN EN EL CAMPO

Cada tramo descrito en el numeral 5.3.2 se niveló bajo métodos topográficos. El perfil obtenido con mira y nivel de cada uno de los tramos, se presenta gráficamente a continuación:

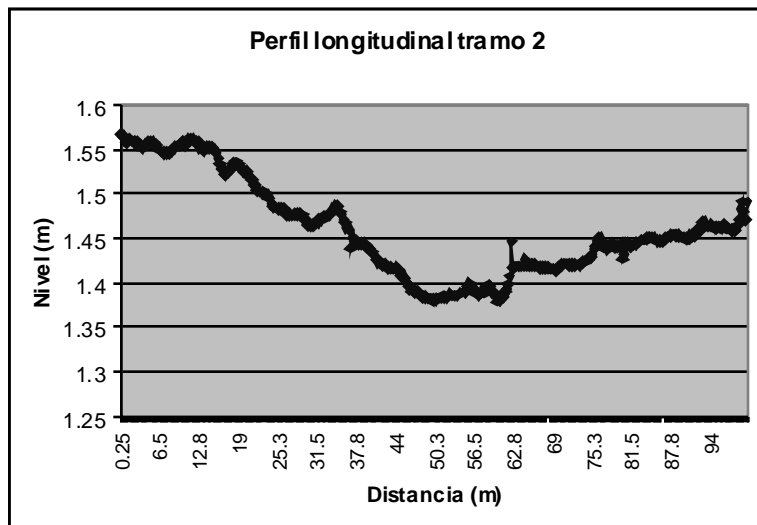


ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

Gráfica 1 Nivelación con mira y nivel. Calibración de campo.



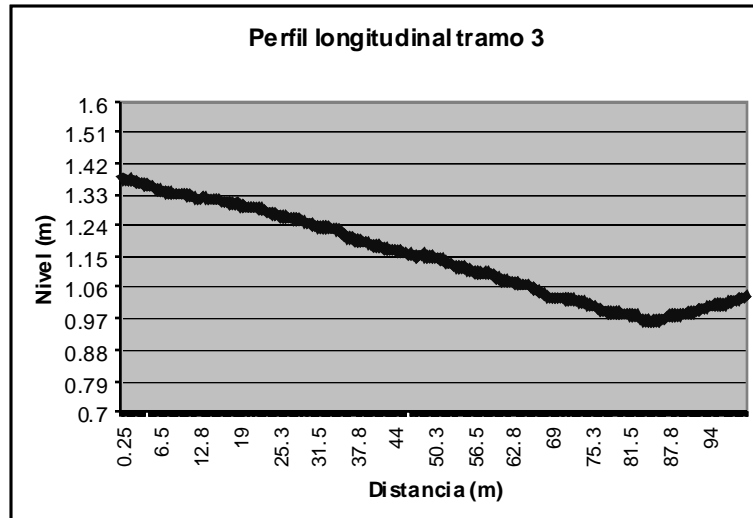
Gráfica 2 Nivelación con mira y nivel. Calibración de campo.



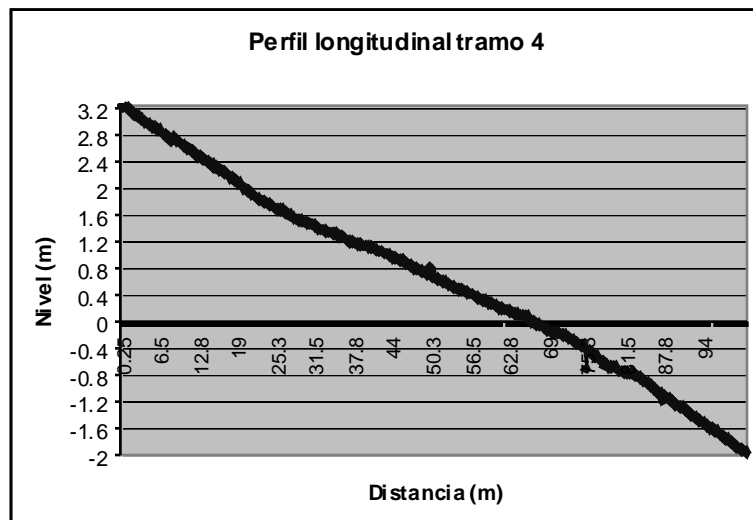


ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

Gráfica 3 Nivelación con mira y nivel. Calibración de campo.



