

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### APLICACIÓN DE TELÉFONOS INTELIGENTES PARA DETERMINAR LA RUGOSIDAD DE PAVIMENTOS URBANOS EN LIMA.

Tesis para optar el título de ingeniero civil, que presenta el bachiller:

**CARLOS IGNACIO ALMENARA CUETO**

Asesor: **ING. FÉLIX ISRAEL CABRERA VEGA**

Lima, mayo de 2015

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	
<b>Capítulo 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	4
1.1.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.2. HIPÓTESIS DEL PROYECTO .....	4
1.3. ALCANCE Y LIMITACIONES DEL PROYECTO .....	5
<b>Capítulo 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA</b> .....	<b>6</b>
2.1. NORMA TÉCNICA PERUANA CE.010.....	6
2.2. RUGOSIDAD Y TEXTURA.....	8
2.3. ÍNDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD .....	10
2.3.1. ANTECEDENTES .....	10
2.3.2. EL MODELO DE CUARTO DE CARRO .....	11
2.3.3. ESCALA Y CARACTERÍSTICAS DEL IRI.....	12
2.3.4. MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL IRI .....	13
<b>Capítulo 3: ROADROID</b> .....	<b>16</b>
3.1. DEFINICIÓN.....	16
3.2. ANTECEDENTES .....	17
3.3. CREACIÓN, PRESENTE Y FUTURO DEL ROADROID .....	19
3.4. IRI CALCULADO, IRI ESTIMADO E ÍNDICE ROADROID.....	23
3.4.1. IRI CALCULADO (cIRI).....	23
3.4.2. IRI ESTIMADO (eIRI).....	25
3.4.3. INDICE ROADROID (IR) .....	26
3.5. RUIDOS .....	27
3.6. ACTUALIDAD CONTRACTUAL .....	29
3.7. EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	30
<b>Capítulo 4: MANUAL DE USO Y APLICACIÓN DEL PROGRAMA</b> .....	<b>34</b>
4.1. RECOPIACIÓN DE DATOS .....	34
4.2. CARGAR DATOS .....	38
4.3. VER LOS DATOS EN EL MAPA DE INTERNET .....	39
4.4. DESCARGAR LOS DATOS EN FORMATO DE TEXTO .....	41

4.5. HACER GRÁFICOS DE SEGMENTOS EN EXCEL .....	42
<b>Capítulo 5: METODOLOGÍA DE MUESTREO .....</b>	<b>44</b>
5.1. PLAN DE RECOPIACIÓN DE DATOS .....	44
5.2. MUESTREO .....	45
<b>Capítulo 6: RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
6.1. MUESTREO VÍA EXPRESA .....	48
6.2. MUESTREO COMPARATIVO EN DISTRITOS DE LIMA.....	49
6.3. INFLUENCIA DEL TRÁFICO EN EL MUESTREO .....	52
<b>Capítulo 7: CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>62</b>
ANEXO 1: eIRI VIA EXPRESA DE LIMA.....	62
ANEXO 2: cIRI VIA EXPRESA DE LIMA.....	63
ANEXO 3: COMPARACIÓN DISTRITAL .....	70
ANEXO 4: VELOCIDAD NO CONSTANTE .....	77
ANEXO 5: VELOCIDAD CONSTANTE .....	79
ANEXO 6: COMPARACIÓN eIRI y cIRI CON Y SIN INFLUENCIA DEL TRÁFICO EN LAS MEDICIONES.....	81
ANEXO 7: FOTOS.....	83

## LISTADO FIGURAS Y TABLAS

### FIGURAS

Figura 1. Comparativa rugosidad y textura en pavimentos .....	8
Figura 2. Micro textura en Lima .....	9
Figura 3. Macro textura para lluvias en Florida .....	9
Figura 4. Macro textura usada para heladas en Colorado .....	9
Figura 5. La respuesta dinámica de un cuarto de carro y el Índice Internacional de Rugosidad .....	12
Figura 6. Rugosidad en diferentes pavimentos.....	12
Figura 7. Límites de velocidades según el tipo de pavimento.....	13
Figura 8. Sistema de adquisición de datos con nivel y mira en pavimentos	14
Figura 9. Perfilómetro estático .....	15
Figura 10. Perfilómetro dinámico .....	15
Figura 11. Icono Roadroid y premios obtenidos.....	16
Figura 12. Prototipo 2002-2003 ROADROID .....	18
Figura 13. Primeras mediciones con el ROADROID.....	20
Figura 14. Base de datos de caminos en Suecia.....	21
Figura 15. Cambio de la rugosidad en el tiempo de un pavimento .....	22
Figura 16. Configuraciones para mediciones de IRI con Roadroid.....	23
Figura 17. Comparación de datos del ROADROID con un perfilómetro laser .....	26
Figura 18. Índice Roadroid.....	27
Figura 19. Análisis de datos con el Índice Roadroid .....	27
Figura 20. Cotización por compañía Roadroid.....	30
Figura 21. Cotización por APSA Gestión de Infraestructura .....	31
Figura 22. Calibración inicial del Roadroid.....	35
Figura 23. <i>Display</i> principal ROADROID .....	35
Figura 24. Cargar las muestras del dispositivo al usuario web .....	38
Figura 25. Vista de mapa de un usuario ROADROID .....	39
Figura 26. Herramientas alternativas dentro de la vista de mapa.....	40
Figura 27. Vista de <i>home</i> de un usuario ROADROID .....	41
Figura 28. Opciones de una muestra.....	42

Figura 29. Aplicaciones con los datos en formato de texto .....	42
Figura 30. Vehículo utilizado para la medición .....	45
Figura 31. Dispositivo utilizado para la medición .....	46
Figura 32. Calibración para una de las mediciones .....	47
Figura 33. Mediciones para la vía expresa .....	49
Figura 34. Límites distritales en la ciudad de Lima .....	50
Figura 35. Grafica eIRI vs. Distancia.....	54
Figura 36. Grafica cIRI vs. Distancia .....	54
Figura 37. Análisis Vía Expresa de Lima .....	62
Figura 38. Listado de muestras importadas .....	70
Figura 39. Análisis avenida Arequipa en el distrito de Miraflores .....	70
Figura 40. Análisis avenida Petit Thouars en el distrito de Miraflores .....	71
Figura 41. Análisis ambas avenidas en el distrito de Miraflores .....	71
Figura 42. Análisis avenida Arequipa en el distrito de San Isidro .....	72
Figura 43. Análisis avenida Petit Thouars en el distrito de San Isidro .....	72
Figura 44. Análisis ambas avenidas en el distrito de San Isidro .....	73
Figura 45. Análisis avenida Arequipa en el distrito de Lince .....	73
Figura 46. Análisis avenida Petit Thouars en el distrito de Lince .....	74
Figura 47. Análisis ambas avenidas en el distrito de Lince .....	74
Figura 48. Análisis avenida Arequipa en el distrito de Lince .....	75
Figura 49. Análisis avenida Petit Thouars en el distrito de Cercado de Lima .....	75
Figura 50. Análisis ambas avenidas en el distrito de Cercado de Lima .....	76
Figura 51. Captura pavimento en Colorado - EEUU .....	83
Figura 52. Capturas pavimentos en Florida - EEUU .....	83
Figura 53. Equipo para el muestreo de la presente tesis .....	84
Figura 54. Capturas muestreo con Roadroid en la Vía Expresa de Lima .....	84
Figura 55. Capturas muestreo con Roadroid en avenida Petit Thouars .....	85

## TABLAS

Tabla 1. Condición de la vía según Roadroid (Roadroid,2014(b)) .....	21
Tabla 2: Control para mediciones de cIRI (Forsslöf,2014).....	24
Tabla 3: PU de Rugosidad con Perfilómetro Laser .....	31
Tabla 4: PU de Rugosidad con Roadroid.....	38
Tabla 6: Cálculos vía expresa .....	49
Tabla 7: IRI estimado Avenida Arequipa.....	51
Tabla 8: IRI estimado Avenida Petit Thouars.....	51
Tabla 9: IRI estimado ambas Avenidas .....	52
Tabla 10: Cálculos comparativos entre mediciones con tráfico y sin tráfico ..	53
Tabla 11: Características eIRI y cIRI .....	55
Tabla 12: Correlación de muestras con y sin tráfico .....	56
Tabla a.1: Ensayo Vía Expresa de Lima .....	63
Tabla a.2: Ensayo av. Petit Thouars a velocidad no constante .....	77
Tabla a.3: Ensayo av. Petit Thouars a velocidad constante .....	79
Tabla a.4: Tabla comparativa mediciones con y sin velocidad constante ....	81



Gracias a todas esas personas importantes e influyentes en mi vida, que siempre me brindaron apoyo, paciencia y sabiduría; soy consciente que ahora me toca regresar todo lo inmensamente otorgado. A mis padres, Luciano y Patricia; a mis hermanos, Jose Miguel y Luciana; a mi enamorada, Lucero Aida; a mi asesor, Israel Cabrera; y a todos los profesores que influyeron y sirvieron de inspiración.

## RESUMEN

La aplicación para medir la rugosidad con teléfonos inteligentes Roadroid, presenta una alternativa confiable con grandes beneficios técnicos y económicos si se le comparada con los métodos más usados hoy en día en carreteras. Por el lado técnico, la clasificación por precisión del IRI calculado es de clase 2 según el Banco Mundial, igual de precisa que los instrumentos más utilizados en la actualidad como por ejemplo los perfilómetros laser. Económicamente se pueden reducir los costos en más de un ochenta (80) porciento por cada análisis de rugosidad, sin contar los beneficios extra con los que esta cuenta como por ejemplo el no necesitar mantenimiento y poseer una muy baja devaluación en el tiempo.

Roadroid cuenta con herramientas que permiten generar informes y realizar un control de rugosidad de manera clara, didáctica y efectiva. La aplicación móvil traslada los resultados a una plataforma virtual donde cuenta con automatizaciones que agilizan el trabajo de gabinete, generando gran eficiencia al poder realizar mayores kilómetros de análisis a precios más bajos generando un importante valor agregado.

La presente Tesis, más allá de presentar el marco teórico respecto a rugosidad, presenta diferentes estudios con Roadroid realizados en el entorno local buscando evaluar los diferentes ruidos que influyen en la aplicación, mostrando los pasos para una aplicación verás y los diversos beneficios que esta posee.

Se realizaron tres ensayos en la ciudad de Lima: se evaluó la rugosidad de la vía expresa pudiendo comparar los resultados de IRI estimado y calculado hallados por el programa, se comparó la rugosidad a lo largo de una arteria principal para mostrar la variación de esta en el tiempo y el uso de la aplicación para labores de mantenimiento, y se evaluó la influencia en los resultados debido a la variación en la velocidad durante el muestreo.

Paso siguiente, se analizaron los resultados anexados en base a las hipótesis de investigación planteadas, pudiendo concluir que: la rugosidad en la vía expresa cumple con la norma peruana CE.010 al poseer un IRI menor que el límite de 2.5 m/km, la variación entre los resultados de IRI calculado y estimado no van más allá de un dos (2) por ciento de variación, en cuanto a comparación distrital se encontró que el tránsito ha generado un mayor daño en los distritos de San Isidro y Miraflores a comparación del Cercado de Lima y Lince, por último concluyó que la variación de la velocidad al momento del muestro generó una variación muy notoria en los resultados siendo nuestro índice de correlación entre muestras menor a 0.17.



## Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en pleno crecimiento económico del Perú, la construcción de vías y el mantenimiento de las ya existentes es de vital importancia pues son las arterias principales de comunicación y comercio. El país, a comparación de muchos otros de la región, presenta una enorme brecha en cuanto a kilómetros por construir que deberán ser implementados durante los siguientes años buscando por ser con el continuo desarrollo.

El nivel de servicio y la aprobación de calidad en un pavimento rígido como flexible se basa, entre otros parámetros, en la rugosidad de la superficie de rodadura o carpeta asfáltica, que según la norma peruana CE.010 debe ser medida con el índice internacional de rugosidad (IRI) dada por el Banco Mundial en los años 80 para estandarizar los proyectos viales alrededor del mundo. Actualmente existen muchas herramientas para medir la rugosidad en una superficie de rodadura, pero una totalmente nueva e innovadora en nuestro mercado es el uso de la aplicación para teléfonos móviles Roadroid. Esta aplicación busca medir la rugosidad por las vibraciones que experimenta un vehículo al circular por una vía, capturando mediante los acelerómetros de los teléfonos las vibraciones del chasis y tratando los resultados por dos métodos: calculado, incorporando variables para simular el modelo de cuarto de carro impuesto por el IRI, o estimado, mediante ecuaciones lineales de correlación para hallar la rugosidad en unidades estandarizadas de metros por kilómetro.

Roadroid se presenta como una nueva herramienta de medición que agiliza y facilita de gran manera el cálculo de la rugosidad en pavimentos urbanos volviéndose una alternativa eficaz y económica para la gestión de proyectos viales y control de mantenimiento de los mismos. Ha sido reconocida en muchos congresos dedicados a la investigación y se viene aplicando en diferentes proyectos a mundial.

## 1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

### 1.1.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general es comprender el concepto de rugosidad en pavimentos de manera clara, para luego mostrar un método moderno e innovador de cómo obtener está empleando la aplicación para teléfonos móviles “Roadroid”, evaluando si es aceptada por la norma técnica peruana que rige los pavimentos urbanos e introduciendo su uso, dando a conocer una nueva opción que podrá ser utilizada en la construcción y mantenimiento de vías.

### 1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Exponer los parámetros que plantea la norma peruana CE.010 de pavimentos urbanos para temas de rugosidad.
- Evaluar los beneficios del uso de la aplicación para teléfonos móviles Roadroid.
- Analizar si las velocidades de circulación presentes en Lima afectan al método de medición de las aplicaciones Roadroid.
- Analizar y comparar como varia la rugosidad en diferentes distritos de Lima, el estado de sus pavimentos.

## 1.2. HIPÓTESIS DEL PROYECTO

A lo largo del proyecto buscaremos resolver inquietudes, todas relacionadas a nuestros objetivos, que serán las siguientes hipótesis:

- Es posible realizar ensayos con Roadroid en el Perú dada la normativa peruana que rige los pavimentos urbanos CE.010 y la actualidad contractual.
- Que beneficios ofrece Roadroid a comparación de los métodos ya usados para medir rugosidad
- Existe una amplia variación al comparar el IRI estimado e IRI calculado obtenido con la aplicación en caminos pavimentados.

- La variación en la velocidad al momento del muestreo afecta los resultados de rugosidad en mediciones con Roadroid.
- Como varia la rugosidad en una arteria principal en el tiempo, se puede evaluar los resultados por distritos, como se puede realizar segmentación para la comparación.

