

# MEDIDA PERFIL LONGITUDINAL DE UN PAVIMENTO MEDIANTE NAVEGACIÓN INERCIAL

Bernardo Caicedo\*, Carol Andrea Murillo\*\*, Julian Alfonso Tristancho\*\*\*

## RESUMEN

*El perfil longitudinal de un pavimento es un factor que está directamente relacionado con el confort de una vía. La escala estándar a nivel mundial para determinar la rugosidad es el IRI (Índice de Rugosidad Internacional). Este índice describe el confort que experimenta un usuario cuando se desplaza en un vehículo a una velocidad de 80 km/h.*

*Uno de los equipos empleados para la determinación del IRI es el APL, equipo diseñado por el Laboratorio Central des Ponts et Chaussées de Francia, cuyo funcionamiento está basado en la utilización de un sistema oscilatorio mecánico. Este equipo presenta rangos de funcionamiento que generalmente están por debajo de los rangos que se observan en algunas vías urbanas de Colombia. Lo anterior motivó la implementación de un nuevo método de medición basado en la navegación inercial, con este nuevo sistema se logra la captura de registros digitales de alta resolución y con un amplio rango de medida.*

*En este trabajo se expone la metodología y correlaciones necesarias para la puesta en marcha del equipo. Igualmente se presentan los resultados de la utilización del APLI modificado para la determinación del IRI en vías urbanas. Del mismo modo se presenta una nueva aplicación la cual consiste en tratar de determinar mediante el APLI modificado el confort que experimenta un ciclista que transite por una cicloruta similar a las construidas en la ciudad de Bogotá.*

## PALABRAS CLAVES

IRI, índice de rugosidad internacional; APLI analizador de perfil longitudinal, regularidad superficial, perfil longitudinal, navegación inercial.

## INTRODUCCIÓN

La rugosidad superficial es un factor que está directamente relacionado con el confort de una vía. La escala estándar a nivel mundial para determinar la rugosidad es el IRI (Índice de Rugosidad Internacional), el cual describe el confort que experimenta un usuario cuando

se desplaza en un vehículo a una velocidad de 80 km/h.

Uno de los equipos empleados para la determinación del IRI es el APL, equipo diseñado por el Laboratorio Central des Ponts et Chaussées, cuyo funcionamiento está basado en la utilización de un sistema oscilatorio mecá-

---

\* Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, bcaicedo@uniandes.edu.co

\*\* Estudiante Doctoral, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, cr-muril@uniandes.edu.co

\*\*\* Estudiante Maestría Ingeniería Eléctrica, CIMOC, Universidad de los Andes, jutrista@hotmail.com

nico. Este equipo presenta rangos de funcionamiento que generalmente están por debajo de los rangos que se observan en algunas vías urbanas de Colombia. Lo anterior motivó la implementación de un nuevo método de medición basado en el principio de la navegación inercial, con este nuevo sistema se logra la captura de registros digitales de alta resolución y con un amplio rango de medida.

En este trabajo se expone la metodología y correlaciones necesarias para la puesta en marcha del equipo. Igualmente se presentan los resultados de la utilización del APL modificado, (APLI) para la determinación del IRI en vías urbanas.

### 1. ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL – IRI-

La rugosidad es un factor que determina el confort, la seguridad y el desgaste que sufren los vehículos al transitar sobre una vía. Éste factor se puede correlacionar con la condición estructural de la vía y con su vida útil.

La escala estándar a nivel mundial para determinar la rugosidad es el IRI, índice de rugosidad internacional el cual fue propuesto en los años 70's por el Banco Mundial, cuyo principal objetivo fue la estandarización de la medida de la rugosidad. Esta estandarización logró relacionar los resultados obtenidos por los diferentes equipos y métodos de medición en uno único, independiente y universal.

#### 1.1 Modelo matemático - "Quarter Car"

El IRI está basado en un modelo matemático "quarter-car", que simula la suspensión y las masas de la cuarta parte de un vehículo que se desplaza a una velocidad promedio de 80 km/h. El desplazamiento simulado acumulado, dividido por la distancia recorrida corresponde a un índice con unidades (m/km, in/mi, etc).