Gráfica 4 Nivelación con mira y nivel. Calibración de campo¹⁴.

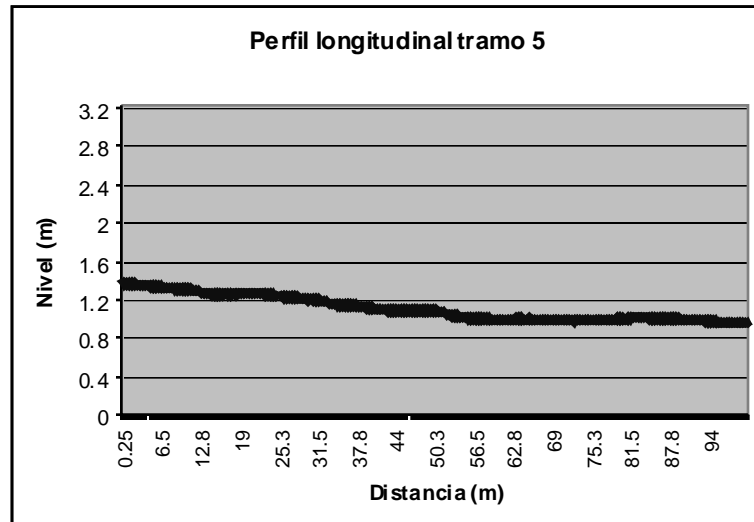


¹⁴ En el tramo 4 se observan lecturas negativas. Estas lecturas solo obedecen a un nivel de referencia ubicado en el principio puesto que en la calibración lo que interesa es la diferencia de nivel entre punto y punto y no la altura de cada punto como tal.



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

Gráfica 5 Nivelación con mira y nivel. Calibración de campo.



Para proceder con la calibración en campo se realizaron diferentes iteraciones guiadas por el error promedio encontrado en el ajuste de los valores obtenidos mediante mira y nivel y los obtenidos mediante el APL. Cuando el error promedio no cambia significativamente por más iteraciones que se hagan, se puede decir que el equipo está calibrado. Las iteraciones son programadas mediante dos variables: el nivel de amplitud y el rango de búsqueda. Los resultados obtenidos son los siguientes:

**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ****Tabla 2 Resultados de las iteraciones en el SPDA PL. Fuente: Elaboración propia.**

Nivel de amplificación	Rango de búsqueda	Error promedio	Amplificación
0.5	10	24.5	0.3
0.5	100	24.1	0.29
0.5	1000	24.1	0.2895
0.5	10000	24.1	0.2897
0.4	10	23.8	0.28
0.4	100	24.1	0.288
0.4	1000	24.1	0.2896
0.4	10000	24.1	0.2896
0.3	10	23.4	0.27
0.3	20	24	0.285
0.3	100	24.2	0.291
0.3	1000	24.1	0.2898
0.3	10000	24.1	0.2897
0.2	10	29	0.2
0.2	100	29.5	0.198

Después de realizar diferentes iteraciones se seleccionó un nivel de amplificación de 0.3 y un rango de búsqueda de 10 debido a que fue la combinación con la que se obtuvo menor error. Los resultados obtenidos al ajustar los valores en el programa se muestran en la Tabla 2. Los valores de la columna IRI 1 corresponden a los obtenidos mediante mira y nivel y los de IRI 2 a los obtenidos mediante el analizador de perfil longitudinal.

Tabla 2. Resultados de la calibración de campo. Fuente: Resultados del Autor.