### 1.3. ALCANCE Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

El presente proyecto de tesis abarca la presentación de los conceptos y normas pertinentes al tema de rugosidad en pavimentos urbanos en el Perú y presenta una nueva alternativa para la medición de esta: la aplicación para teléfonos inteligentes Roadroid. Se explicará cómo funciona el software, como se utiliza y como se pueden evaluar los datos resultantes. Además se aplicará la herramienta en nuestras vías urbanas, cuestionando así nuestros objetivos y pudiendo mostrar: los beneficios de la aplicación, factores influyentes en la medición, diferencias que se pueden encontrar respecto a rugosidad en diversos distritos de Lima debido a temas de mantenimiento.

## Capítulo 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1. NORMA TÉCNICA PERUANA CE.010

Para la construcción en el Perú se establecen parámetros, según experiencias y conocimientos, en forma de normas técnicas. Una norma técnica es un documento aprobado por un organismo reconocido que establece especificaciones técnicas basadas en los resultados de la experiencia y del desarrollo tecnológico, que hay que cumplir en determinados productos, procesos o servicio. En el Perú, el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO) es la organización encargada de imponer las normativas para la actividad ingenieril.

La norma peruana que habla de pavimentos urbanos en el Perú es la CE.010 del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE). Esta Norma tiene por objeto establecer los requisitos mínimos para el diseño, construcción, rehabilitación, mantenimientos, rotura y reposición de pavimentos urbanos, desde los puntos de vista de la mecánica de suelos y de la ingeniería de pavimentos a fin de asegurar la durabilidad, el uso racional de los recursos y el buen comportamiento de aceras, pistas y estacionamientos de pavimentos urbanos, a lo largo de su vida de servicio.

Según dicha norma en su “CAPÍTULO 3. TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN DE CAMPO, ENSAYOS DE LABORATORIO, REQUISITOS DE LOS MATERIALES Y PRUEBAS DE CONTROL”, en el acápite “3.5 CONTROL Y TOLERANCIAS” existen controles, márgenes de error y tolerancias para cada parte en la construcción de un pavimento, es decir, para cada una de sus capas: superficie de rodadura, base, sub base y sub rasante. Por ejemplo, para la superficie de rodadura, asfáltica o de concreto, nos detalla: controles en la compactación, espesor, lisura, regularidad superficial o rugosidad y medición de deflexiones sobre la capa asfáltica terminada.

Por el enfoque del presente estudio centramos se buscará cumplir con los parámetros estipulados en el punto de regularidad superficial o rugosidad que detallan lo siguiente (RNE,2010):

- La rugosidad debe ser medida siempre en vías expresas o donde el personal responsable de la obra lo solicite en unidades IRI. Solo nos da una tolerancia máxima en vías expresas de 2.5 m/km.
- Se podrá utilizar cualquier método técnicamente aceptable para medir la rugosidad, siempre previamente aprobado por la supervisión.
- Se deberá medir la regularidad en toda la longitud de la superficie de rodadura y en ambas huellas vehiculares.
- La medición de la rugosidad en pavimentos urbanos se realizará finalizada la obra como control final de calidad y aceptación de la misma.

Esta norma también detalla en su “CAPÍTULO 5. ROTURA Y REPOSICIÓN DE PAVIMENTOS PARA INSTALACIÓN DE SERVICIOS PÚBLICOS”, en el acápite “5.7 CONTROL DE CALIDAD” que los controles para pavimentos repuestos serán los mismos que en el capítulo 3, pavimentos nuevos, descritos anteriormente.

El último punto importante de la norma donde es criticada la rugosidad de la superficie de rodadura es el “CAPÍTULO 6. MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS”, donde en las tareas del mantenimiento se debe de inspeccionar la condición del pavimento, donde la rugosidad es un parámetro importantísimo que nos podrá mostrar desde desgaste hasta problemas críticos como perdida de agregados o asentamientos en el asfalto. Esto es de vital importancia para seguir con las tareas de mantenimiento como determinación del tipo de mantenimiento, estimación de recursos, identificación de prioridades, programas de trabajo y monitoreo (acápites “6.4 TAREAS DE MANTENIMIENTO”).

## 2.2. RUGOSIDAD Y TEXTURA

La rugosidad de los caminos es uno de los parámetros más usados para evaluar la calidad en una vía y ver el estado del pavimento. Según lo detallado por el ingeniero Forslöf en su artículo académico sobre Rugosidad y Textura (Forslöf,2014), muchos confunden los conceptos de rugosidad y textura, pero estos no son sinónimos como muchos piensan. A continuación se puede apreciar en la **Figura 1** claros ejemplos de la diferencia entre rugosidad y textura de un pavimento.

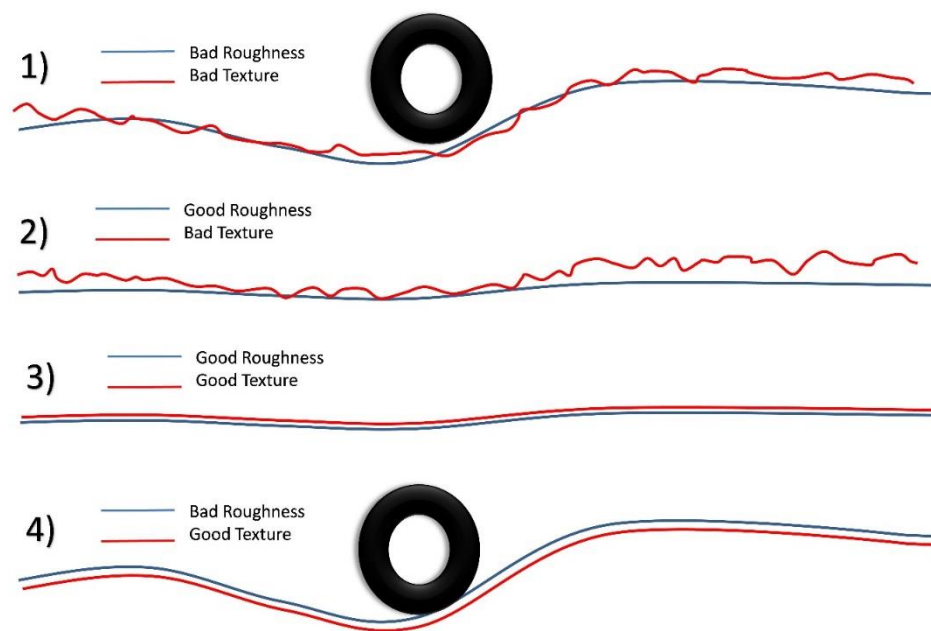


Figura 1. Comparativa rugosidad y textura en pavimentos (Forslöf,2014)

La unidades de medida de la rugosidad es el índice internacional de rugosidad (IRI) y la textura es referida como macro (también llamada mega) o micro texturas. Las micro texturas, por definición una muy pequeña corrugación en la capa de rodadura del pavimento, son comúnmente referidas en términos de fricción para su gestión.

La expresión buena o mala textura son nombres adoptados por convención, mas no por temas asociados a la calidad. Las macro texturas son llamadas malas por el hecho que son más gruesas mientras que por buenas nos referimos a micro texturas por el hecho de ser muy finas. Para observar un claro ejemplo de textura en pavimentos podemos presentar el caso de nuestro país a diferencia

de Estados Unidos. Nosotros construimos pavimentos con micro texturas, buscando que sean lo más lisas posibles como se puede observar en la **Figura 2** mientras que por temas de adherencia ante situaciones climáticas como lluvias torrenciales y heladas, en Estados Unidos se utilizan acabos macro para que los neumáticos no resbalen, como podemos observar en las **Figuras 3 y 4**.



Figura 2. Micro textura en Lima

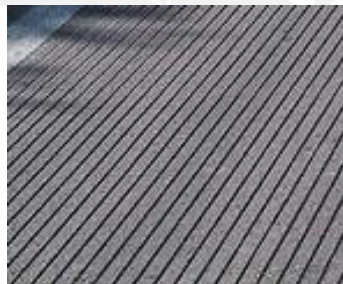


Figura 3. Macro textura para lluvias en Florida



Figura 4. Macro textura usada para heladas en Colorado

A menudo la rugosidad y la textura van de la mano, lo que nos dice que si el IRI aumenta es porque la textura empeora. Existen excepciones como el caso 4 de la figura anterior donde pavimentos lisos de concreto o asfalto en caliente con acabados liso pueden tener un alto IRI y pavimentos con gavilla o pérdida de superficie de rodadura pueden tener un IRI bajo pero una textura muy pobre. Los

caminos de grava (caso 2 de la figura) tienen una textura extremadamente pobre pero si no existen muchos desniveles verticales puede tener una buena rugosidad, pese a que no se pueda manejar a más de 20 o 30 km/h.

### 2.3. ÍNDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD

El Índice Internacional de Rugosidad, comúnmente llamado IRI por sus siglas en inglés (*International Roughness Index*), es la unidad estandarizada utilizada por excelencia para la medición de la rugosidad.

El cálculo matemático del Índice Internacional de Rugosidad se define como la acumulación de desplazamientos verticales en valor absoluto, de la masa del vehículo con respecto a la masa asociada a la suspensión de un modelo de vehículo, entre la distancia recorrida sobre un camino que se produce por los movimientos al vehículo (**Ver Figura 5**). Así, las unidades del IRI serán de longitud entre longitud, que debido a las magnitudes de estas se expresan mm/m, m/km, in/mi, etc. (IMT, 1998).

#### 2.3.1. ANTECEDENTES

En los años sesenta el Banco Mundial invirtió en la investigación de diversas vías en países subdesarrollados, llegando a concluir que la poca inversión en infraestructura vial solo llevaba a gastos mayores de los usuarios al circular por estas. Se identificó así, que la rugosidad en la capa de rodadura era una de las variables principales en cuanto al gasto por circular.

Una gran dificultad encontrada en la investigación fue que los datos de diversas carreteras eran muy difíciles de comparar, dado que cada país contaba con diferentes métodos y unidades para medir la rugosidad. Es por ello que se pensó en buscar una escala única que pudiera servir de parámetro de comparación y estandarización.

Fue así que en 1982, el Banco Mundial comenzó a experimentar con diferentes métodos para lograr establecer correlaciones y un estándar único de calibración para la rugosidad en Brasil. Debido a que todos se basaban en deformaciones se logró llegar a correlacionar los diferentes métodos y una vez establecido este punto, se planteó como objetivo principal encontrar un índice de referencia conocido hoy en día como el Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

Sus primeras investigaciones tuvieron lugar en un programa Norteamericano llamado *Nacional Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) y estuvo basado en un modelo llamado "Golden Car" descrito en el reporte 228 del NCHRP. Actualmente se basa en un modelo complejo de cuarto de carro que se describe en el siguiente acápite (Sayers y Karamihas, 1998).

### 2.3.2. EL MODELO DE CUARTO DE CARRO

Para el cálculo del IRI emplearon ecuaciones que se basaron simplemente en las deflexiones y que no dependieran de parámetros como el tiempo de muestreo. Se buscó un modelo que representase las vibraciones que podría tener un pasajero en un vehículo cualquiera, por lo que se eligió un modelo de cuarto de carro.

El modelo de cuarto de carro (*quarter car*) se basa en una rueda representada por un resorte vertical, la masa del eje soportada por la llanta, un resorte de la suspensión, un amortiguador y la masa del vehículo soportada por la suspensión de la ruda (**Figura 5**). Las deflexiones a lo largo del camino son acumuladas y divididas entre la distancia horizontal para calcular la rugosidad en IRI como dice su propia definición (Sayers y Karamihas, 1998).

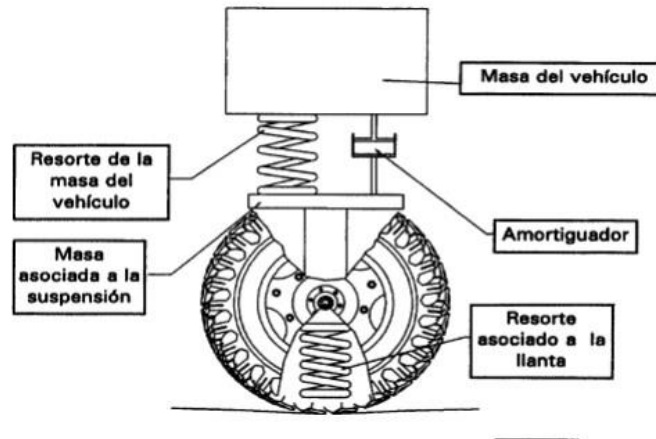


Figura 5. La respuesta dinámica de un cuarto de carro y el Índice Internacional de Rugosidad (IMT,1995)

### 2.3.3. ESCALA Y CARACTERÍSTICAS DEL IRI

El IRI tiene unidades de mm/m, m/km o in/mi. Varía de 0 a 20 m/km o 0 a 1260 in/mi (rugosidad 0 m/km es un camino uniforme perfecto y 20 m/km uno ya casi imposible de transitar). En la **Figura 6** se muestran las rugosidades para diferentes tipos de pavimentos.

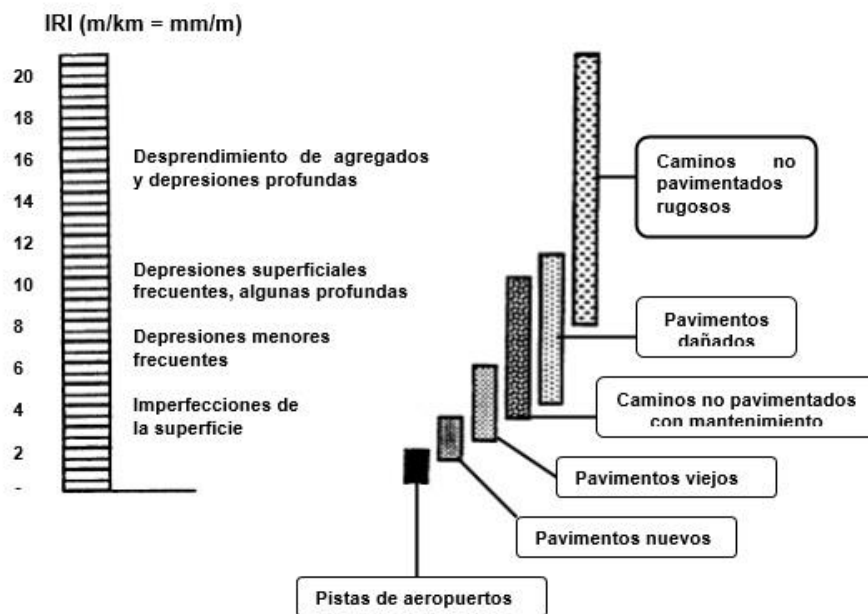


Figura 6. Rugosidad en diferentes pavimentos (IMT,2002)

Luego de diversos muestreos en diferentes tipos de pavimentos con diferentes rugosidades, el departamento de transporte de la

universidad de Michigan concluyó en 1998 la tabla expuesta a continuación (**Figura 7**) donde estipula la velocidad máxima que se puede desarrollar según la rugosidad de la vía. Es una tabla muy importante pues es con esta que se basan los márgenes de rugosidad para diferentes proyectos según la velocidad que se permitirá como límite superior, por ejemplo el caso de la norma peruana que exige máximo 2.5 m/km de IRI para vías expresas, tiene que ver con el límite de velocidad máxima con la que se diseñan estas vías de entre 80 y 100 km/h.