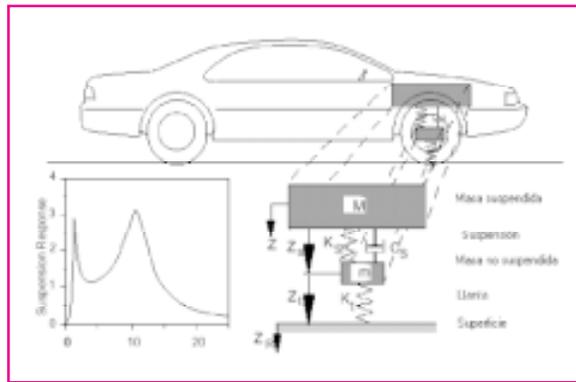


Figura 1. Modelo "Quarter Car"

El modelo matemático que representa la cuarta parte de un vehículo tradicional, se muestra en la Figura 1. Este modelo simula el sistema de amortiguación de un vehículo, el cual incluye amortiguador-resorte, neumático y masa del vehículo.

Los parámetros mecánicos usados en el modelo caracterizan las respuestas típicas de la mayoría de los vehículos con una excepción, la rigidez es mas alta que en el común de los vehículos, esto evita que el sistema pueda caer en resonancia con ciertas longitudes de onda.

#### 1.2 Representación del sistema

La representación en variables de estado en el dominio del tiempo del sistema masa – amortiguador –resorte, utilizado como modelo para el calculo del IRI está dado por la Ecuación 1:

Ecuación 1. Ecuaciones del sistema masa-amortiguador -resorte

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_1}{M_1} & \frac{K_1}{M_1} & -\frac{C_1}{M_1} & \frac{C_1}{M_1} \\ \frac{K_1}{M_2} & -\frac{(K_1+K_2)}{M_2} & \frac{C_1}{M_2} & -\frac{(C_1+C_2)}{M_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

$$w_1 = \dot{z}_1$$

$$w_2 = \dot{z}_2 - \frac{C_2}{M_2} z_p$$

$M_1, M_2, C_1, C_2, K_1, K_2$  son constantes del modelo.

Por medio de esta representación, se puede realizar la simulación por métodos numéricos en un computador.

### 1.3 Cálculo del IRI

Para calcular el IRI es necesario conocer el perfil longitudinal de la carretera definido por sus cotas en intervalos,  $dx$ , de longitud constante. El intervalo de medida no debe inferior a 10 mm ni superior a 300 mm.

El cálculo del IRI se obtiene de la Ecuación 2 (Norma NLT 330).

$$IRI = \frac{1}{L} \sum |\Delta u - \Delta v| \quad (\text{Ec.2})$$

Siendo “ $u$ ” y “ $v$ ” los desplazamientos verticales de las masas no suspendida y suspendida respectivamente (modelo “quarter-car”) con relación a su posición inicial y  $L$  es la longitud de valoración de la vía.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL APL

El analizador de perfil longitudinal APL fue diseñado por Laboratoire Central des Ponts et Chaussées cuyo objetivo es el de determinar el perfil superficial dentro de un campo de longitud de onda comprendido entre 0,5 y 40 Hz. El equipo realiza ensayos continuos a velocidad cercana a los 30Km/h, puede ser utilizado sobre cualquier tipo de superficie pavimentada o en afirmado y bajo diferentes condiciones ambientales. El APL debe ser remolcado por un vehículo automotor. La unión mediante cardán asegura que el movimiento del vehículo interfiera con las señales registradas por el APL. El sistema completo de medición se presenta en la Figura 2.



Figura 2. Sistema completo de medición

### 2.1 Componentes del APL

El APL está constituido por un chasis, una rueda y una plomada horizontal. Las partes del APL se presentan en la Figura 3.