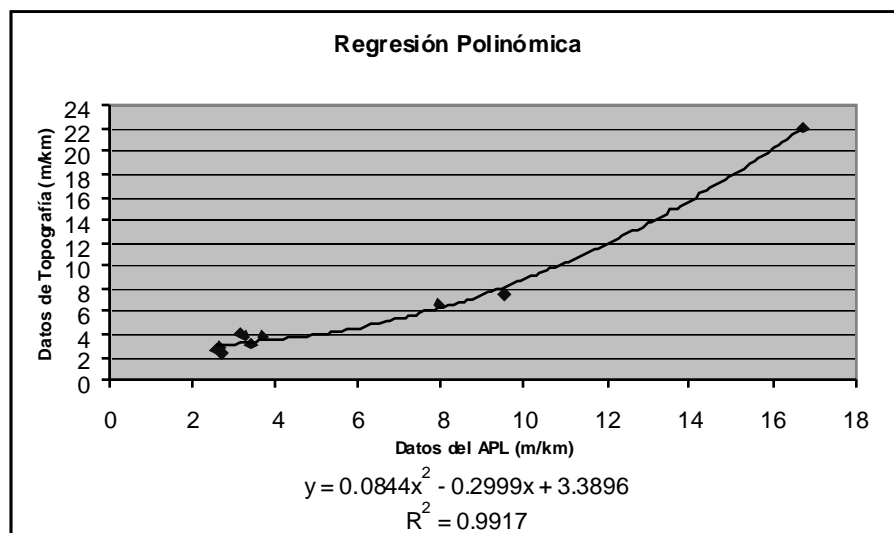
Tramo	IRI 1 m/km	IRI 2 m/km	Longitud m	Diferencia m
1	6.73	7.92	102.3	1.19
2	7.52	9.54	98.4	2.02
3	4.05	3.15	83.6	0.9
4	22.06	16.71	115.3	5.35
5	2.9	2.65	97.1	0.25

De la Tabla anterior se puede observar que existe una correlación entre el valor del IRI medido con el APL y el medido con mira y nivel. La diferencia entre los resultados obtenidos se debe a diferentes razones. Por una parte es imposible



asegurar que el recorrido del APL corresponda exactamente a la misma línea longitudinal que se midió topográficamente. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que la calibración de la función de transferencia se realizó hasta una frecuencia de 25 Hz. Debido a esto el equipo no amplifica correctamente una señal cuya frecuencia se encuentra por fuera de el rango de calibración. Para mostrar la tendencia del comportamiento de los resultados medidos con APL y los obtenidos con métodos topográficos, se realizó una regresión polinómica de los datos obteniendo un valor de correlación igual a 0.9917. A continuación se presenta la regresión polinómica con la ecuación final y su correspondiente valor de R cuadrado. En la Gráfica 6 se han incluido cinco puntos más. Estos resultados fueron tomados de mediciones realizadas en el Centro de Investigación en materiales y obras civiles de la Universidad de los Andes, puesto que por cada variable independiente se necesitan mínimo 10 datos para poder realizar una regresión.

Gráfica 6 Correlación entre los resultados APL- Topografía. Fuente: Resultados del autor.





6.4 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE LA RELACIÓN DEL IRI CON LA VELOCIDAD A FLUJO LIBRE

Por los mismos tramos donde se midió la velocidad con el vehículo a revoluciones constantes, se determinó anteriormente el valor del IRI en el aparte de calibración en campo. Por lo tanto, los resultados de las mediciones que se llevaron a cabo siguiendo la metodología explicada previamente consisten en el análisis del efecto de la regularidad en la velocidad media de recorrido. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la Tabla 3.

Para cada tramo se obtuvo el promedio y la varianza para medir la homogeneidad de cada dato con respecto al promedio de la muestra. Las mediciones planteadas se llevaron a cabo con el fin de simular las condiciones específicas de un vehículo y determinar así la influencia del IRI en la velocidad del mismo.