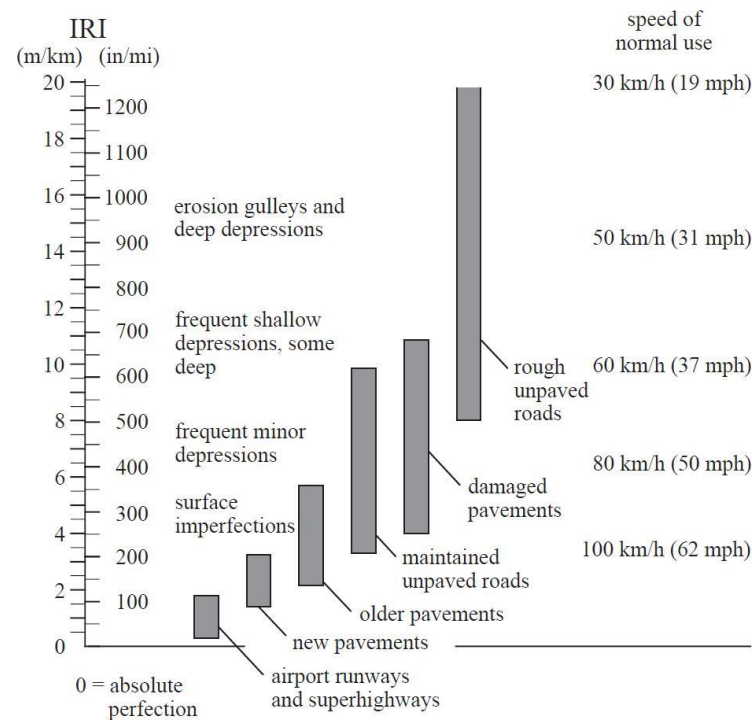


Figura 7. Límites de velocidades según el tipo de pavimento (Sayers Y Karamihas,1998)

### 2.3.4. MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL IRI

Como mencionamos con anterioridad, la clasificación IRI fue propuesta por el Banco Mundial para estandarizar la medición de la rugosidad y poder estipular la calidad y confort de los pavimentos a nivel mundial. Según el uso de la vía la rugosidad puede llegar a ser un factor determinante para la seguridad y funcionalidad de esta.

Con el tiempo el Banco Mundial estipulo que los métodos para medir la rugosidad podían ser desde muy precisos hasta mera subjetividad

por lo que decidió clasificarlos según la precisión (Sayers et al, 1986(b)). Según este, los métodos usados para la determinación del IRI pueden clasificarse en 4 clases de precisión:

- Clase 1: Perfiles de alta precisión

Son los métodos más exactos pero considerados de bajo rendimiento, ya que la recolección de datos es lenta y requiere de mayor cantidad de horas en campo (hombre, máquina y herramienta), se basa en perfiles topográficos levantados cada 0.25 m con precisión de 0.5 mm (Referencia). Los métodos para esta clase son la Mira y Nivel y TRRL Beam. **Figura 8**



Figura 8. Sistema de adquisición de datos con nivel y mira en pavimentos (Nava,2007)

- Clase 2: Obtención de IRI directo por ecuaciones

Agrupar a los demás métodos que no cumplen con los niveles de precisión para la Clase 1 pero también se basan en medir el perfil longitudinal directamente por medios digitalizados. Se usa generalmente en vías extensas y de importante confiabilidad, como vías expresas o alimentadoras dada la alta velocidad de medición.

Los perfilómetros buscan correlacionar la variación de los niveles respecto a una horizontal que se mueve con ellos, por lo que hace que el proceso de medición sea mucho más rápido. Un ejemplo de perfilómetros de alta velocidad son el *APL Trailer* y *GMR Type Inertial Profilometer* (Del

Aguila,1999(b)), pero en esta clase se ubican muchos otros métodos tanto dinámicos como estáticos. En la **Figura 9** se muestra un ejemplo de perfilómetro estático frente a la **Figura 10** que presenta uno dinámico.



Figura 9. Perfilómetro estático (Nava,2007)

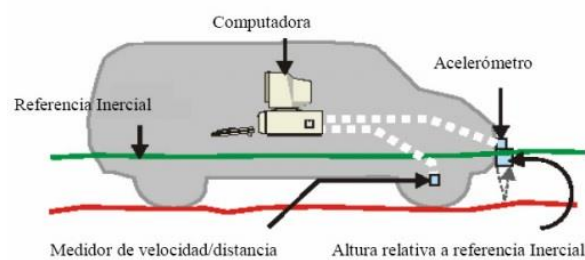


Figura 10. Perfilómetro dinámico (Nava,2007)

- Clase 3: Estimación de IRI con ecuaciones de correlación

También llamados de tipo respuesta, se ubican todos los métodos basados en ecuaciones de correlación para estimar el IRI, sin mayores factores que afecten y corrijan los datos obtenidos en campo. Los métodos de esta clasificación más conocidos son *Bump integrator*, *Mays meter* y *NAASRA Meter* (Del Aguila,1999(b)).

- Clase 4: métodos subjetivos y no calibrados

Permiten obtener resultados meramente referenciales y se emplean cuando se requieren únicamente estimaciones gruesas de la rugosidad.

## Capítulo 3: ROADROID

### 3.1. DEFINICIÓN

La aplicación para *smartphones* o teléfonos inteligentes Roadroid (**Figura 11**) debe su nombre a las palabras en inglés “*road*”, camino o vías traducido al español, y “*droid*” por Android, el sistema operativo en el cual esta aplicación esta codificada. Comenzó a desarrollarse en el 2010 buscando utilizar las herramientas preinstaladas en los dispositivos móviles con el objetivo de lograr una aplicación capaz de medir la rugosidad de manera precisa y que a comparación de los instrumentos para medir rugosidad existentes en el mercado sea: portable, eficaz y sencilla de aplicar.



Figura 11. Icono Roadroid y premios obtenidos (Roadroid,2014(c))

La aplicación permite medir la rugosidad tomando como dato las vibraciones medidas por los acelerómetros con los que cuentan los teléfonos inteligentes y convirtiéndolas en unidades IRI a través de ecuaciones de correlación lineal, para un estimado, o mediante el modelo de cuarto de carro, para datos más precisos, esto quiere decir que realiza dos ensayos a la par para determinar la rugosidad de manera estimada y calculada, las cuales se explican a detalle en los capítulos siguientes. El IRI estimado se considera de precisión clase 3 según la clasificación del Banco Mundial dado que usa una ecuación lineal para la aproximación de resultados, mientras que el IRI calculado puede considerarse un método más preciso de clase 2 (Sayers,1986(a)).

Actualmente, viene siendo implementado en diversos proyectos a nivel mundial y siendo presentado en diferentes congresos relacionados a transporte como en el IV Congreso Regional IRF Latinoamericano de Carreteras, el presente año. Se ha hecho acreedor a diferentes reconocimientos como el *European Satellite Navigation Competition*, *World Summit Award* y el *International Road Federation Award* en el 2012, 2013 y 2014 respectivamente.

### 3.2. ANTECEDENTES

El equipo de Roadroid, comandado por los suecos Hans Jones y Lars Forslof, comenzó este proyecto a mediados de los noventas trabajando en un lenguaje de programación para móviles *mobile ITS*, particularmente con un recolector de datos móviles, información del tiempo en vías y una base de datos de vías.

En el *Transportation Research Board* (TRB) de Washington en 2001, se presentó un proyecto sobre el rastreo de camiones, donde según la velocidad de estos se podía interpretar las condiciones de los pavimentos, es así que se decidió agregar a este una lectura de vibraciones a lo largo del rastreo.

Junto al *Royal Institute of Technology* se construyó un primer piloto entre el 2002 y 2003. Este primer piloto consistió en un acelerómetro de alta precisión, colocado al eje trasero de un vehículo de tracción delantera, conectado a una computadora que analizaba las señales.

En la **Figura 12** mostrada a continuación podemos apreciar algunas imágenes del prototipo del 2002-2003.

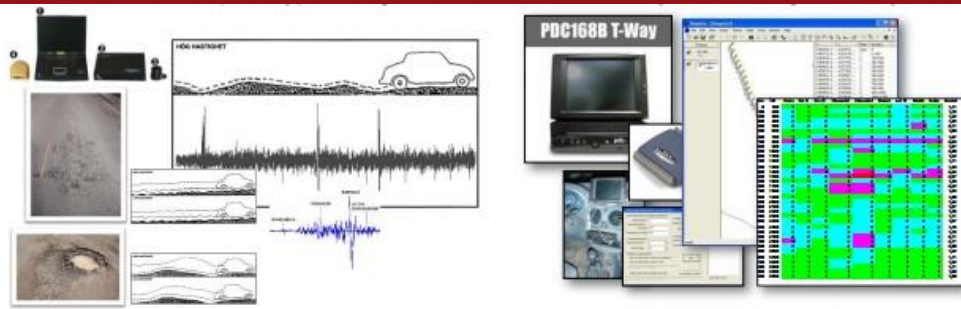


Figura 12. Prototipo 2002-2003 ROADROID (Roadroid,2014(b))

Con estos primeros y prometedores resultados la Administración Nacional de Caminos de Suecia (SNRA) se interesó en la investigación decidiendo financiar la validación de este prototipo y otras investigaciones enfocadas en caminos no pavimentados de grava.

Así, se desarrolló un vehículo especial de medición que consistía en una computadora de sistema Windows que medía con un acelerómetro, conexión externa para GPS y datos móviles. Se programó además una opción para poder visualizar en la web los tramos en diferentes colores según la intensidad de las vibraciones.

Se presentó un primer estudio en el foro de transporte en Linköping en el año 2005, el cual se basaba en el estudio de 35 segmentos de 100 metros de diversas vías donde se mostraba un análisis físico de cada uno según cuatro aspectos:

- Amplitudes medidas por el acelerómetro
- Algoritmos basados en media cuadrática
- Medición de velocidades en vehículos
- Cantidad de datos en la muestra

Se comparó con la descripción hecha por expertos respecto a las vías y más de un 70% concordaron. Sin embargo luego se comprobó que los resultados repetidas veces eran satisfactorios objetivamente pues la comparación con opiniones de expertos era muy subjetiva.

En 2006 se clasificó esta herramienta como relativamente económica y fácil de operar, logrando costos de venta muy altos. Sin embargo, poseía algunas limitaciones que venían por la infraestructura de vehículo, las conexiones entre los cables y la computadora, y la humedad en el ambiente.

### 3.3. CREACIÓN, PRESENTE Y FUTURO DEL ROADROID

Fue en 2010 que todas las ideas entre el 2002 y el 2006 fueron reevaluadas con una nueva y muy poderosa herramienta en mano, los *smartphones* o teléfonos inteligentes, los cuales cuentan por sí solos con acelerómetros, GPS, un procesador interno, memoria de almacenamiento y comunicación de datos.

Sin embargo, surgieron nuevas interrogantes como si es posible usar y correlacionar las medidas obtenidas en el chasis del vehículo, o como hacer frente a diferentes tipos de vehículos pues cada uno cuenta con diferentes propiedades de amortiguamiento y rigidez, o si será suficiente con la frecuencia de recolección de datos con la que cuenta un teléfono inteligente o la sensibilidad del acelerómetro, o si los resultados dependerán del modelo del teléfono inteligente se podrán obtener diferentes resultados

Se usó como base una aplicación para Android basada en logaritmos para construir señales de acelerómetro. La elección del sistema operativo Android fue elegido sobre iOS por la relación de precio y performance.

El 2011 se comenzó a realizar muestras en diferentes vías, con diferentes vehículos y obstáculos construidos. Se eligió el mejor hardware de la temporada que era una Galaxy Tab GT P1000, con diferentes vehículos desde autos pequeños hasta una 4WD Jeep a 6 diferentes velocidades 20, 40, 60, 80, 100 y 120 km/h. A continuación, en la **Figura 13**, podemos apreciar las primeras mediciones con el Galaxy Tab GT P1000.



Figura 13. Primeras mediciones con el ROADROID (Roadroid,2014(b))

Luego de las muestras tomadas con diferentes dispositivos, con los algoritmos del Roadroid y las señales obtenidas por los acelerómetros se obtuvieron las siguientes tres conclusiones:

En primer lugar, que las diferencias entre vehículos tienen mayor variación a velocidades bajas, a velocidades entre 40 y 80 km/h si bien existen son mucho menores estas diferencias. Así, los estudios nos dieron un modelo de como calcular la influencia de la velocidad en tres tipos de chasis de vehículos.

Segundo, que las discrepancias entre los dispositivos usados para las pruebas nos generan grandes diferencias incluso para frecuencias y sensibilidades de acelerómetros similares. Es por ello que la calibración será muy importante y nos servirá para escalar los resultados obtenidos a una muestra compatible.

Y por último, que es necesario un buen elemento de montaje que asegure un montaje lo más monolítico posible y que el lente de la cámara del dispositivo pueda dar al pavimento. Lamentablemente solo existen buenos elementos de montaje para pocos dispositivos en el mercado.

Para la visualización de la data obtenida en campo se desarrolló una herramienta que muestra en mapas la condición de los pavimentos. Los datos obtenidos son comprimidos y enviados a la nube, servicio de almacenamiento provisto por Amazon. Estos datos subidos y almacenados pueden ser visualizados en mapas como *Open Street*

Maps (OSM) o Google Maps por las coordenadas GPS de los *smartphones*, el equipo Roadroid desarrollo una herramienta para mostrar la calidad de los pavimentos en colores según cuatro condiciones (pobres, no satisfactorios, satisfactorios o buenos) en las que cada tramo se pueda clasificar una vez calculados los valores de rugosidad estimada en IRI (**Tabla 1**).