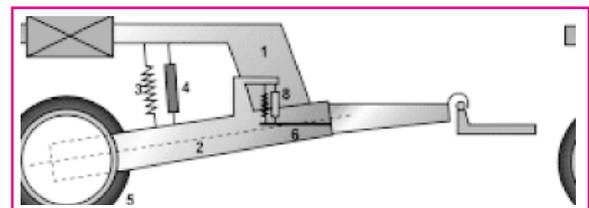


Figura 3. Componentes del APL original

El chasis (1) se apoya en un brazo (2) el cual esta unido a una rueda (5). Chasis y brazo se encuentran unidos a través de un amortiguador (4) y un resorte (3) asegurando un contacto permanente entre la rueda y la vía. La ubicación del amortiguador y el resorte pueden ser modificadas para regular la respuesta. La plomada (6,7 y 8) permite medir el ángulo del brazo con la rueda en relación a una referencia semi horizontal.

La plomada horizontal consiste en un brazo, con pesas en su extremidad; una de las pesas puede ser posicionada nuevamente, permitiendo la regulación del momento de rotación inercial. La plomada está equilibrada por un resorte, mientras que el amortiguamiento es de tipo magnético. Durante la medición, el movimiento vertical de la rueda genera un movimiento angular del eje respecto al brazo

balanceado de la plomada inercial. Este movimiento es transmitido a un transductor de movimiento el cual genera un valor eléctrico que es registrado y almacenado. La Figura 4 muestra la plomada inercial.

La distancia recorrida y la velocidad son medidas por una señal generada por un disco dentado fijado sobre la rueda.



Figura 4. Plomada inercial

### 3. MODIFICACIÓN DEL EQUIPO

Debido a que el funcionamiento del APL estaba basado en un sistema oscilatorio mecánico, con un desarrollo tecnológico de los años 70, se decidió implementar un nuevo sistema tanto de medición como de adquisición de datos.

#### 3.1 Principio de medición

El nuevo sistema de medición emplea el principio de navegación inercial. La navegación inercial se basa en el registro de las aceleraciones generadas durante el movimiento de un objeto y el cálculo de los desplazamiento mediante la doble integración de estos registros.

Para el registro de las aceleraciones se emplean instrumentos conocidos como acelerómetros. Estos instrumentos son de gran precisión, confiabilidad y de fácil acople con sistemas de adquisición actuales. Las mediciones inerciales son frecuentemente utilizados en los sistemas de navegación de aeronaves, botes y automóviles para largas distancias y tiempos de monitoreo largo.

$$\text{Desplazamiento} = \iint \text{Aceleración}$$

Se implementó un acelerómetro en el eje de la rueda del APLI para registrar la aceleraciones inducidas por la vía al equipo, con lo cual se determina el componente vertical (perfil longitudinal) de la vía de en un tramo de determinado.

## 2.2 Instrumentación

La instrumentación del equipo está compuesta por un codificador de posición (encoder), un acelerómetro (navegación inercial), un sistema de adquisición de datos y un software de adquisición. La instrumentación del APLI se presenta en la Figura 5 .

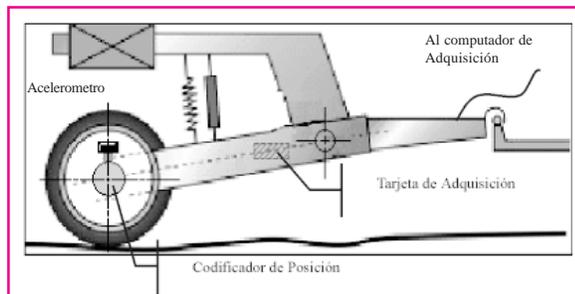


Figura 5. Instrumentación del APLI

#### 2.2.1 Codificador de posición

Este sensor permite registrar la posición relativa del equipo en el de tramo de medición, su principio de funcionamiento está basado en un disco metálico dentado y un sensor de proximidad inductivo, cada vez que se recorre una distancia el sensor genera un pulso digital con el cual es posible calcular la posición recorrida y la velocidad del equipo.