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

Tabla 3 Mediciones de velocidad en los tramos en estudio

TRAMO NÚMERO				
1	2	3	4	5
TIEMPO EN SEGUNDOS				
20.65	20.43	17.12	22.83	15.81
20.49	21.13	16.34	22.46	15.72
20.2	21.62	17.13	22.81	15.88
20.39	20.88	16.88	22.91	15.63
20.33	21.06	17.14	22.47	16.45
20.87	20.71	16.9	21.59	16.83
20.1	21.02	16.54	21.62	16.29
20.64	21.13	17.04	22.53	16.98
20.13	20.96	17.42	21.47	15.72
20.24	21.02	16.83	22.49	15.24
20.54	20.45	16.36	22.51	15.17
20.32	21.34	16.39	22.03	15.91
20.95	20.18	17.06	21.62	15.29
20.01	20.67	16.54	21.07	15.12
20.3	21.17	16.32	21.83	15.29
20.43	20.64	16.7	21.96	15.36
20.59	21.08	16.92	22.05	15.23
20.35	20.51	16.25	22.64	15.21
20.21	21.06	17.07	22.5	15.39
20.96	20.49	16.79	22.03	14.94
21.02	21.25	16.94	21.3	14.99
20.55	20.75	17.15	22.24	15.63
20.21	20.94	16.45	21.35	15.17
20.13	21.05	16.85	21.37	15.23
20.11	20.37	17.03	22.18	15.86
20.26	20.89	16.43	21.92	15.79
20.38	20.95	16.84	22.17	15.73
20.08	21.04	16.92	22.41	15.87
21.28	21.38	17.23	22.62	15.92
20.07	21.61	16.91	21.64	15.9
20.1	21.69	17.42	21.45	15.82
20.42	20.95	16.84	22.07	15.66
PROMEDIO EN SEGUNDOS				
20.42	20.95	16.84	22.07	15.66
VARIANZA				
0.10	0.13	0.10	0.26	0.24

Los resultados finales obtenidos se muestran en la siguiente tabla. Los valores del tiempo corresponden al promedio de las 30 mediciones llevadas a cabo en los tramos en estudio.



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

Tabla 4 Resultados de las mediciones sobre los tramos. Fuente: Resultados del Autor.

Tramo	IRI (topografía) m/km	Tiempo s	Velocidad m/s
5	2.9	15.66	6.39
3	4.05	16.84	5.94
1	6.73	20.42	4.90
2	7.52	20.95	4.77
4	22.06	22.07	4.53

De la Tabla anterior se puede ver que en general a medida que el IRI disminuye, el tiempo que le toma al vehículo en recorrer la misma distancia en todos los tramos es menor y por lo tanto la velocidad mayor. El tramo 5 cuyo IRI es el menor valor de todos presentó una velocidad de 6.39 m/s mientras que en el tramo 4 se registró una velocidad de 4.53 m/s. Se evidenció el efecto de la regularidad superficial en la velocidad de recorrido del vehículo.

Por otra parte, la metodología utilizada en Colombia para la determinación del nivel de servicio de una carretera es el Manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte de la Secretaría de Tránsito (STT) y Transporte. Este manual indica que para determinar el nivel de servicio de una carretera se debe estimar como primera medida la velocidad media de recorrido y que se debe proceder de lo ideal a lo real. De esta manera se tiene una velocidad a flujo libre base que es ajustada por diferentes factores tales como el factor relativo al ancho del carril, factores de ajuste por la distancia libre lateral en la berma, el factor de ajuste por tipo de separador que presenta y el factor de ajuste por puntos de acceso. Las condiciones del estado superficial del pavimento son ideales al emplear la metodología planteada por el Manual de la STT. Al intentar determinar un nivel de



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

servicio con la metodología mencionada en las vías urbanas de Colombia, donde las condiciones de los pavimentos no son las mejores, se está incurriendo en un error de gran magnitud puesto que la regularidad es uno de los parámetros que más refleja el nivel de servicio de una carretera.



