

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD CON EQUIPO BUMP  
INTEGRATOR, CARRETERA CAÑETE - CHUPACA  
METODOLOGÍA DE DISCRIMINACIÓN DE DATOS**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**JAVIER ALEXIS CHAMBI BONIFACIO**

**Lima- Perú**

**2011**

### **Gracias a Dios**

Por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida y lograr otra meta más en mi carrera.

### **Gracias a mi familia**

Por su cariño, comprensión y apoyo sin condiciones ni medida. Gracias por guiarme sobre el camino de la educación. Creo ahora entender porque me obligaban a terminar mi tarea antes de salir a jugar, y muchas cosas más que no terminaría de mencionar.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	3
<b>LISTA DE CUADROS</b>	4
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	5
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS</b>	6
<b>INTRODUCCIÓN</b>	7
<b>CAPÍTULO I: GENERALIDADES</b>	8
1.1 ANTECEDENTES	8
1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO	8
1.2.1 Objetivo específico de investigación	8
1.3 CARACTERÍSTICAS DE LA CARRETERA CAÑETE - CHUPACA	9
1.4 CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO EVALUADO KM 74+000 – 84+000	11
1.5 ESTADO DEL ARTE.	13
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b>	17
2.1 ENFOQUE DEL ESTUDIO	17
2.1.2 Metodología de Discriminación de datos	17
2.2 HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS	17
2.2.1 Teoría de errores	18
2.2.2 Prueba de Hipótesis.	19
2.3 EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS	23
2.3.1 Evaluación superficial	24
2.3.2 Rugosidad	25
2.3.3 Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI)	25
2.3.4 Equipos existentes para la medición de la regularidad superficial	27
2.4 RUGOSÍMETRO BUMP INTEGRATOR	30
2.4.1 Descripción del equipo Bump Integrator	30
2.5 EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD CON EQUIPO BUMP INTEGRATOR	32
2.5.1 El vehículo	32
2.5.2 Instalación del instrumento en el vehículo	34
2.5.3 Velocidad de Operación	34
2.5.4 Calibración	35
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE DISCRIMINACIÓN DE DATOS</b>	37
3.1 APLICACIÓN AL TRAMO EN ESTUDIO	37
3.2 RECOPIACIÓN DE DATOS	38
3.2.1 Recopilación de Datos del BI/IRI 2009	38
3.2.2 Recopilación de Datos del BI/IRI 2010	40
3.3 ANÁLISIS DE DATOS	43
3.3.1 Análisis de errores	43
3.3.2 Calibración del Equipo	47
3.4 PROCESAMIENTO DE DATOS	48
3.4.1 Homogenización de Sub- tramos	48

---

<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	60
4.1 EVOLUCIÓN DE LA RUGOSIDAD EN EL TRAMO EN ESTUDIO	60
4.1.1 Valores IRI con intervalo de confianza.	60
4.2 DE LA HOMOGENIZACIÓN DE TRAMOS	61
<b>CONCLUSIONES</b>	63
<b>RECOMENDACIONES</b>	65
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	66
<b>ANEXOS</b>	67



## **RESUMEN.**

El presente estudio está orientado a la aplicación de una metodología de discriminación de datos que mediante el uso de herramientas estadísticas clasifique y procese la información histórica de los índices de rugosidad del tramo en estudio para obtener valores representativos con un grado de confiabilidad aceptable, que sirvan posteriormente para la toma de decisiones respecto a políticas de mantenimiento de la vía.

Esta implementación de una metodología de discriminación de datos permitió minimizar los errores sistemáticos que se puedan presentar en el proceso, además de la homogenización de la información lo cual va a coadyuvar en la clasificación más conveniente de los tramos para de esa forma se pueda tomar decisiones respecto al mantenimiento de la carretera de manera más global y por tanto económica.

Finalmente, el presente trabajo de investigación servirá como punto de partida para la elaboración de la estimación de una curva de deterioro y consecuentemente para la propuesta de manual para las carreteras de bajo volumen de tránsito (BVT).