#### 3.2.2 Acelerómetro

El acelerómetro es de tipo piezoeléctrico, con un rango de medición de  $\pm 50g$ , de alta sensibilidad y muy bajo nivel de ruido. Es un sensor con un ancho de banda de 0.3 a 1500 Hz. Está ubicado en el eje de la rueda del APLI, de forma vertical, lo que permite hacer despreciable la componente horizontal de la aceleración del APLI.

### 3.2.3 Sistema de adquisición de datos

Como sistema de adquisición de datos se desarrolló una tarjeta electrónica, la cual incluye un conversor análogo-digital de 16 Bits, cuatro canales análogos de lectura, un canal digital, frecuencia máxima de muestreos de 100 Hz. El acelerómetro se conecta a una entrada análoga, mientras que el codificador de posición se conecta a la entrada digital. Los datos registrados por el acelerómetro y el conteo general del codificador de posición se almacenan en un computador portátil que se encuentra en la cabina del vehículo tractor.

### 3.2.4 Software de adquisición

La tarjeta de adquisición de datos envía mediante un protocolo de comunicación RS-232, las mediciones de los sensores instalados en el equipo. Estos se almacenan en archivo de texto en el disco duro del sistema. Este software además permite visualizar las lecturas actuales para hacer un control sobre el movimiento y velocidad del APLI. En la Figura 6 se presenta un pantallazo del software de adquisición.

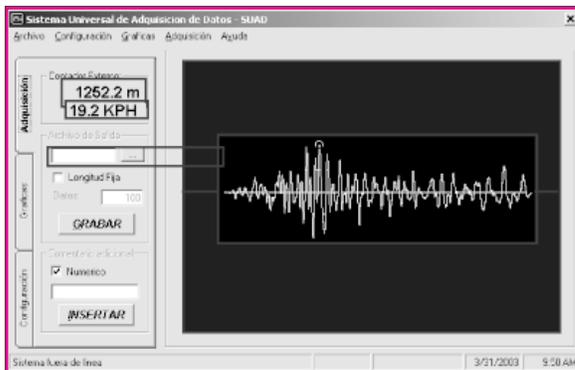


Figura 6. Software de Adquisición (SUAD V 1.0)

## 4. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

Se realizaron dos tipos de calibraciones: en laboratorio y en campo, para precisar el comportamiento del APLI y establecer las correlaciones y recomendaciones de uso necesarias para un buen funcionamiento del equipo.

## 4.1 Calibración en Laboratorio

Para la calibración del equipo en el laboratorio se utilizó como excitador del sistema una mesa vibratoria vertical. Se realizó un barrido frecuencial de 1 a 25 Hz, registrándose la entrada del sistema y la salida en el acelerómetro ubicado en el eje de la rueda. Con lo cual se obtuvo la función de transferencia que presenta el equipo para cada frecuencia de excitación. Con este análisis se pudo determinar que el APLI funciona como un filtro pasabanda de señal vibrante aleatoria. El montaje para la calibración en laboratorio del APLI se muestra en la Figura 7.

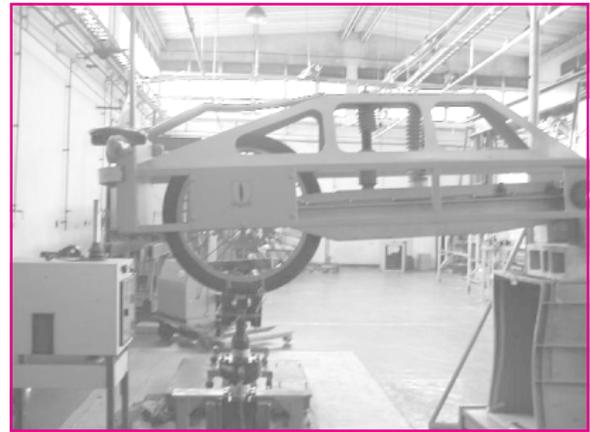
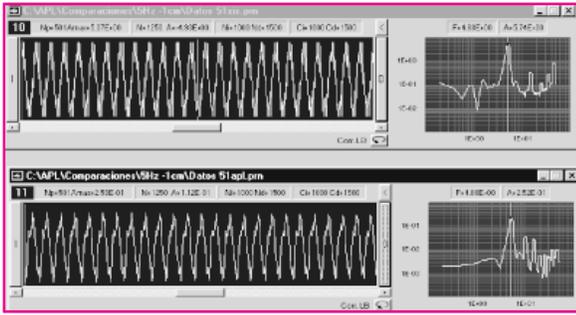