Tabla 1. Condición de la vía según Roadroid (Roadroid,2014(b))

Condición Vía	eIRI	Color
buena	< 2.2	Verde
satisfactorio	2.2 – 3.6	Amarillo
no satisfactorio	3.6 – 5.4	Rojo
pobre	>5.4	Negro



Figura 14. Base de datos de caminos en Suecia (Roadroid,2014(b))

En la web se podrá crear una base de datos de los caminos y evaluar por secciones o por rangos de tiempo las muestras, por ejemplo en Suecia se probó con la Base de Datos Nacional de Caminos de Suecia (NVDB) como se puede apreciar en la **Figura 14**.

Esta herramienta se creó con la finalidad de poder comparar la variación de la rugosidad en el tiempo, siendo las mediciones un dato importante para la toma de decisiones en cuanto al mantenimiento de

una vía y abriéndole a esta aplicación un gran mercado diferentes concesiones de vías como clientes.

Según lo expuesto en el IV Congreso Regional IRF Latinoamericano de Carreteras – Perú 2014, con esta aplicación se puede basar una gestión de mantenimiento de vías buscando optimizar economía versus nivel de servicio. El deterioro de una vía con el tiempo es inminente, sin embargo existirá una gran diferencia en cuanto a costos y niveles de servicio de una superficie de rodadura desgastada comparada con una superficie ya colapsada, una gráfica muy clara acerca de los costos de mantenimiento se puede apreciar en la **Figura 15**.

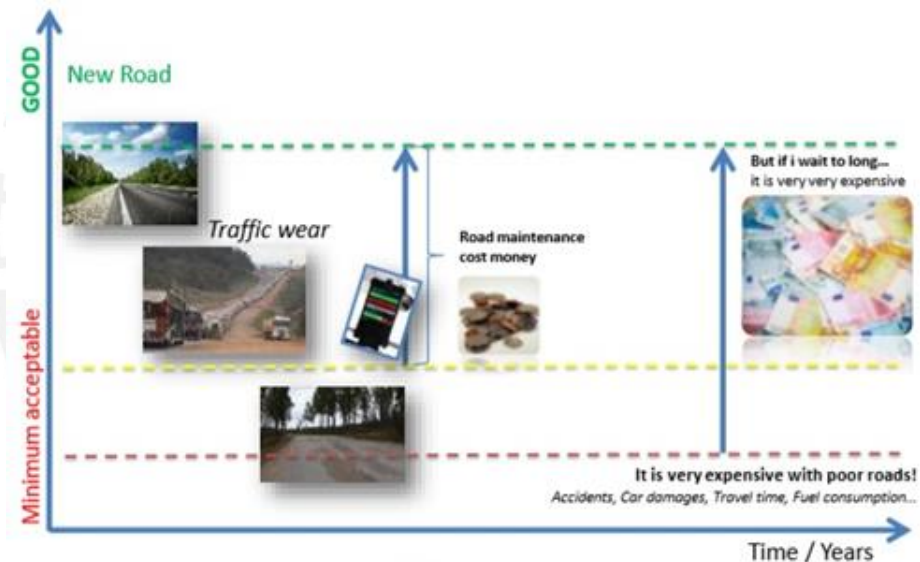


Figura 15. Cambio de la rugosidad en el tiempo de un pavimento (Roadroid,2014(c))

Actualmente, el equipo Roadroid liderado por su CEO Lars Forsslöf se encuentra continuamente realizando actualizaciones de la aplicación y ofreciendo una plataforma cada vez más dinámica y amigable. Continuamente vienen publicando documentos de investigación y alcances de sus evaluaciones a través de redes sociales como lo son LinkedIn ([https://www.linkedin.com/today/author/97325448?trk=pulse-det-atr\\_posts](https://www.linkedin.com/today/author/97325448?trk=pulse-det-atr_posts)) o su misma página web.



especificarlas previamente en el programa. Estas son el tipo de vehículo, la sensibilidad para la medición y determinar la longitud de los segmentos entre 20 y 200m (**Figura 16**), longitud en la cual la simulación de los pesos oscilantes es calculada para determinar un valor de rugosidad promedio por tramo. También se debe tener en cuenta mantener constante la velocidad de muestreo entre 60 y 80 km/h.

Los tipos de vehículos estipulados en la configuración son:

- Vehículo pequeño
- Vehículo normal (Sedan)
- Camioneta de doble tracción o 4x4
- Bicicleta

Según lo analizado por el equipo Roadroid en distintos muestreo a lo largo de diversos países se llegó a la siguiente tabla de recomendaciones para la configuración del programa previo al muestreo.

Tabla 2: Control para mediciones de cIRI (Forslöf,2014)

Tipo de Vía	Asfalto	Grava	Tierra
<b>Velocidad</b>	80 km/h	60 km/h	40 km/h
<b>Sensibilidad cIRI</b>	1,6	2,2	2,8
<b>Longitud Tramo cIRI</b>	40 m	100 m	200 m

Si el dispositivo de medición es correctamente calibrado, se podrá cubrir la demanda de calidad de una clase 2 para cualquier tipo de vía pavimentada o camino de trocha a velocidades constantes. La validación de los datos obtenidos por el dispositivo y su correlación con IRI es relacionada por el *software ProVal*. Este software cuenta con una confiabilidad muy grande en análisis de perfiles de pavimentos, cuenta con clientes en Estados Unidos como *Federal*

*Highway Administration (FHWA) y the Long Term Pavement Performance Program (LTPP).*

Pese a que no son comunes en Lima, ni parte de nuestro estudio, se debe comentar que las correlaciones son limitadas para pavimentos muy rugosos como pavimentos con sellado superficial de grava o adoquines.

### 3.4.2. IRI ESTIMADO (eIRI)

El IRI estimado usa una fórmula de conversión lineal siendo clasificado por el Banco Mundial como un método de medición de clase 3 de precisión. Cabe resaltar que las vibraciones dadas por la textura, sobre todo en macrotexturas, pueden afectar a esta estimación aumentando la rugosidad.

Se sugiere el eIRI como una buena referencia, con valores confiables y muy aproximados a la realidad si se cumple el rango de velocidades entre 20 y 80 km/h. Los cambios en el rango de velocidades deben ser mínimos, dado que la aceleración puede afectar notablemente los resultados, se analizará un caso más adelante.

Para determinar esta ecuación de correlación se realizaron estudios en segmentos de 20 metros a lo largo de las vías de la Base de Datos Nacional de Caminos de Suecia (NVDB), que luego de ser comparados se decidió por una ecuación lineal de correlación con una dispersión  $R^2$  de 0.5 (75%). En la siguiente imagen, **Figura 17**, se puede apreciar, a la izquierda, la relación de datos obtenidos. Mientras que a la derecha, una comparación con nuestros IRI calculado versus el calculado por un carro de perfilómetro laser.

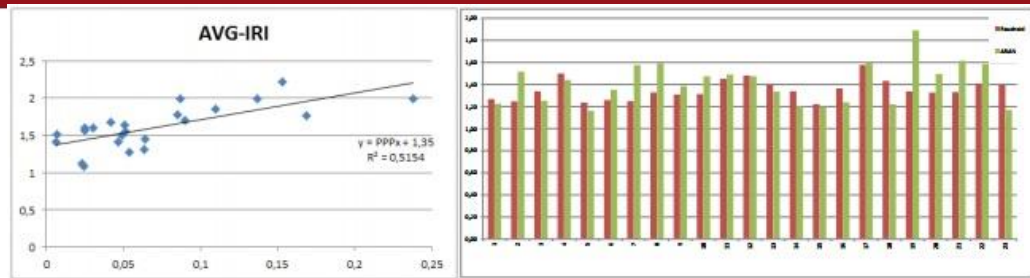


Figura 17. Comparación de datos del ROADROID con un perfilómetro laser (Roadroid,2014(b))

Según dos estudios realizados por dos universidades de renombre, como la Universidad de Pretoria y la Universidad de Auckland, existe una homogeneidad de resultados de al menos 81% entre la rugosidad obtenida por teléfonos inteligente y ecuaciones de correlación versus métodos de clase 1 de precisión. (Schlotjes et al,2013) (Johnston y Islam,2013)

### 3.4.3. INDICE ROADROID (IR)

Algo que se buscaba también con esta aplicación era poder ir añadiendo datos a los mapas de redes de caminos, pudiendo generar reportes de la calidad del pavimento en el tiempo y estimando ratios por áreas, zonas distritos, etc. Para ello se decidió crear un índice propio de la compañía Índice Roadroid o *Roadroid Index* (RI) donde se evalúa en porcentajes la clase de los segmentos de los caminos en un área delimitada generando un reporte escalado para dicha área. Un ejemplo es el área seleccionada por el polígono rojo de la **Figura 18** donde se muestra el porcentaje de segmentos con cada condición de pavimento, también debe comentarse la **Figura 19** donde se aprecia cómo se puede utilizar estos datos para el procesamiento de resultados en el tiempo.



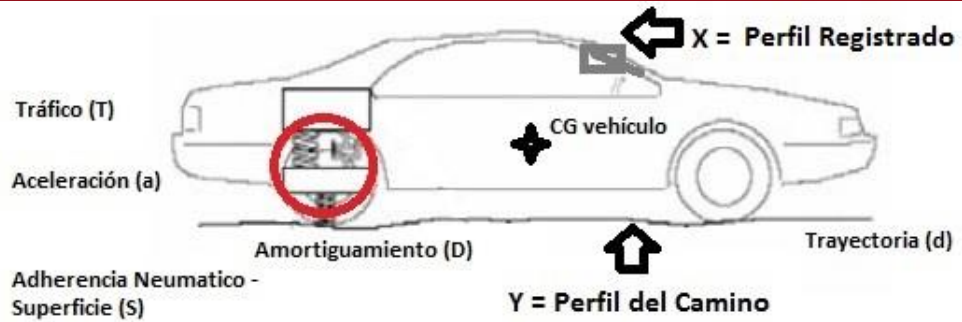
Figura 18. Índice Roadroid (Roadroid,2014(b))

Road Condition Change report Q4 - 2012										Good for Q4 minus Good for all year.					
Gävleborg				Contractor <b>NCC</b>				69,4% 15,5% 7,4% 7,8%				65,8% 14,6% 8,5% 11,0%			
Hudiksvall				1089 Km Phone 010-476 14 07				Q4 - 2012				Helår - 2012			
Road no.	Traffic	Class	Length	Comments	Good	Sat	Usat	Poor	TREND	Good	Sat	Usat	Poor	eIRI avg	
E4	14000	1	143		93,9%	4,6%	0,9%	0,5%	3,4%	97,4%	2,0%	0,4%	0,3%	1,8	
83	8300	2	167	Salt road	88,9%	7,4%	2,2%	1,5%	3,3%	85,6%	8,0%	3,2%	3,2%	2,6	
84	7500	2	210	Salt road	90,9%	6,1%	1,7%	1,3%	1,6%	92,5%	4,8%	1,6%	1,1%	2,9	
305	1200	3	105		76,7%	14,4%	5,3%	3,6%	-0,6%	77,3%	13,3%	5,2%	4,1%	4,5	
307	900	3	75		93,7%	5,2%	0,7%	0,4%	0,4%	93,3%	5,5%	0,8%	0,4%	3,7	
539	300	3	33	Gravel road						9,1%	23,2%	24,2%	43,4%	7,5	
583	1700	3	89		96,9%	2,6%	0,2%	0,3%	0,0%	96,9%	2,0%	0,6%	0,5%	2,3	
660	1850	3	64		88,6%	8,3%	0,6%	2,5%	9,1%	79,5%	9,7%	4,5%	6,3%	6,7	

Figura 19. Análisis de datos con el Índice Roadroid (Roadroid,2014(b))

### 3.5. VARIABLES DE CORRECCIÓN

Muchas dudas surgen sobre la confiabilidad de los resultados, más aún al hablar de resultados de IRI calculado de precision Clase2, sabiendo que entre el perfil real del camino (Y) y el perfil registrado para el análisis de rugosidad con la aplicación Roadroid (X) existen diversos factores que pueden alterar los resultados. Estas condiciones externas son tratadas con las diferentes configuraciones solicitadas por el programa, a continuación se detalla en un esquema las condiciones a las que se ve expuesta el programa y se explica como corrige el programa cada una de ellas:



- La Trayectoria (d) seguida por el vehículo no afectará los resultados gracias a la calibración de la posición del equipo que solicita la aplicación, la cual nos permite solo leer las variaciones en el eje Z o eje vertical.
- El Amortiguamiento (D) será corregido según el tipo de vehículo a utilizar, una configuración previa que también exige el programa.
- Si bien la Adherencia Neumático – Superficie (S) se da por la textura del pavimento, las pequeñas vibraciones podrán desviar el cálculo certero, es por ello que el programa solicita mantener altas velocidades constantes además de existir una configuración de sensibilidad capaz de contrarrestarlas.
- Las Aceleraciones (a) generan una fuerza de arranque en el punto de contacto neumático – superficie, estas fuerzas por acción y reacción afectarán al vehículo respecto a su Centro de Gravedad (CG), este vector fuerza trasladado al CG del vehículo contendrá una componente vertical y una horizontal. Es la componente Vertical la que genera alteraciones en la medición pues genera vibraciones en el eje Z percibidas por el programa, es por ello que el programa exige mantener velocidades constantes. Más adelante se presentan estudios realizados en Lima que muestran cómo influyen estos cambios en la velocidad.
- El Tráfico (T), más allá de los cambios de velocidad que representa, genera vibraciones en el vehículo donde se realiza la medición debido a factores externos como ruidos, motores de otros vehículos y más que serán registradas por el programa alterando las mediciones.

### 3.6. ACTUALIDAD CONTRACTUAL

Para entrar un poco en contexto, en el mundo de la infraestructura vial en el Perú se exigen diferentes pruebas de control en los pavimentos tanto para nuevas construcción como para concesiones viales. Entre estas pruebas de control figura como una prueba crítica la medición de la rugosidad.

En una construcción nueva el tipo de método utilizado para la medición de la rugosidad dependerá netamente de lo acordado en el contrato. Pudiendo presentar el Roadroid como una tentativa ya que por la portabilidad se podrá mantener el equipo en la obra y cualquiera sea el problema se podrán realizar nuevas mediciones.