## LISTA DE CUADROS.

Cuadro 1.1	Zonas de vida	10
Cuadro 1.2	Datos de población por distritos	11
Cuadro 2.1	Estado superficial en función del IRI.	24
Cuadro 2.2	Requerimientos de las secciones de calibración	36
Cuadro 3.1	Valores BI recopilados del 2009 del tramo 74-79 Km	38
Cuadro 3.2	Valores IRI recopilados del 2009 del tramo 76-84 Km	38
Cuadro 3.3	Valores BI recopilados del 2009 del tramo 79 al 84 Km.	38
Cuadro 3.4	Valores IRI recopilados del 2009 del tramo 79 al 84 Km.	39
Cuadro 3.5	BI recolectados en sub – tramo progresiva km. 74–79	40
Cuadro 3.6	BI recolectados en sub – tramo progresiva km. 79-84	41
Cuadro 3.7	1ra discriminación de datos para el sub – tramo km. 74-79	44
Cuadro 3.8	1ra discriminación de datos para el sub – tramo km. 79-84	45
Cuadro 3.9	Calibración de los datos	46
Cuadro 3.10	Ecuación de calibración.	47
Cuadro 3.11	Transformación de BI a IRI sub – tramo km. 74 - 79	49
Cuadro 3.12	Transformación de BI a IRI sub – tramo km. 79- 84	50
Cuadro 3.13	Datos organizados en kilómetros para homogenización	51
Cuadro 3.14	Discriminación de datos alterados	52
Cuadro 4.1	Evolución del IRI en el tramo en estudio años 2009 y 2010.	59
Cuadro 4.2	IRI 2010 con intervalos de confianza 95 % confiabilidad	59
Cuadro 4.3	Homogenización de tramos	60
Cuadro 4.4	Agrupamiento de sub-tramos	60

## LISTA DE FIGURAS.

Fig. 1.1	Detalle de poblaciones que une la carretera	9
Fig. 1.2	Foto del tramo evaluado	11
Fig. 2.1	Homogeneidad de varianzas	21
Fig. 2.2	Lineamientos para test de hipótesis.	22
Fig. 2.3	Test de hipótesis sobre la diferencia de dos medias.	22
Fig. 2.4	Modelo de cuarto de carro	23
Fig. 2.5	Escala estándar para la cuantificación del IRI	27
Fig. 2.2	Foto de la camioneta usada para la evaluación.	28
Fig. 2.6	Nivel y mira topográfica	28
Fig. 2.7	Equipo MERLIN	28
Fig. 2.8	Perfilógrafo California	29
Fig. 2.9	Componentes de equipos de respuesta	29
Fig. 2.10	Componentes de equipos de referencia inercial	30
Fig. 2.11	Modelo de conexión del Rugosímetro electrónico	31
Fig. 2.12	Software de comunicación para el rugosímetro electrónico	31
Fig. 2.13	Unidad Bump Integrator	32
Fig. 2.14	Unidad de adquisición de datos de Rugosímetro Bump integrator.	32
Fig. 2.15	Foto de la camioneta usada para la evaluación.	33
Fig. 2.16	Ejemplos de Gráficas IRI – Valores STRMRV	36
Fig. 3.1	Regresión lineal	46
Fig. 3.2	Regresión exponencial	46
Fig. 3.3	Regresión polinómica	46
Fig. 3.4	Test de normalidad tramos 74-75.	53
Fig. 3.5	Test de normalidad tramos 75-76.	53
Fig. 3.6	Test de normalidad tramos 76-77.	53
Fig. 3.7	Test de normalidad tramos 77-78.	54
Fig. 3.8	Test de normalidad tramos 78-79.	54
Fig. 3.9	Test de normalidad tramos 79-80.	54
Fig. 3.10	Test de normalidad tramos 80-81.	54
Fig. 3.11	Test de normalidad tramos 81-82.	55
Fig. 3.12	Test de normalidad tramos 82-83.	55
Fig. 3.13	Test de normalidad tramos 83-84.	55
Fig. 3.14	Homogeneidad de varianzas para tramos 74-75 y 75-76	56
Fig. 3.15	Prueba de hipótesis para tramos 74-75 y 75-76	56
Fig. 3.16	Homogeneidad de varianzas para tramos 82-83 y 83-84	57
Fig. 3.17	Prueba de hipótesis para tramos 82-83 y 83-84	57

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS.