Figura 7. Montaje calibración en laboratorio

### 4.1.1 Registro de señales de entrada y salida

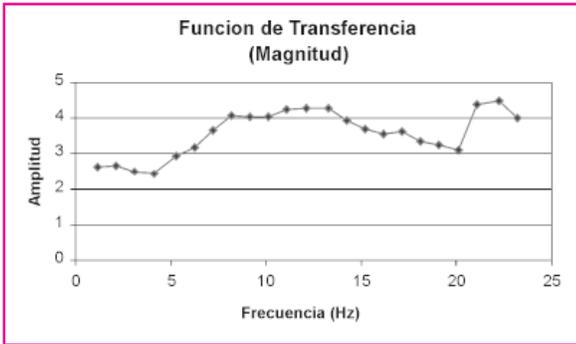
Para cada una de las frecuencias de excitación se registró la aceleración de entrada del sistema (mesa vibratoria) por medio de un acelerómetro sísmico de alta precisión de igual manera se registró la señal de salida en el APLI por medio del acelerómetro ubicado en el eje de la rueda. La Figura 8 presenta señales registradas de entrada y de salida, con sus respectivos espectros de Fourier.



**Figura 8.** Señales registradas con sus espectros de Fourier, superior señal de entrada e inferior señal registrada APLI

#### 4.1.2 Función de transferencia

La función de transferencia relaciona el comportamiento en frecuencias de la señal de entrada frente a la señal de salida (acelerómetro APLI). La función de transferencia está dada en el dominio de frecuencias mediante la transformada de Fourier. La función de transferencia obtenida se muestra en la Figura .



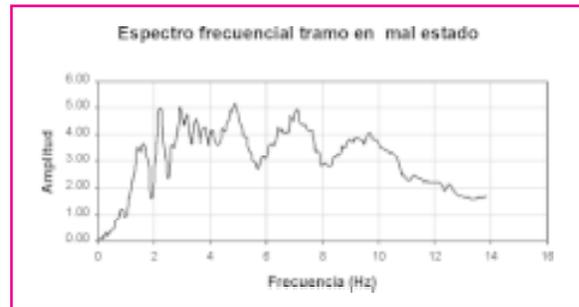
**Figura 8.** Función de Transferencia obtenida de laboratorio

#### 4.2 Calibración en Campo

Se realizó un levantamiento topográfico con mira y nivel de un tramo de vía, en seguida se pasó el APLI. Se calculó el IRI con los datos obtenidos por el sistema de medida geométrico y por el sistema dinámico, se compara los resultados y se establece si la calibración realizada en laboratorio cumplió los requerimientos de campo. Para establecer la independencia de la medida del perfil con la velocidad del vehículo se realizaron pruebas a diferentes velocidades .

La calibración se realizó en vías, con diferentes estados de rugosidad. Se realizaron levantamientos topográficos de 100 m de longitud con intervalos de lectura de 0.25 m.

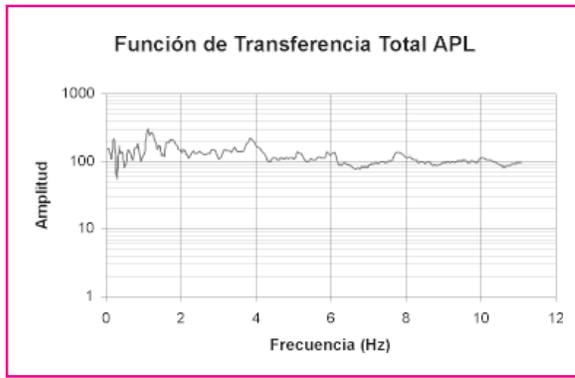
Los espectros de Fourier obtenidos en los tramos de vías medidos con mira y nivel para vías en buen y mal estado se presentan en las Figuras 10a y 10b.