En una concesión vial, que es la concesión de cierto tramo de una vía por una cierta cantidad de años encargada por el cliente a una empresa para la gestión y mantenimiento, se deberá entregar ensayos de rugosidad según lo especificado en el contrato de concesión. En nuestro país todas las concesiones son proporcionadas por el estado peruano, por lo que es el único cliente existente en este rubro. En todos sus contratos de concesión el estado especifica la emisión de un informe anual que debe contener, entre otros ensayos, un ensayo de rugosidad donde la vía debe encontrarse dentro de un rango establecido para evitar multas o al ser repetitivo una expropiación de la concesión. En la actualidad los contratos de las concesiones especifican que la rugosidad únicamente puede ser medida dinámicamente con perfilómetros laser.

Una concesión jamás se arriesgará a realizar un único muestreo para el informe anual emitido al cliente sin haber llevado un control y monitoreo durante el año. Así toda concesión cuenta con muestreos continuos para su gestión vial que en su gran mayoría son respecto a la variación de la rugosidad. Estos muestreos de rugosidad para la gestión de la concesión deberán buscar encontrar soluciones que se consideren confiables y económicas a la vez. Es en esta gestión vial

donde el Roadroid representa una gran alternativa de innovación con diferentes herramientas dinámicas y eficaces que se comentarán más adelante.

### 3.7. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Existen grandes diferencias entre los métodos utilizados hoy en día para calcular la rugosidad en nuestro medio y lo que nos ofrece la aplicación Roadroid. En el presente análisis buscaremos ensayar una tabla comparativa en un proyecto actual en cuanto a precios unitarios (PU), operación, mantenimiento, beneficios económicos, beneficios técnicos, otras características.

Para el análisis de precios unitarios, la compañía Roadroid presentó la siguiente cotización para la adquisición del sistema y/o dispositivo (**Figura 20**). Suponiendo el caso más crítico, que representa la adquisición del *hardware* más el *software*, por doce (12) meses, el costo será de 650 dólares, siendo un aproximado de 1950 soles.

#### Price examples – Roadroid

Cloud based systems for Roughness data and Road inventory's  
2014-12-17



Items	Demo RDC+RI app 2 months	Example 1 Inventory 12 months	Example 2 Roughness 12 months	Example 3 RIU+RDCU 12 months	Example 4 Inventory 24 months	Example 5 RIU+RDCU 36 months	Example 6 Roughness 48 months
<b>Road Inventory unit (RIU)</b> For manual/visual assessment. Logging of +100 road parameters with GPS coordinates, altitude and speed. <b>Software:</b> Installed and configured, software updates during the license period.	Download and installation at your own Android.	1	0	1	4	5	10
<b>Road data management system - Inventory (RDMS-I)</b> Login to web tool, viewing of inventory data on map. 100+ layer monitoring. Section aggregation and spatial data creator (make shape files from your data).	Uploads and login to a demo account.	1	0	1	4	5	10
<b>Roughness data collection units (RDCU):</b> <b>Hardware:</b> Android unit, including car mounting devices <b>Software:</b> Installed and configured.	No support!	0	1	1	0	5	0
<b>Road data management system – Roughness (RDMS-R)</b> Login to web tool. Viewing of data on map. Photo and layer monitoring. Polygon analyze tool, section aggregation and spatial data creator (make shape files from your data).	No hardware.	0	1	1	0	5	0
<b>Summary cost per unit/month</b>	FREE	585	650	450	200	175	190

PRICES ARE IN US DOLLAR, EXCLUSIVE OF ANY LOCAL TAXES/FEES

**Notes:**

- Prices are including data collection units include hardware with installed and configured software. Broken hardware can be replaced at a cost of 500 USD/unit.
- Updates of the data collection software and the web data management service are provided during the binding period.
- Custom support or consulting services, such as special reports or data exports, can be supplied on demand at an hourly rate.
- On-site training and workshops by our professionals can be quoted on demand.
- Prices are based on full payment at delivery. Annual payments in advance are offered at a 10% surcharge. Monthly payments are possible at 15% surcharge.

Lars Forslöf, CEO/Founder



www.roadroid.com



Figura 20. Cotización por compañía Roadroid

Para una medición de rugosidad con Perfilómetro laser, la compañía APSA presentó la siguiente cotización para el proyecto IIRSA SUR Tramo 1 a fines del año 2014 (**Figura 21**). Así se obtiene un precio total del ensayo de 18,550 dólares, siendo un aproximado de 55,650 soles.



**PROPUESTA ECONOMICA**

En la siguiente tabla se muestra el valor de los trabajos requeridos.

**PROPUESTA TÉCNICO - ECONOMICA APSA PE 14-059P-02**

CLIENTE : CONCAR  
 CONTRAPARTE : ING. ELVA BENGOA  
 PROYECTO : IIRSA SUR TRAMO 1  
 FECHA : SEPTIEMBRE 2014

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Total \$US
1.000	Evaluación de Rugosidad (IRI)	Km Calzada	657.00	18,550.00
2.000	Evaluación de Retroreflectividad de la señalización Vertical y Horizontal	Km Calzada	71.00	17,700.00
3.000	Evaluación Estructural con Deflectómetro de Impacto FWD	Km Calzada	657.00	112,300.00
<b>SUBTOTAL</b>				<b>\$ USD/. 148,550.00</b>
(I.G.V : 18%)				<b>26,739.00</b>
<b>TOTAL PRESUPUESTADO</b>				<b>\$ USD/. 175,289.00</b>

Figura 21. Cotización por APSA Gestión de Infraestructura

Para evaluar los precios unitarios y comparar ambas cotizaciones se debe tener en cuenta la característica del proyecto: IIRSA Sur Tramo 1 cuenta con una extensión de 657 km y se ubica en

Tabla 3: PU de Rugosidad con Perfilómetro Laser

IIRSA SUR Tramo 1	Perfilómetro Laser
<b>PU (Soles/km)</b>	<b>84.70</b>

Tabla 4: PU de Rugosidad con Roadroid

Método Propuesto	Roadroid	Unidad
Velocidad Muestreo	50	km/h
Horas de muestreo	13.14	h
Días de muestreo	2	días
Días de traslados	2	días

IIRSA SUR Tramo 1	Especificación	Unidad	Cantidad	Parcial	Total
Equipo	1 unidad + 1 usuario	Und.	1.0	1950.00	1950.00
Gasolina	Medición	km	657.0	0.50	328.50
Personal Medición	Ingeniero Senior A	Hh	32.0	117.99	3775.68
Trabajo Gabinete	Ingeniero Senior A	Hh	8.0	117.99	943.92
Traslados	524 km (Marcona)	km	524.0	0.50	262.00
Alquiler Vehículo	4 días	Día	4.0	303.03	1212.12
Viáticos	2 personas, 4 días	Día	8.0	170.00	1360.00
				Total	9832.22
				<b>PU (Soles/km)</b>	<b>14.97</b>

Para el proyecto vial IIRSA SUR Tramo 1, se tendrá una diferencia de costos unitarios para Rugosidad de 14.97 nuevos soles, con la aplicación Roadroid, contra el 84.70, cotizada por APSA, encontrando un margen de positivo de rentabilidad de 82.3%. Dentro de este margen se deberá introducir la utilidad y la contingencia de la actividad.

Ambos métodos presentan equipos totalmente diferentes, con diferentes características y beneficios que son resumidas a continuación:

Tabla 5: Características Perfilómetro Láser versus Roadroid

	<b>Perfilómetro Láser</b>	<b>Roadroid</b>
<b>PU (IIRSA SUR)</b>	84.7	14.97
<b>Rendimiento</b>	80 - 100 km/h	60 - 90 km/h
<b>Resultados</b>	El trabajo de ubicación de coordenadas no se puede trabajar directamente. Unas computadoras ubicadas en el vehículo se encuentran conectadas a los dispositivos laser registrando los resultados a través de un software específico	Los resultados son ubicados a través de coordenadas GPS y son rápidamente trabajables
<b>Mantenimiento</b>	Costo de mantenimiento del vehículo y del equipo laser	No es Considerable
<b>Almacenamiento</b>	Costo de almacenamiento techado	No es Considerable
<b>Margen de Error</b>	Costoso, al repetir la prueba se deberá trasladar el equipo (pesado y costoso) nuevamente al proyecto	El precio de la aplicación evaluado es por año, lo que nos permite realizar no solo nuevos muestreos en caso de modificaciones sin mayor costo, sino también poder realizar estudios en otros proyectos sin mayores costos de equipo

## Capítulo 4: MANUAL DE USO Y APLICACIÓN DEL PROGRAMA

A continuación se proporciona una breve descripción y crítica, con base en la experiencia luego de haber trabajado con el programa, de todos los pasos a seguir para una aplicación profesional del Roadroid. El manual del que se basa este capítulo fue publicado en el 2014 y puede ser descargado de la página web de la compañía sin restricción alguna. ([www.roadroid.com](http://www.roadroid.com))

### 4.1. RECOPIACIÓN DE DATOS

Para poder realizar mediciones con un teléfono inteligente debemos haber comprado e instalado la aplicación en el celular. Es importante que luego de esta compra se registre el teléfono en el usuario Roadroid con el número IMEI. Una vez realizado el registro el celular estará conectado al usuario de manera que ninguna muestra se pueda perder.

Para colocar el teléfono en el vehículo de manera correcta se deben seguir los siguientes pasos:

- Instale el sujetador del teléfono en la ventana delantera del vehículo y ubíquelo de modo que sea fácil de alcanzar.
- Asegúrese de que la conexión teléfono – sujetador – parabrisas sea rígida y segura.
- Coloque el teléfono lo más recto posible, la posición horizontal es a menudo la más adecuada para el uso de la función foto-GPS
- Para confirmar si la instalación es correcta, inicie la cámara y verifique que esta posee una buena posición.

Una vez instalado el equipo, se debe iniciar la aplicación en el dispositivo elegido en tres simples pasos como se muestran en la **Figura 22**.

Como primer paso (1), se debe seleccionar el icono del Roadroid para iniciar la aplicación en el dispositivo. Paso siguiente (2), se debe aceptar los ajustes oprimiendo el recuadro “Ok”; y por último, como paso tres (3), se debe ajustar el teléfono en X, Y y Z hasta que las tolerancias muestren en color verde que la orientación es correcta y se pueda presionar el recuadro “Ok”, también en color verde.

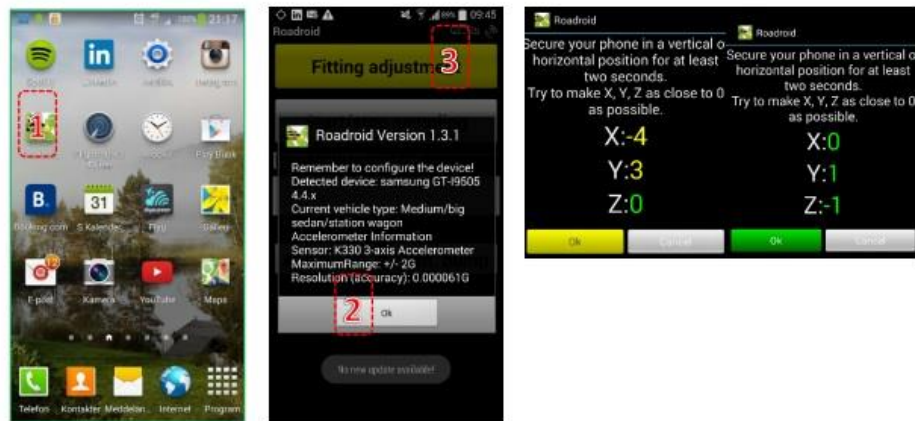


Figura 22. Calibración inicial del Roadroid (Roadroid,2014(a))

En la **Figura 23** se muestra la ventana principal (*display*) de la aplicación Roadroid, como también la descripción de cada uno de los iconos y herramientas con los que cuenta un teléfono inteligente típico al utilizar esta.

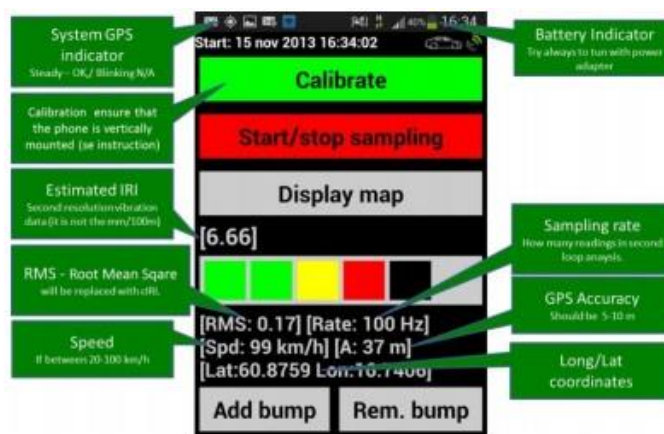


Figura 23. *Display* principal ROADROID (Roadroid,2014(a))

Para poder dar inicio a la toma de una muestra la señal GPS del celular debe estar disponible y con señal, así se tendrá acceso al botón “*Start/stop ampling*”, inicialmente en color gris, que al presionarlo cambiará automática y de manera inmediata a color rojo, dando inicio a la toma de la muestra. Para detener el muestreo se deberá volver a presionar el mismo comando.

Se recomienda tener un plan de ejecución del muestreo, dado que se deberá dar inicio al programa una vez alcanzada la velocidad a la que se ha planeado la toma de datos y se deberá buscar no realizar cambios bruscos de velocidad. Como se mencionó anteriormente, para un estimado (eIRI) confiable se debe seguir velocidades entre 20 y 80 km/h, en el caso de buscar calcular el IRI (cIRI) de manera que la muestra sea confiable el rango se acorta a tener que estar entre 60 y 80 km/h.

Los cambios de velocidad generan un error no uniforme en las muestras tomadas, aumentando o disminuyendo los valores de rugosidad calculados respecto a los que son en realidad. Cada alteración tiene una explicación física, como se detalla a continuación:

- La disminución en la rugosidad calculada respecto a la real se dará principalmente por la aceleración del vehículo. Por la segunda ley de Newton se conoce que debido a la masa y la aceleración de un vehículo se generará una fuerza, esta fuerza se genera entre el eje de tracción y la superficie de rodadura, que al trasladarse al centro de gravedad del vehículo se descompondrá en una fuerza en el eje horizontal como una en el eje vertical. Es esta fuerza en el eje vertical la que generara un intento de levitación en el vehículo disminuyendo las amplitudes de las vibraciones verticales en el vehículo debido a la rugosidad, alterando los resultados que el dispositivo con el Roadroid pueda registrar.
- En cuanto al aumento de la rugosidad calculada respecto a la real, se da pues a velocidades muy bajas la influencia de vibraciones

externas serán captadas por la aplicación, por ejemplo la vibración de otros vehículos, del propio motor o incluso de parlantes por música a altos decibeles generaba en vibraciones en el vehículo.