<b>ASTM</b>	:	American Society of Testing and Materials
<b>BI</b>	:	Bump Integrator
<b>BPR</b>	:	Bureau of Public Roads.
<b>BVT</b>	:	Bajo Volumen de Tránsito
<b>DG 2000</b>	:	Manual de Diseño Geométrico
<b>GMR</b>	:	General Motors Research
<b>IRI</b>	:	International Roughness Index
<b>IRRE</b>	:	International Road Roughness Experiment
<b>MDOT</b>	:	Michigan Department of Transportation
<b>MTC</b>	:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
<b>NCHRP</b>	:	National Cooperative Highway Research Program Officials.
<b>PCI</b>	:	Índice de la Condición del Pavimento
<b>REBITU</b>	:	Rugosímetro Electrónico Bump Integrator Tipo UNI
<b>RTRRMS</b>	:	Response Type Road Roughness Meters
<b>RQCS</b>	:	Reference Quarter Car Simulation
<b>UMTRI</b>	:	University of Michigan Transportation Research Institute

## INTRODUCCIÓN.

Desde el año 2008, cuando se firma el convenio entre la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) representado por PROVIAS NACIONAL se vinieron realizando trabajos de evaluación superficial entre los años 2009 y 2010 además de otras evaluaciones para este tipo de carreteras de bajo volumen de tránsito (BVT).

En ese sentido el presente Informe de Suficiencia tiene como objetivo específico la aplicación de una metodología de discriminación de datos que mediante el uso de herramientas estadísticas clasifique y procese la información histórica de los índices de rugosidad del tramo en estudio para obtener valores representativos con un grado de confiabilidad aceptable, sirviendo así como punto de partida para la elaboración de la estimación de una curva de deterioro y consecuentemente para la propuesta de manual para este tipo de vías. Está dividido en cuatro capítulos. Los dos primeros capítulos muestran generalidades y el marco teórico, mientras que los dos últimos la investigación desarrollada.

En el primer capítulo, las características propias del proyecto bajo el cual se realiza la investigación además de las características de la carretera y el tramo específico a evaluación y una sinopsis del estado del arte.

En el segundo capítulo, se muestran las herramientas estadísticas a utilizar. Además de los conceptos referentes a la rugosidad y el equipo de evaluación empleado llamado Bump Integrator.

En el tercer capítulo, se muestra la metodología de discriminación de datos a emplearse. Siendo los principales pasos de dicha metodología: Recopilación, análisis y procesamiento de datos.

Finalmente, en el cuarto y último capítulo, se muestra la consolidación del estudio mediante un análisis metódico de los resultados.

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES**

### **1.1 ANTECEDENTES**

La carretera de penetración y enlace entre Cañete – Chupaca - Huancayo, fue proyectada y ejecutada por partes durante el gobierno del Sr. Augusto B. Leguía entre la década de 1920 a 1930, mediante la ley decretada de la Conscripción Vial Territorial del Perú, continuándose luego con su construcción durante el gobierno de Manuel Prado Ugarteche entre los años 1940 y 1944. El Gobierno retoma su construcción el tramo faltante entre Yauyos – Tomas en el año 1954, el cual estuvo a cargo del Ing. Max Atuncar, culminándose los trabajos en 1957.

Durante mucho tiempo esta vía no desarrolló trabajos de mantenimiento ni rehabilitación, que sumado a su geometría vial ha presentado consecuentemente problemas de transitabilidad y funcionalidad.

Con fecha 22 de agosto del 2008 es firmado el convenio de cooperación inter-institucional para el acompañamiento y monitoreo de los trabajos de conservación vial por niveles de servicios para la carretera mencionada, entre la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) representado por PROVIAS NACIONAL.

De acuerdo al referido convenio, se realizaron trabajos de evaluación superficial entre los años 2009 y 2010 además de otras evaluaciones para este tipo de carreteras de bajo volumen de tránsito (BVT). En ese sentido existe información importante que debería ser analizada con herramientas estadísticas y probabilísticas adecuadas que permitan estimar el valor representativo de las variables participantes, con un grado de confiabilidad idóneo, sobre el deterioro de esta carretera específica en estudio.

### **1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO.**

El objetivo central del proyecto es alcanzar un adecuado nivel de transitabilidad de la vía en estudio, mediante la ejecución permanente de actividades de conservación rutinaria y periódica.