**Figuras 10a -10b.** Espectros de Fourier para dos tramos de calibración

El objetivo de medir tramos de vías con distintas características de perfil longitudinal, es obtener luego una excitación del APLI para distintas frecuencias. En las Figuras 10, se puede observar como la composición frecuencial de las vías es distinta, la vía en mal estado presenta componentes de bajas frecuencias (fallas locales) con alta amplitud, mientras la vía en buen estado presenta componentes de homogéneos y de baja amplitud.

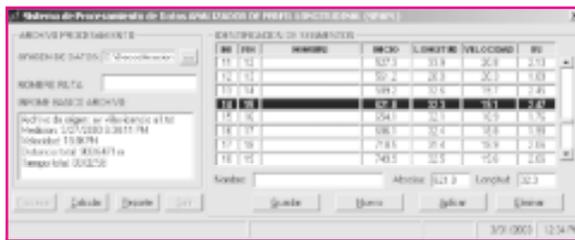
Los espectros para cada una de las vías se comparan con los espectros generados por el APLI (aplicando la función de transferencia obtenida en el laboratorio) y lo que permite realizar una correlación para definir la función de transferencia total, del APLI la cual se presenta en la Figura 11.



**Figura 10.** Función de Transferencia total del APLI

### 4.3 Procesamiento de datos

Los datos de aceleración registrados en la computadora se analizan y procesan con el programa SPDAPLI ver Figura 12, el programa realiza los siguientes pasos:



**Figura 12.** Sistema de Procesamiento de Datos del Analizador de Perfil Longitudinal (SPDAPLI)

- a. **Segmentación de la medición:** La ruta total medida se segmenta en tramos de interés, para obtener índices locales de segmentación.
- b. **Espectro de Fourier señal original:** para la señal medida calcula el espectro de Fourier que determina la composición frecuencial de la señal registrada.
- c. **Función de transferencia:** con la función de transferencia obtenida en laboratorio se realiza la correlación entre la aceleración producida por el terreno y la aceleración medida en el APLI.
- d. **Transformada inversa de Fourier:** al realizar la correlación de espectros de Fourier obtiene un nuevo espectro que corresponde al espectro de aceleraciones del perfil longitudinal.
- e. **Señal de aceleración del terreno:** corresponde al resultado de la transformada inversa de

Fourier sobre el espectro de aceleración del perfil longitudinal .

f. **Integración doble de la señal (navegación inercial):** realiza una doble integración respecto al tiempo para determinar el perfil longitudinal.

g. **Cálculo del IRI:** con los datos del perfil obtenidos calcula el IRI Norma NLT 330.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan los valores de IRI obtenidos por medio del levantamiento topográfico y empleando el APLI, para 3 tramos de vía con diferentes condiciones de rugosidad.

Tramo	Topografía	APLI
Bueno	3.02	3.2
Regular	4.65	4.28
Malo	14.83	15.28

Los resultados obtenidos muestran una variación del 10% lo cual se puede atribuir a errores en la medición de topografía por la precisión del equipo 0.2 mm, imposibilidad de medir exactamente por la línea de medición topográfica y frecuencias del terreno no registradas en la función de transferencia calculada.

Los valores de IRI obtenidos empleando el APLI cumplen con los niveles de tolerancia necesarios para la clasificación de una vía.