La medición de la rugosidad siempre se podrá dar en dos posibles escenarios: En una nueva vía o en una vía ya en funcionamiento. En una nueva vía, la rugosidad siempre debe ser un parámetro de control de calidad para que el proyecto pueda ser aprobado según lo acordado en el contrato entre cliente-constructor. En este caso será mucho más fácil la aplicación del Roadroid pues estamos hablando de una vía que aún no se encuentra en servicio por lo que no existirán vehículos circulando que impidan mantener una velocidad constante al momento del muestreo. Para una vía existente, se debe contar con un plan estratégico para la medición a velocidad constante debido a los vehículos en circulación, en estas vías se podrá llevar un historial de mediciones de rugosidad para gestionar el mantenimiento como se explicó anteriormente. (**Figura 15**)

Nunca olvidar que, como se mencionó anteriormente, el cIRI posee variables para el análisis como el tipo de vehículo, la sensibilidad del vehículo y la longitud de los segmentos; que deben ser previamente modificados según las características de cada muestreo. Para realizar esta configuración se deberá presionar el botón menú de opciones de Android, en el cual debemos entrar a “*Settings*” o configuración para ver y/o modificar las características del muestreo antes mencionadas. Ver **Figura 24**.

Cuando se detiene la recolección se anunciará que la muestra fue guardada con un nombre, este será por defecto, la fecha y hora que aparecían en el dispositivo al realizar las mediciones para poder llevar un buen control de las muestras realizadas.

## 4.2. CARGAR DATOS

Para poder cargar los datos tomados en campo al usuario Roadroid al cual se afilio el dispositivo (muestras de rugosidad y/o fotografías), es necesario que el teléfono cuente con conexión de datos móviles o WIFI. Una vez conectado, será posible realizar los tres simples pasos que se muestran a continuación en la **Figura 24**.

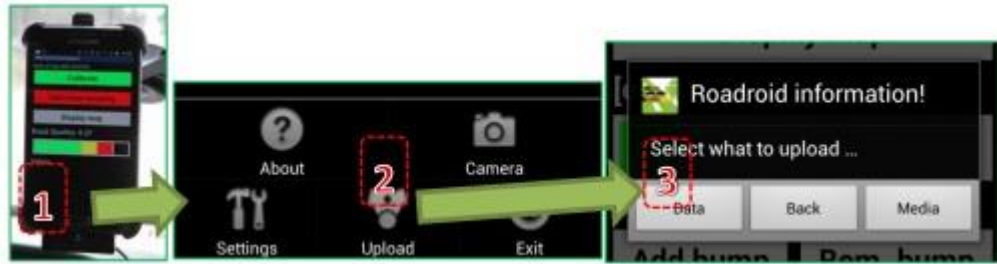


Figura 24. Cargar las muestras del dispositivo al usuario web (Roadroid,2014(a))

Primero (1) se debe presionar el menú de opciones de Android, el cual nos permitirá ver las opciones de la aplicación en la que nos encontramos, en este caso Roadroid. Como segundo paso (2), se debe seleccionar el ícono “*Upload*”; para luego, como paso tres (3), seleccionar entre los botones “*Data*” para subir datos de rugosidad o “*Media*” para subir imágenes al usuario de la web.

Una vez que se inicia la transferencia de datos, se subirán al usuario todas las muestras guardadas hasta el momento en el dispositivo en cada una de las opciones “*Data*” o “*Media*” que aún no hayan sido transferidas. Se mostrará una ventana con el avance de la transferencia de datos a la web, cuando llegue al cien por ciento de los datos saldrá un mensaje de éxito en la ventana del dispositivo. Para tener una referencia, los archivos de rugosidad pesan como máximo 300Kb cada archivo, mientras que las imágenes pueden llegar a pesar hasta 2Mb.

Si existe algún error, no debe existir preocupación alguna pues ningún archivo es trasladado a la papelera del dispositivo hasta que no se

llegue a subir con éxito en el usuario web, la función lo intentara de nuevo la próxima vez que se ejecute la función. Se debe resaltar que también se pueden mover los datos de forma manual de la memoria del teléfono a cualquier máquina para ser trasferida por correo o subida posteriormente.

### 4.3. VER LOS DATOS EN EL MAPA DE INTERNET

Una vez subidos los archivos con éxito, estos podrán ser visualizados en el usuario Roadroid en un plazo de tiempo no mayor a una hora.

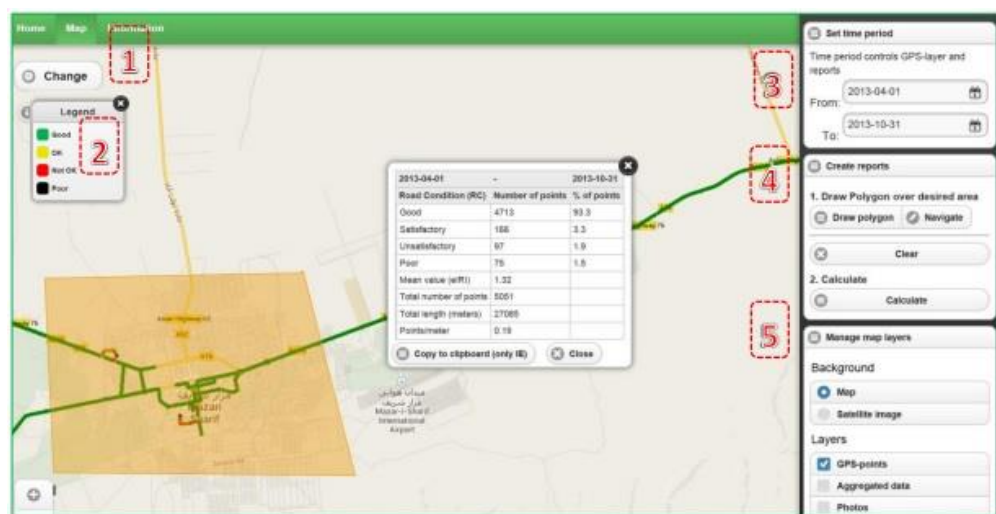


Figura 25. Vista de mapa de un usuario ROADROID (Roadroid,2014(a))

Ya dentro del usuario, existe una pestaña “Map” (1) o Mapa la cual muestra, con el respaldo del servidor *google maps*, diferentes opciones de visualización de las muestras subidas (**Figura 25**). Estas opciones de visualización puede ser modificadas desde “Manage map layers” (5) que permiten modificar las visualizaciones en el mapa: en “Background” o fondo se puede apreciar los caminos conocidos por el mapa (“map”) o la imagen satelital de la locación (“Satellite image”), en “Layers” se puede precisar las capas que se desean proyectar sobre el mapa como los puntos GPS (“GPS-points”), las muestras añadidas (“Aggregated data”) y las fotos (“Photos”). Como todo mapa cuenta con una leyenda (2), que en este caso muestra en colores el estado de cada segmento según su rugosidad.

Para crear reportes, “*Create reports*” (4), se presenta la herramienta dibujar polígono (“*Draw polygon*”) la cual permite evaluar todos los segmentos evaluados dentro de un área que se delimita haciendo clic donde se quiere ubicar cada vértice y doble clic para cerrar automáticamente la figura, quedando el área sombreada en color naranja como se observa en la **figura 25**. Una vez con el área delimitada, se debe presionar “*Calculate*” o calcular para obtener un resumen de la rugosidad de todos los segmentos evaluados dentro de esta.

Existe también la opción “*Set time period*” (3) o filtro de tiempo que permite mostrar solo las mediciones realizadas en un rango de tiempo, algo muy útil si se quiere comparar la variación de la rugosidad en el tiempo o si no se quiere evaluar muestras que se superponen en cierta área.

Para visualizar las imágenes tomadas se debe dar clic al símbolo en negro de una pequeña cámara que aparecerá en la ubicación donde cada una fue realizada. Un ejemplo se puede apreciar en la **Figura 26**.

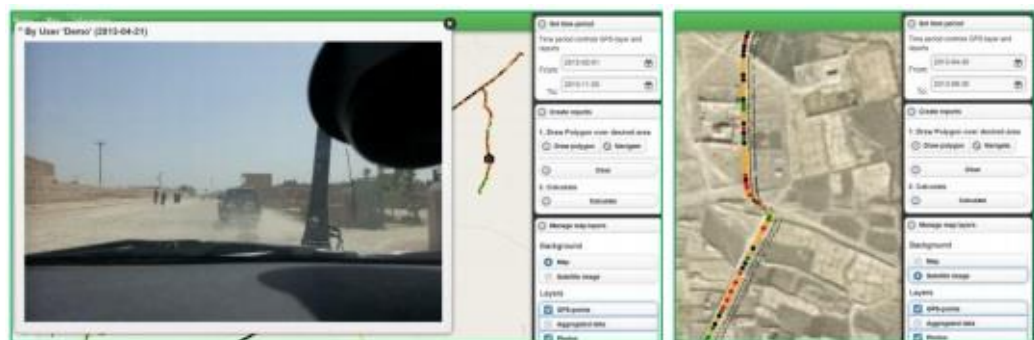
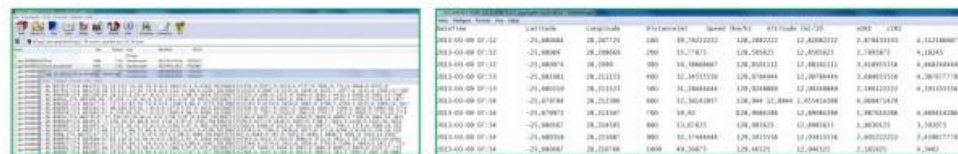


Figura 26. Herramientas alternativas dentro de la vista de mapa (Roadroid,2014(a))

Si se cuenta con una base de datos de una vía y un record de velocidades se podrán crear perfiles de monitoreo de velocidad donde se podrá evaluar la condición del camino según la capacidad de mantener la velocidad de los vehículos (verde > 70 km/h, amarillo 50-70 km/h, rojo 30-50 km/h, negro < 30 km/h).

#### 4.4. DESCARGAR LOS DATOS EN FORMATO DE TEXTO

El dispositivo según su frecuencia de muestreo tomara datos por segundo, lo que significa que la distancia entre datos dependerá de la velocidad a la que se esté yendo. Sin embargo, para realizar estudios es más beneficioso tener datos promedios por secciones fijas por lo que Roadroid genera promedios por segmentos de longitud previamente establecida.



Left: Raw decrypted data in one row per second. Right: Aggregated data in 100 meter sections.

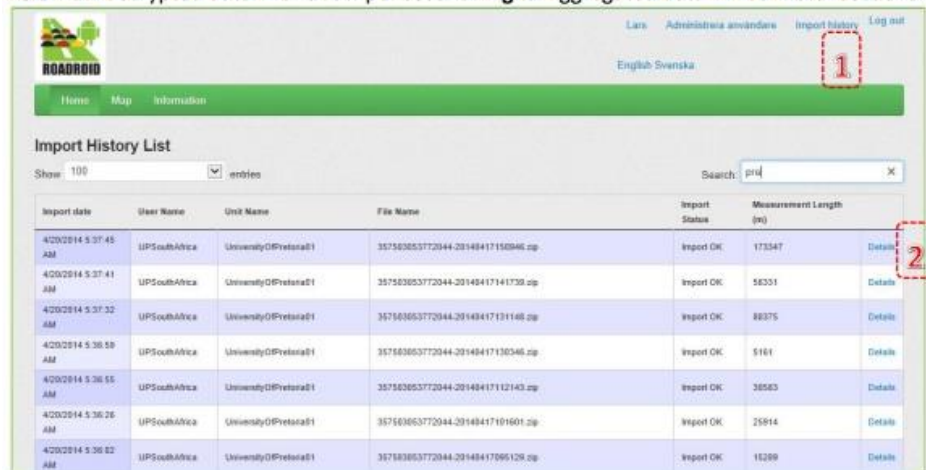


Figura 27. Vista de *home* de un usuario ROADROID (Roadroid,2014(a))

En la página principal de cada usuario, “Home”, se apreciará un hipervínculo en la parte superior derecha “Import History” (1) el cual nos llevará a un listado con todas las muestras subidas por los dispositivos afiliados a este, como se observa en la **Figura 27**. Estas muestras pueden ser descargadas fácilmente en formato de texto (.txt) haciéndose trabajables en diferentes programas, el más utilizado Excel.

En cada muestra se puede presionar “Details” (2) o detalles para llevarnos a una ventana con toda la información respecto a ella como: Nombre, tiempo de inicio y fin, entre otros. Algo similar a la **Figura 28**.



Figura 28. Opciones de una muestra (Roadroid,2014(a))

Una vez en los detalles de un archivo, se podrá generar el archivo en formato de texto presionando “*Generate aggregate files*” (3) según la longitud previamente establecida, como también se podrá mostrar la ubicación de las coordenadas de inicio y fin de medición de este archivo únicamente en mapas presionando el hipervínculo “*Show measurement start and end points in Google Maps*” (4).

#### 4.5. HACER GRÁFICOS DE SEGMENTOS EN EXCEL

Luego de obtener los datos de rugosidad para una muestra en formato de texto, este podrá ser muy fácilmente trasladado a Excel, ya sea jalado desde Excel importando texto o copiando todos los datos y pegándolos en una hoja de cálculo. El archivo de texto presenta una tabla generada para cada segmento con las siguientes columnas: Fecha y Hora, Latitud, Longitud, Distancia (m), Velocidad (km/h), Altura (m), eIRI y cIRI.

Una vez pegados o importados los datos a la hoja de cálculo de Excel, se pueden comenzar a hacer gráficos y comparaciones. Un ejemplo se puede apreciar en la **Figura 29**.