CONCLUSIONES

- La rugosidad es definida por la ASTM E 867 como la desviación de una determinada superficie de pavimento respecto a una superficie plana teórica con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo y la calidad al manejar. Son las alteraciones del perfil longitudinal que provocan vibraciones en los carros que transitan por una determinada vía. Se cuantifica mediante la medición del IRI.
- El IRI es un índice calculado a partir del perfil longitudinal que se corresponde al concepto de la mecánica vibratoria de los sistemas dinámicos. Se basa en el modelo de cuarto de coche que simula el movimiento de las masas y la suspensión de un vehículo que circula a 80km/h. Este valor es medio en unidades de pendiente y entre mayor sea indica una menor calidad en el estado de la vía. Su valor debe ser independiente del equipo de medición.
- Cada equipo destinado a la determinación del IRI ofrece sus propios resultados dependiendo de su propio funcionamiento. Por esta razón, comparar dos equipos que no estén debidamente patronados es incorrecto. Si se requieren confrontar los resultados obtenidos mediante dos o más equipos, se debe primero verificar las condiciones de funcionamiento y la validación de cada equipo. En esta investigación se obtuvo una relación entre los datos producidos por un analizador de perfil longitudinal y los datos obtenidos de mira y nivel. Con esto se demostró la tendencia que existe entre los resultados, originada por la imposibilidad de



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

garantizar que la medición se haga sobre una misma línea del perfil con ambos equipos y/o por la calibración propia del equipo. Por lo tanto, comparar directamente dos mediciones aisladas, llevadas a cabo independientemente, es equivocado.

- Existen diferentes conceptos e interpretaciones acerca del IRI por parte de los constructores y de los dueños de los proyectos. Estas diferencias se encuentran enmarcadas dentro de un ámbito político, legal y técnico. Por estas razones se concluye que para emitir un juicio imparcial y solucionar las controversias existentes entre los concesionarios y las interventoras, se debe convocar la participación de un tercero calificado. Este tercero será quien aplique el concepto de la rugosidad en pavimentos típicos de los proyectos de la ciudad y emita un juicio certero y técnicamente sustentado.
- Para poder establecer exigencias congruentes a la realidad se deben tener en cuenta muchos factores. Por ejemplo el procedimiento constructivo, la adquisición de predios, el rayado etc. Además se debe considerar que el uso del pavimento desgasta la calidad de servicio que este ofrece y por lo tanto es considerable que el valor del IRI cambie en el tiempo.
- El IRI varía según la tecnología aplicada en la construcción de una vía. En este estudio el menor valor de IRI obtenido fue de 2.9 m/km en el tramo 5 de pavimento flexible, seguido del tramo 3 con un IRI de 4.05 m/km. A pesar que el tramo 3 de



ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ

pavimento de hormigón se construyó con exigentes especificaciones, insumos de alta calidad y con mano de obra calificada, no logró un valor de rugosidad comparable con el tramo 5 que consistía en un pavimento asfáltico. Con esto se confirma que si bien la calidad en la obra influye en el valor del IRI y en la calidad del servicio, es mucho más difícil conseguir un valor de rugosidad menor en un pavimento de losas de concreto que en uno flexible.

- El APL empleado por la Universidad de los Andes es un equipo de alto rendimiento. Trabaja bajo un sistema de navegación inercial y cuenta con un acelerómetro que registra el movimiento de la llanta como consecuencia de las alteraciones del perfil longitudinal. Su calibración implicó dos partes la primera un trabajo de laboratorio y la segunda la calibración en campo. De la primera se obtiene la función de transferencia que se introduce en el programa SPDA PL. A partir de la calibración de campo se obtuvo por prueba y error la combinación correcta de rango de búsqueda y nivel de amplificación. Además se obtuvo con el fin de mostrar la tendencia entre los dos tipos de medición, la ecuación que relaciona los valores del IRI obtenidos con el APL y los datos patrones como lo son los obtenidos con miray nivel.
- De acuerdo con el IDU de los 14.506 kilómetros correspondientes al subsistema vial el 72 por ciento está en mal estado. Su reparación y mantenimiento requeriría 7.7 billones de pesos... (www.eltiempo.com..., 2006). Por lo tanto no tiene sentido



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

que aún se siga evaluando el nivel de servicio de las vías en Bogotá con la metodología tradicional, es decir suponiendo condiciones ideales del pavimento.

Esta investigación encontró que existe una influencia sobre la velocidad por parte de la calidad del pavimento valorada con el IRI. Por esta razón se propone la adaptación de la metodología tradicional en la que se incluya el efecto de la regularidad superficial en la evaluación del nivel de servicio.