## 6. CONCLUSIONES DE RECOMENDACIONES

- El APLI conservó su estructura original se mantuvo el chasis, la rueda el sistema de amortiguador y resorte, sin embargo la plomada horizontal fue sustituida por un acelerómetro capaz de captar las aceleraciones inducidas por el terreno al sistema, lo que a su vez optimiza la captura de datos.
- La navegación inercial es un mecanismo eficiente para determinar movimientos espaciales complejos. En este estudio se utili-

zó para un sistema unidimensional, pero la posibilidad de determinar movimientos tridimensionales puede ser fácilmente implantable.

- Se observa que existe una diferencia entre el valor del IRI medido con mira y nivel y el IRI medido con el APLI, esta diferencia puede tener origen en la imposibilidad de asegurar que el recorrido del APLI corresponde exactamente con los puntos medidos topográficamente. Es importante anotar que una diferencia en la medida de un punto topográfico de dos milímetros puede producir una diferencia en el IRI de 0.2.
- Sobre la influencia de la velocidad de medida en el valor del IRI para el tramo en buen estado podemos resaltar que al pasar de 20 kph a 50 kph el IRI varía en menos del 10%. A mayor velocidad del APLI, el índice de rugosidad disminuye, esto se puede explicar porque el equipo no tiene la capacidad de registrar de manera adecuada la aceleración inducida por el terreno, es decir no puede captar las altas frecuencias generadas.
- Se observaron buenas correlaciones entre las medidas de IRI empleando métodos tradicionales como lo es el levantamiento topográfico y el APLI .
- El APLI es un equipo de alto rendimiento con un promedio de 25 km/h.
- Se han evaluado más de 1500 km de vías a nivel nacional.
- Es necesario continuar con el estudio del equipo para tener 100% de certeza en los resultados y datos obtenidos con este. .

## 7. REFERENCIAS

[1] Becwith - Marangoni Lienhad "Mechanical Measurement" .Fifth edition. 1995.

[2] Carey, W. N. Jr. and Irick, P. E., "The Pavement Serviceability-Performance Concept." HRB Bulletin 250, 1960, pp. 40-58

[3] Gillespie, T. D., Sayers, M. W. and Segel, L., "Calibration of Response-Type Road Roughness Measuring Systems." NCHRP Report No. 228, Dec. 1980, 81 p.

[4] Gillespie, T. D., Sayers, M. W. and Queiroz, C. A. V., "The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and Calibration Standard for

Measurement." The World Bank, Technical Report No. 45, 1986, 453 p.

[5] Hveem, F. N., "Devices for Recording and Evaluating Pavement Roughness." Highway Research Board Bulletin 264, 1960, pp. 1-26.

[6] Janoff, M. S., et. al., "Pavement Roughness and Rideability." NCHRP Report No. 275, 1985, 73 p.

[7] Janoff, M. S., "Pavement Roughness and Rideability Field Evaluation." NCHRP Report No. 308, 1988, 48 p.

"The AASHO Road Test, Report 5, Pavement Research." HRB Special Report 61E, 1962, 352 p.

[8] L´uni des revestements routiers. Phd. Leger. Ingenieur des Ponts et chaussées du laboratoire central

[9] Montejó Alfonso "Caracterización de la textura superficial de un pavimento".

[10] Ogata KatSuhiko "Ingeniería de Control Moderna".

[11] Ogata Katsuhiko "System Dynamics". Englewood Cliffs. N.J. prentice - hal. Inc. 1978.

[12] Paterson, W. D. O., "International Roughness Index: Relationship to Other Measures of Roughness and Riding Quality." Transportation Research Record 1084, 1986.

[13] Romero José Antonio" Consideración de la energía de deformación en el análisis de la interacción vehículo pesado pavimento". Universidad Nacional Autónoma de México. 1999

[14] Sayers, M. S., "Two Quarter-Car Models for Defining Road Roughness: IRI and HRI." Transportation Research Record 1215, 1989, pp. 165-172.

[15] "Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method." ASTM E1364, American Society for Testing and Materials.

[16] Road Ruf. Software for Analyzing road profiles. University of Michigan Transportation Research Institute ( UMTRI)

[17] Wiener L´integrate de Fourier et quelques des ses applications.