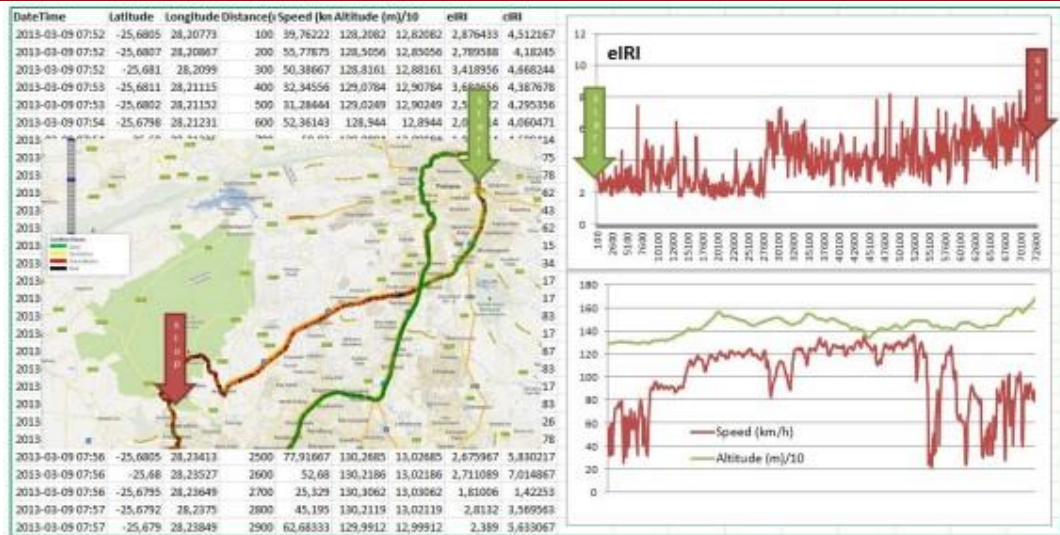


Figura 29. Aplicaciones con los datos en formato de texto (Roadroid,2014(a))

## Capítulo 5: METODOLOGÍA DE MUESTREO

### 5.1. PLAN DE RECOPIACIÓN DE DATOS

Siguiendo el objetivo presentado al inicio de esta tesis, luego de haber planteado: el marco teórico respecto a rugosidad, la norma que la rige en nuestro país y como utilizar profesionalmente la herramienta Roadroid; el paso siguiente será realizar diversos muestreos con el programa Roadroid en pavimentos de la ciudad de Lima con la idea de concluir respecto a las hipótesis planteadas desde el inicio de la investigación.

El primer análisis, que surgió como una duda por los requisitos de la norma técnica peruana CE.010, es la medición de la única vía expresa que posee la ciudad para analizar si se cumple con lo estipulado en la norma, la cual solo impone un límite superior en este tipo de vías con un máximo de 2.5 m/km de rugosidad.

La siguiente aplicación del programa, de acuerdo a las hipótesis planteadas, será para analizar cómo afecta la influencia del tráfico en las mediciones. Como se comentó anteriormente en el manual del programa se debe buscar conservar la velocidad constante algo a lo que el tráfico se opone generando constantes desaceleración y aceleraciones. Para ello, se realizarán dos muestreos en la avenida Petit Thouars: uno en la madrugada manteniendo una velocidad constante y el segundo en la hora en que la saturación por tráfico es máxima para generar la mayor cantidad de cambios de velocidad posibles.

El tercer análisis buscará observar cómo va cambiando la rugosidad en diferentes distritos de la capital, para ello se optó por dos vías arteriales que crucen diversos distritos. Esta elección se dio para que la comparación de rugosidad pueda ser válida, pues son vías que se diseñaron con la misma estructura de pavimento y con los mismos materiales. Las arterias seleccionadas para el análisis serán la

avenida Arequipa (dos sentidos) y la avenida Petit Thouars (un único sentido), pues ambas cruzan los distritos de Miraflores, San Isidro, Lince y Cercado de Lima. Otra razón por la que se eligió ambas avenidas es por la sincronización de semáforos que poseen, haciendo posible mantener una velocidad constante, sobre todo si se realiza en horas de la madrugada donde la saturación de la vía es casi cero.

Debemos resaltar que, como ya se comentó, la veracidad de esta herramienta no solo ya ha sido verificada, testeada en diferentes estudios y comparada con diferentes herramientas siendo totalmente confiable, sino que es una herramienta que se utiliza actualmente en diferentes proyectos alrededor del mundo y que viene siendo propuesta en diferentes congresos asociados a transporte y movilidad. Es por ello que con esta tesis no buscamos demostrar la veracidad y confiabilidad de sus resultados, sino presentarla y aplicarla en Lima para dar respuesta a algunas hipótesis demostrando lo sencillo y rápido que puede ser el uso de esta aplicación para obtener rugosidades en pavimentos urbanos.

## 5.2. MUESTREO

Para los diferentes muestreos se utilizó un vehículo sedán, considerado para la aplicación del Roadroid como un vehículo mediano según sus 4 configuraciones.



Figura 30. Vehículo utilizado para la medición

El equipo utilizado fue el teléfono inteligente de modelo Samsung Galaxy SIII plus GT I9105P y con un sujetador de la misma marca para asegurar una adherencia a chasis confiable, este fue prestado para investigaciones por la misma compañía Roadroid al área de Movilidad y Transporte de la Pontificia Universidad Católica del Perú. El equipo que se puede apreciar en la **Figura 31**.



Figura 31. Dispositivo utilizado para la medición

Lo primero que se configuró en cada muestreo fue la calibración del dispositivo dada su colocación en el sujetador. Esta se da para que el dispositivo reconozca su ubicación respecto al plano vertical siendo este el único eje en el que se desean medir las vibraciones, esta calibración debe darse cada vez que se mueva el dispositivo del sujetador para que reconozca su orientación respecto al eje Z. Un ejemplo de esta se puede apreciar en la **Figura 32**.



Figura 32. Calibración para una de las mediciones

Para facilidad de la toma de datos, se recomienda tener un equipo de dos personas para que uno, el encargado de conducir, se preocupe únicamente por mantener la velocidad constante mientras que el otro se encargue del manejar el dispositivo dando inicio y fin a los registros cuando se desee, como también pudiendo tomar fotos a lo largo del trayecto de la muestra.

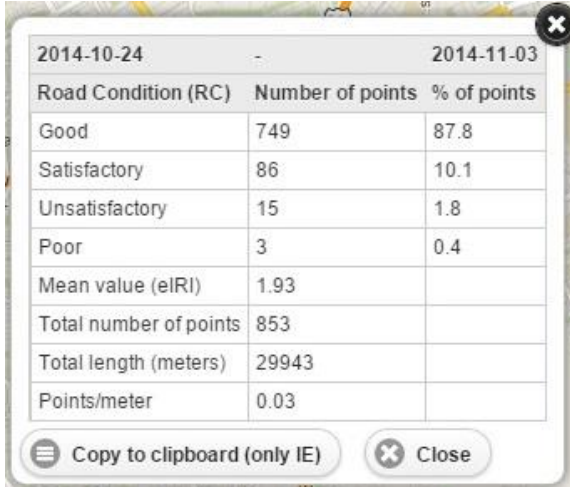
## Capítulo 6: RESULTADOS

### 6.1. MUESTREO VÍA EXPRESA

Para hacer una verificación si la única vía expresa en Lima cumple con el límite impuesto por la norma peruana de pavimentos urbanos, se realizó un ensayo con la aplicación Roadroid en ambos sentidos de la vía, en las direcciones de sur a norte y de norte a sur.

Estas muestras se tomaron siguiendo las consideraciones para el uso profesional y de manera confiable del Roadroid en pavimentos de asfalto: vehículo mediano, mantener una velocidad de alrededor de 80 km/h y longitud de tramo de registro de 40 m.

Para hacer una verificación rápida se utilizó también la herramienta del análisis de un área poligonal que tomaba toda la vía expresa (**Anexo 1**). Se obtuvieron los siguientes resultados:



2014-10-24		2014-11-03	
Road Condition (RC)	Number of points	% of points	
Good	749	87.8	
Satisfactory	86	10.1	
Unsatisfactory	15	1.8	
Poor	3	0.4	
Mean value (eIRI)	1.93		
Total number of points	853		
Total length (meters)	29943		
Points/meter	0.03		

Figura 33. Mediciones para la vía expresa

Como se mencionó con anterioridad, en cuanto al uso y aplicación del programa para el cálculo del IRI calculado, el Roadroid permite obtener los resultados en formato digital con lo que se trabajó una hoja de cálculo. En este caso se realizó una tabla dinámica con ambas muestras en la vía expresa ordenando de mayor a menor el IRI calculado de cada segmento. La tabla dinámica se puede en el

**Anexo 2.** A continuación se puede resumir todo lo concerniente a la rugosidad calculada de la vía expresa en la siguiente tabla.

Tabla 6: Cálculos vía expresa

cIRI promedio	1.90 m/km	
	N° Tramos	Porcentaje
Tramos IRI menor a 2.5 m/km	140.00	95.24%
Tramos IRI mayor a 2.5 m/km	7.00	4.76%
Total	147	100%

## 6.2. MUESTREO COMPARATIVO EN DISTRITOS DE LIMA

El aumento de la rugosidad en el tiempo respecto al diseño inicial representa el deterioro o desgaste propio de toda vía, este aumento se puede dar por un desgaste de la superficie de rodadura o por diversos tipos de falla tanto en la superficie como en cualquier otra de las capas de la estructura del pavimento inicialmente diseñado. Así, al analizar una vía con un mismo tipo de superficie de rodadura a lo largo de toda su extensión, podremos evaluar las zonas que se encuentren en mejores o peores condiciones calculando la rugosidad actual, es por ello que decimos comparar la rugosidad en diferentes distritos a lo largo de una misma arteria que los cruce, dado que toda esta fue diseñada con la misma estructura de pavimento.

Para hacer posible la comparación de la rugosidad en los diferentes distritos penetrados por las arterias ensayadas, se por partió de delimitar los distritos que estas cruzan. En la **Figura 34** se muestran los límites de los distritos en Lima alrededor de estas avenidas seleccionadas: Arequipa y Petit Thouars.



Figura 34. Límites distritales en la ciudad de Lima

(<https://maps.google.es/maps/ms?ie=UTF8&vpsrc=0&t=h&oe=UTF8&msa=0&msid=213718400943821212339.0004a5760a072d1bdf40e&dg=feature,2014>)

En las gráficas presentadas en el **Anexo 3** se puede observar cómo se halló el IRI estimado en el caso de cada distrito utilizando la herramienta de análisis en un área poligonal, la cual se explicó con el punto 3 del manual de uso y aplicación del programa. El resumen de los eIRI hallados con esta herramienta se muestra en las tablas expuestas a continuación:

- La avenida Arequipa cuenta a lo largo de toda su extensión cuenta con un único tipo de superficie de rodadura con mezcla de asfalto en caliente. Por lo que a mayor rugosidad nos hablará de un mayor deterioro en la vía. En el distrito de Miraflores no se encuentra punto alguno en condición pobre lo que nos puede hablar de un desgaste pero no de fallas en la superficie de rodadura. Según percepción propia, el trayecto más confortable para manejar. **Tabla 7**

Tabla 7: IRI estimado Avenida Arequipa

Av. Arequipa	eIRI (m/km)	No			
		Bueno	Satisfactorio	Satisfactorio	Pobre
Miraflores	1.87	89.60%	8.50%	1.90%	0.00%
San Isidro	2.14	82.40%	10.40%	4.50%	2.70%
Lince	1.86	92.00%	5.90%	0.40%	1.70%
Cercado Lima	1.89	88.90%	8.90%	1.80%	0.40%

- En la avenida Petit Thouars la superficie de rodadura en los distritos de Lince y Cercado de Lima ha sido recientemente modificada a una superficie rígida de concreto armado, siendo la anterior una superficie flexible de mezcla de asfalto en caliente que sigue vigente en los distritos de San Isidro y Miraflores. En los distritos donde el pavimento se ha cambiado de flexible a rígido (Lince y Cercado de Lima) se puede verificar con lo medido lo confortable que resulta el trayecto pues alrededor de un 93.5% se encuentra con buenas condiciones y un 99% en condiciones buenas o satisfactorias. **Tabla 8**

Tabla 8: IRI estimado Avenida Petit Thouars

Av. Petit Thouars	eIRI (m/km)	No			
		Bueno	Satisfactorio	Satisfactorio	Pobre
Miraflores	1.90	85.10%	11.50%	2.80%	0.70%
San Isidro	1.82	90.70%	7.30%	1.20%	0.80%
Lince	1.73	94.80%	3.90%	0.90%	0.40%
Cercado Lima	1.74	91.90%	7.20%	1.00%	0.00%

- Para ambas avenidas se realizó con comparación pese a que, por el cambio de superficie de rodadura ya comentado en la avenida Petit Thouars, esta no será del todo válida. La comparación de ambas avenidas nos dará más una imagen general del confort en

las avenidas que una comparación válida del deterioro en las avenidas. **Tabla 9**

Tabla 9: IRI estimado ambas Avenidas

Global	eIRI (m/km)	No			
		Bueno	Satisfactorio	Satisfactorio	Pobre
Miraflores	1.89	87.30%	10.00%	2.30%	0.40%
San Isidro	1.97	86.80%	8.70%	2.80%	1.70%
Lince	1.80	93.40%	4.90%	0.60%	1.10%
Cercado Lima	1.81	90.50%	8.00%	1.40%	0.20%

### 6.3. INFLUENCIA DEL TRÁFICO EN EL MUESTREO

Como se comentó, respecto al uso profesional del Roadroid, las muestras deben ser tomadas a una velocidad constante. Una duda que surgió al elegir este tema de investigación fue que tanto podía influir la medición en el tráfico de la ciudad de Lima donde, a diferencia de mantener una velocidad constante, se puede experimentar continuas pausas y cambios de velocidad, es decir aceleraciones importantes.