Finalmente, para poder garantizar la aplicabilidad de las exigencias del IRI en los proyectos de Bogotá, se debe tener más información de la vía, de su diseño y construcción. Por lo tanto no se debe hacer de la rugosidad superficial una norma lejana, al contrario debe aplicarse bajo un conocimiento previo de las condiciones de la vía como tal. Por ejemplo, se debería tener información de la velocidad de diseño de la vía, dada la influencia del IRI sobre la velocidad de los vehículos. También sería útil estudiar las condiciones de construcción como la adquisición de los predios debido a su influencia en la continuidad de la vía y por ende en el valor del IRI de la misma. Por otra parte, el Distrito debe garantizar a los constructores que las exigencias se adaptan a las condiciones de las vías urbanas de la ciudad, puesto que se ha demostrado que las exigencias no solo fueron tomadas de estudios internacionales como si fueran medidas de talla única, sino que se ignoró el hecho de que estos estudios fueran realizados en vías rurales donde las condiciones de construcción - que tienen directa implicación sobre la regularidad- son muy diferentes a las de vías construidas en el interior de la ciudad.



BIBLIOGRAFÍA

- ASTM E1926-98, "Standard Practice for computing International Roughness Index of roads from longitudinal profile measurements".
- Carey, W. N. & Irick, P. E. 1960. The pavement serviceability-performance concept.
- Comerse el pastel a pedazos (columna de opinión). (s.f.) Recuperado el 4 de Noviembre de 2006 de www.eltiempo.com
- Dalamier, M. & Torrent R. 2000. Avances en la rugosidad (IRI) de pavimentos de hormigón construidos con pavimentadoras de molde deslizante. Buenos Aires. [En línea]. Disponible en www.icpa.org.ar
- Gallegos, R. & Mendoza, A. 2004. Efecto de la Regularidad superficial en la capacidad vial de autopistas y carreteras multicarril Mexicanas. Instituto Mexicano del Transporte Publicación técnica No 262.
- Guillespie, T. 1992. Everything you always wanted to know about the IRI but be afraid to ask. Universidad de Michigan.
- Guillespie, T., Sayers, M. & Segel, L. 1980. Calibration of response type road roughness measuring systems. NCHRP Report No. 228.
- Hveem, F. N. 1960. "Devices for recording and evaluating pavement roughness". Highway Research Board Bulletin 264.
- NLT330-98. "Cálculo del índice de regularidad internacional en pavimentos de carreteras".
- Manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte de la Secretaría de Tránsito y Transporte
- Melis, M. 1992. "Cálculo del IRI de una carretera a partir de su perfil longitudinal". Revista Rutas.
- Murillo, C., Caicedo, B. & Vinasco, P. 2000a. Medida del IRI mediante navegación inercial utilizando el APL. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes Bogotá.
- Murillo, C., Caicedo, B. & Tristancho, J. 2000b. Medida del perfil longitudinal de un pavimento mediante navegación inercial. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes Bogotá.



**ESTUDIO SOBRE EL MODELO, CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL IRI
CASO PRÁCTICO: PROYECTOS VIALES EN BOGOTÁ**

- Paterson, W. D. 1986. International Roughness Index. Transportation research record 1084.
- Sayers, M. 1989. Two Quarter-Car models for Defining Road Roughness. Transportation research record 1215.
- Sayers, M. 1995. On the calculation of IRI from longitudinal road profile. Universidad de Michigan Paper No. 95 0842.
- Sayers M W, Gillespie T.D & Paterson W D. 1986. Guidelines for conducting and calibrating Road Roughness Measurements. World Banck Technical Paper Number 46.
- Sayers M W, Gillespie T.D. 1986. International experiment to establish correlations and standard calibration methods for road roughness measurements.
- Sayers M W, Gillespie T.D & Queiroz C. 1986. The International Road Roughness Experiment. World Banck Technical Paper Number 45.
- Sayers, M. & Karamihas S. 1995. The little book of profiling. Universidad de Michigan.
- Solminihaç, H. 2001. Gestión de Infraestructura vial. Segunda Edición. Serie textos Univesitarios. 443 páginas.
- Ventura, J. & Alvarenga, E. 2005. Determinación del índice de regularidad internacional. República de el Salvador.