En los adjuntos, **Anexo 4** y **Anexo 5**, se pueden observar las mediciones realizadas con la aplicación para teléfonos móviles en la avenida Petit Thouars con tráfico intenso y una realizada a velocidad constante respectivamente. Así mismo se adjunta en el **Anexo 6** una tabla de comparación entre los eIRI y cIRI de ambas muestras. Con las muestras anteriores se realizó un resumen comparativo entre ambas muestras que se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 10: Cálculos comparativos entre mediciones con tráfico y sin tráfico

	<b>eIRI promedio (m/km)</b>	<b>cIRI promedio (m/km)</b>	<b>Duración (min)</b>	<b>Velocidad (km/h)</b>
<b>Tráfico</b>	1.78	1.20	23	33.1
<b>Sin Tráfico</b>	1.93	1.37	9	38.2
<b>Coefficiente de correlación eIRI</b>		<b>0.161</b>		
<b>Coefficiente de correlación cIRI</b>		<b>0.079</b>		



Gráfica de comparación de IRI estimado

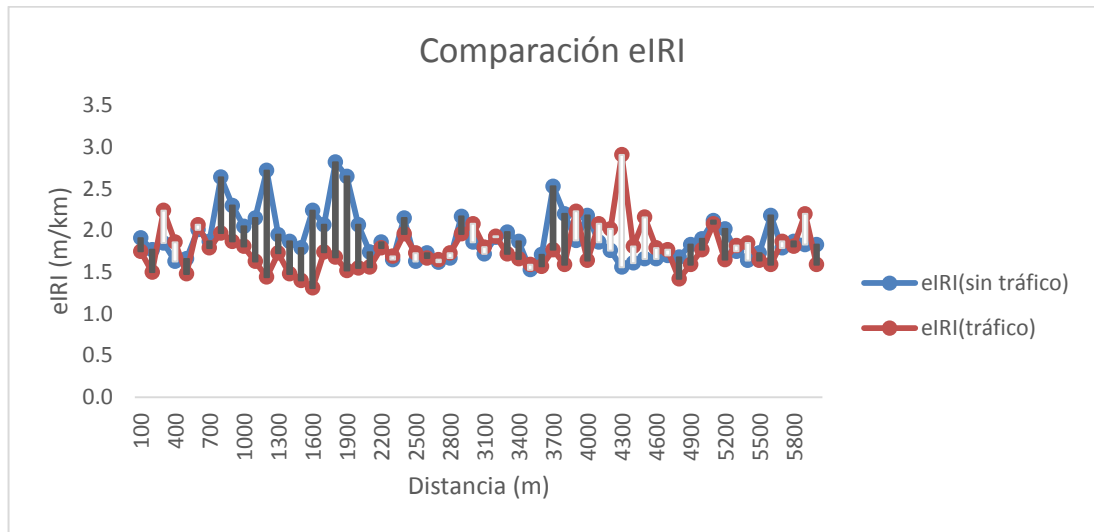


Figura 35. Grafica eIRI vs. Distancia

Gráfica de comparación de IRI calculado

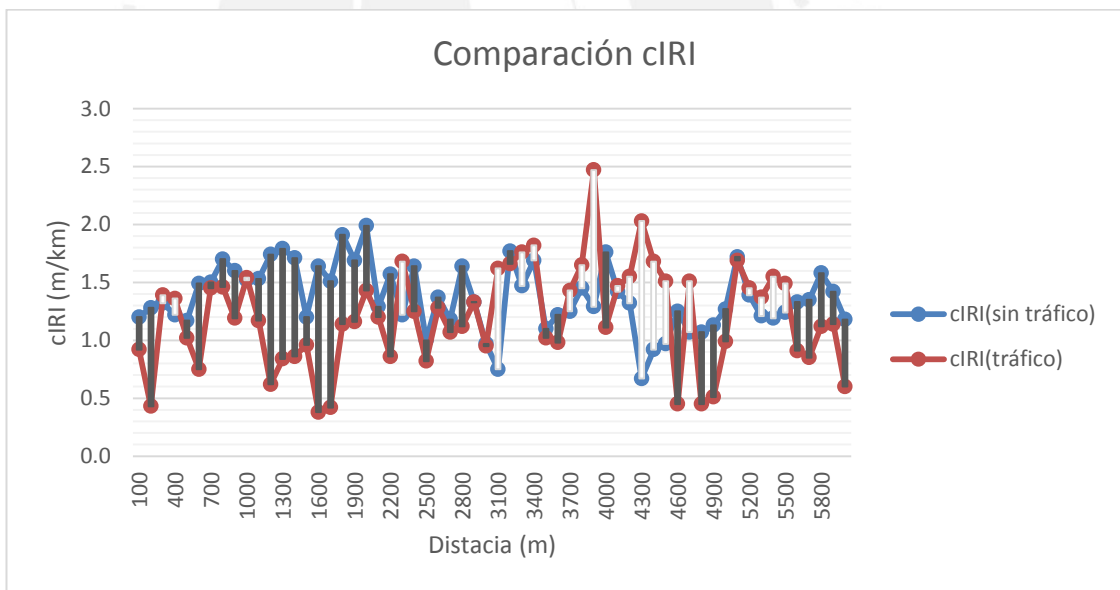


Figura 36. Grafica cIRI vs. Distancia

## Capítulo 7: CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- Respecto a la **norma peruana para pavimentos urbanos CE.010** podemos concluir que es totalmente flexible en cuanto al control de rugosidad. **Solo estipula un límite máximo objetivo para vías expresas de 2.5 m/km**, más allá de este caso particular no estipula ningún límite proponiendo que la rugosidad de un pavimento debe ser pactada entre el cliente y el constructor.
- Sobre el diseño de la aplicación, podemos concluir que cuenta con diferentes **factores de corrección para los ruidos que pueden alterar los resultados de IRI calculado, estas correcciones dependen de las configuraciones iniciales y las recomendaciones de muestreo**. Para la obtención del IRI estimado estas configuraciones iniciales no corregirán los resultados, sino que se calcula usando una ecuación de correlación lineal. Se deberá tener especial cuidado en pavimentos con macrotexturas dado que esta puede alterar los resultados.

Tabla 11: Características eIRI y cIRI

Variables	eIRI	cIRI
Velocidad(km/h)	20 – 80	60 – 80
Configuración del móvil	No afecta	Afecta
Textura	Afecta	No afecta
Confiabilidad	Clase 3	Clase 2

- Al estudiar las restricciones que presentan los contratos en la actualidad de la infraestructura peruana respecto a rugosidad, podemos concluir que **Roadroid se presenta como una alternativa muy favorable para la gestión vial pues permite llevar un control de variación de la rugosidad en el tiempo muy dinámico que podrá ayudar a la toma de decisiones de cuando y donde intervenir una vía**. Para construcciones nuevas dependerá del visto bueno del cliente.
- Económicamente, podemos concluir que tras una comparación de un proyecto vigente en precios unitarios, **el uso de**

**Roadroid respecto al de un perfilómetro laser, puede llegar a representar un ahorro del 82.3% a favor**, esto sin contar la utilidad y contingencia de la actividad.

- Ya entrando a cuestionar las hipótesis planteadas al inicio podemos, podemos presentar como primera conclusión que, **se cumple con la norma peruana de pavimentos urbanos CE.010 de rugosidad menor a 2.5 m/km en la vía expresa de Lima en un 95.24% de los tramos analizados, con una rugosidad promedio en cIRI de 1.90 m/km**. Solo 7 de los 147 segmentos analizados (4.76%) cuentan con cIRI mayor a 2.5 m/km. Por los resultados obtenidos podemos comentar que pese a la falta de mantenimiento en la vía durante muchos años, se conserva en buen estado por tratarse de un pavimento rígido y una demanda de cargas únicamente de automóviles.
- Basándonos en el mismo ensayo realizado en la vía expresa, podemos concluir una segunda hipótesis. **Al comparar el cIRI de 1.90 m/km y eIRI de 1.93 m/km respectivamente, podemos afirmar que la variación entre ellos es de un 1.6%**, verificando que Lima al presentar pavimentos con texturas muy finas (micro) la variación entre dos muestras confiables de IRI estimado y calculado deberían ser mínimas. Además, evaluando los resultados de cada tramo (anexo 2), se halló una correlación de 0.412.
- Para concluir respecto a la influencia del tráfico, podemos utilizar la correlación entre muestras con y sin tráfico las cuales comparamos bajo el índice de correlación de Pearson:

Tabla 12: Correlación de muestras con y sin tráfico

	eIRI	cIRI
Índice de correlación	0.161	0.079

Pudiendo concluir de estos que, debido a sus resultados cercanos a cero, Pearson nos dice que **no existe relación**

**lineal alguna entre las muestras siendo totalmente dispersas.** Como comentario advertir de lo influyente que puede ser el tráfico en las mediciones, alterando totalmente los valores reales de rugosidad debido a diversos factores anteriormente comentadas en el capítulo 4, por ello la importancia de un plan estratégico para mantener condiciones de velocidad constante durante el muestreo.

- Acerca de la comparación de la rugosidad a lo largo de arterias principales respecto a cada uno de los distritos que estas cruzan, podemos concluir en primer lugar que **la comparación no es totalmente valida en la avenida Petit Thouars dado que cambia la estructura del pavimento de flexible a rígido a lo largo de su desarrollo (tabla 4). En la avenida Arequipa el distrito con mayor deterioro en su pavimento es el de San Isidro con elIRI de 2.14 m/km**, marcando una diferencia respecto a los tres distritos restantes que presentan rugosidades muy similares con 1.86, 1.87 y 1.89 m/km (tabla 5). En general podemos concluir que el distrito donde ambas avenidas se encuentran en peor estado es San Isidro (tabla 6), esto no es responsabilidad del distrito dado que es una vía metropolitana y la encargada del mantenimiento es la Municipalidad de Lima y puede deberse a la sobre carga de vehículos dado a que es la zona de negocios y oficinas más importante de la ciudad.
- Como comentario final a la investigación, acotar algunas opiniones sobre rugosidad y textura de diferentes colegas dedicados al rubro de construcción y supervisión en carreteras: Una primera opinión es respecto al porqué de los acabados lisos de nuestros pavimentos, sobre todo en pavimentos asfálticos que son los predominantes en nuestro país. Se trata de un tema de mala costumbre por parte del personal obrero de agregar finos sobre el asfalto en caliente recién colocado para luego rastrillarlo y cepillarlo, según los ingenieros, los

clientes extranjeros se quejan de esta costumbre pues dicen que es importante esa diferencia de textura para una mejor adherencia neumático – superficie.

Otra opinión, del ingeniero de calidad en supervisión de carreteras Henry Brutton, es que para verificar y validar las mediciones de rugosidad con métodos dinámicos se escala el perfil de rugosidad obtenido respecto a al perfil obtenido por un método de clase 1, generalmente nivel y mira únicamente en los primeros 200 metros, calibrando así el equipo dinámico. En el caso del Roadroid esta calibración de amplitud de las vibraciones se corrige con la configuración de la sensibilidad.

Por ultimo comentar sobre la actualidad de los controles de calidad en temas de rugosidad. Según colegas expertos, hoy en día muchos proyectos de carreteras exigen, muy aparte de la medición en la superficie de rodadura, una medición de rugosidad en la capa base del pavimento luego de ser compactada, dado que será la última capa de la estructura del pavimento inmediatamente anterior a la superficie asfáltica. Este muestreo de calidad se estipuló por temas de deflexiones a futuro ya que toda discontinuidad en la base se veía rellenada por la carpeta asfáltica y esta capa es una capa flexible, más aun si se compara con las capas de suelo anteriores a ella presentes en el diseño del pavimento que poseen un porcentaje mínimo de compactación de 90% según normas.

## BIBLIOGRAFÍA

**DEL ÁGUILA RODRÍGUEZ, PABLO.** 1999(a). *“Metodología para la Determinación de Rugosidad con Bajo Costo”*.

<http://www.camineros.com/documentos/doc2.pdf>

**DEL ÁGUILA RODRÍGUEZ, PABLO.** 1999(b). *“Experiencias y Resultados Obtenidos en la Evaluación de la Rugosidad de más de 3000 KM de Pavimentos en el Perú y otros Países”*.

<http://www.camineros.com/documentos/doc3.pdf>

**FORSLÖF, LARS.** 2014. *“Roughness and Texture”*.

[https://www.linkedin.com/pulse/20141130211746-97325448-](https://www.linkedin.com/pulse/20141130211746-97325448-roughness-and-texture)

[roughness-and-texture](https://www.linkedin.com/pulse/20141130211746-97325448-roughness-and-texture)

**GUTIÉRREZ LÁZARES, JOSÉ.** 2007. *“Modelación Geotécnica de Pavimentos Flexibles con Fines de Análisis y Diseño en el Perú”*.

Tesis (Magister) Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. Perú.

**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.** 1998. *“Índice Internacional de Rugosidad en la Red de Carreteras de México”*.

Publicación Técnica No.108. Sanfandila, Qro.

<http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt108.pdf>

**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.** 2002. *“Estado superficial y costos de operación en carreteras”*. Publicación Técnica

No.202. Sanfandila, Qro.

<http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt202.pdf>

**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.** 1995. *“La respuesta dinámica de un cuarto de carro y el Índice Internacional de Rugosidad”*. Publicación Técnica No.67. Sanfandila, Qro.

<http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt67.pdf>

**JOHNSTON, MYLES Y ISLAM, TASNIMUL.** 2013. *“Using cell-phones to monitor road roughness”*. University of Auckland, Auckland, New Zealand.

**LLOSA GRAU, JOAQUÍN.** 2006. *“Propuesta Alternativa para la Distribución Nacional del Presupuesto Anual Municipal para el Mantenimiento y Rehabilitación del Pavimento”*. Tesis (Br.) Universidad Peruana de Ciencia Aplicadas. Facultad de Ingeniería Civil. Perú.

**NAVA BRAVO, ISRAEL.** 2007. *“Diseño e integración de un sistema de adquisición de datos para la medición de perfiles en pavimentos”*. Tesis (Magister) Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería Electrónica. México.

**PARK, KYUNGWON; THOMAS, NATACHA E. Y LEE, K. WAYNE.** 2007. *“Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition”*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 133, No. 12, pp. 706-709.

**REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES (RNE).** 2010. *“Norma CE.010 Pavimentos Urbanos”*.  
<http://www.sencico.gob.pe/gin/normalizacion/Actualizaciones/CE.010PUrbanos.pdf>

**ROADROID.** 2014(a). *“Manual de Uso – Fundamentos”*.  
<http://roadroid.com/common/References/Guia%20de%20Usuario%20Roadroid%20-%20Fundamentos%20096.pdf>

**ROADROID.** 2014(b). *“Roadroid Referencia de Proyectos”*.  
<http://roadroid.com/common/References/Roadroid%20Referencia%20de%20proyectos%200.4.pdf>

**ROADROID.** 2014(c). *“IV Congreso Nacional IRF”*.  
<http://roadroid.com/common/References/SARF-IRF%20paper.v5.pdf>

**SAYERS, M.W. Y KARAMIHAS, S.M.** 1998. “*Little Book of Profiling*”. University of Michigan Transportation Research Institute. <http://umtri.umich.edu/content/LittleBook98R.pdf>

**SAYERS, M.W.; GILLESPIE, T.D. Y PATERSON, W.D.** 1986(a) “*Guidelines for the Conduct and Calibration of Road Roughness Measurements*”. World Bank Technical Paper No.46, The World Bank, Washington DC. United States of America.

**SAYERS, M.W.; GILLESPIE, T.D. Y QUEIROZ, C.A.V.** 1986(b). “*The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements*”. World Bank Technical Paper No.45, The World Bank, Washington DC. United States of America.

**SCHLOTJES, M R; VISSER, A Y BENNET, C.** 2014. “*Evaluation of a smart phone roughness meter*”. CE Projects cc. The World Bank Group, Australia. University of Pretoria, South Africa. [http://www.lpcb.org/index.php/component/docman/doc\\_download/25218-2014-evaluation-of-android-roughness-meter?Itemid=32](http://www.lpcb.org/index.php/component/docman/doc_download/25218-2014-evaluation-of-android-roughness-meter?Itemid=32)