#### **1.2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO DE INVESTIGACIÓN.**

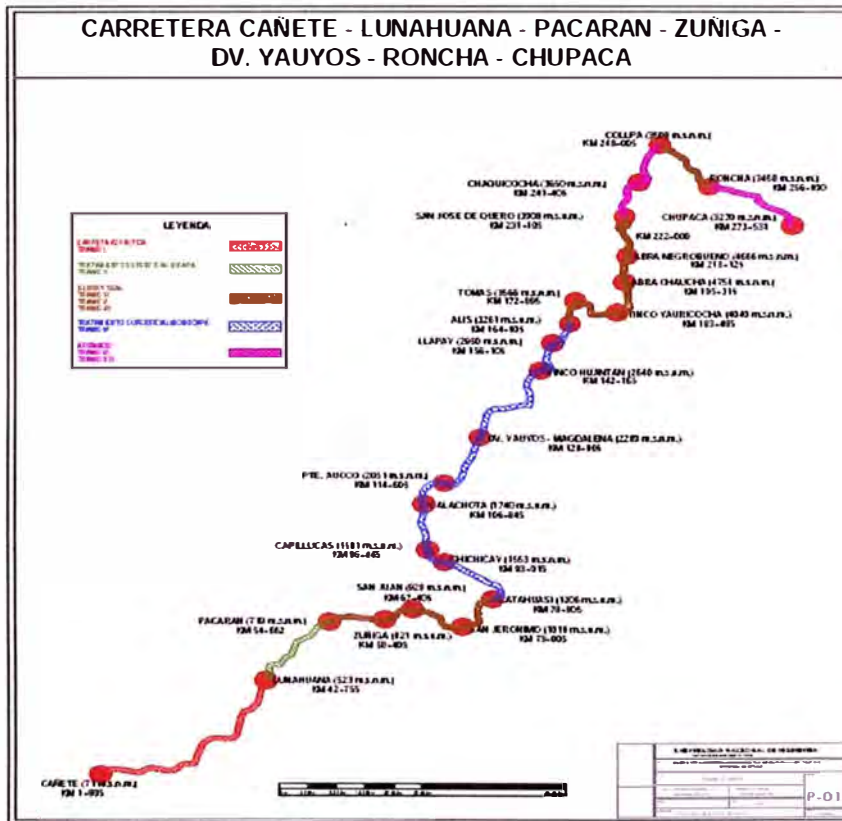
La aplicación de una metodología de discriminación de datos que mediante el uso de herramientas estadísticas clasifique y procese la información histórica de los índices de rugosidad del tramo en estudio para obtener valores representativos con un grado de confiabilidad aceptable, sirviendo así como

punto de partida para la elaboración de la estimación de una curva de deterioro y consecuentemente para la propuesta de manual para este tipo de vías.

**1.3 CARACTERÍSTICAS DE LA CARRETERA CAÑETE – CHUPACA.**

**Geología.** Esta zona está delimitada por las estribaciones andinas y el borde del altiplano. Muestra una topografía abrupta con pendientes que llegan hasta los 60°. También, se encuentra el río Cañete y sus tributarios que descienden del altiplano a la Costa, en general con tendencia. Este a Oeste y que han labrado un valle profundo y encañonado que se hace más amplio a medida que se aproxima a la Costa, destacándose la etapa cañón y la etapa valle en forma de “V” en los flancos, modificado por la acción de las quebradas secundarias.

Fig. 1.1 Detalle de Poblaciones que une la carretera



Fuente: Escuela Profesional de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería

**Recursos Hídricos.** La carretera forma parte de la Cuenca del Río Cañete, sus recursos hídricos provienen de los aportes de las lluvias, derivados de lagunas y deshielo de los nevados ubicados estos principalmente en el extremo norte de la Cuenca sobre los 4500 msnm, desde donde inicia un sinuoso recorrido en dirección sur hasta la comunidad de Catahuasi, donde cambia a una dirección



este-oeste, para descender a las estribaciones andinas de Zuñiga, Pucará y Lunahuaná, en donde su valle se empieza a ampliar y dar lugar a cultivos de algodón, vid y pan llevar. Su recorrido es uno de los más largos del departamento ya que alcanza los 210 Km. Esta característica, además de las numerosas lagunas y cursos de agua que alimentan su recorrido, es uno de los ríos de régimen más estable a lo largo del año.

**Obras de Arte.** La carretera pasa por 21 puentes siendo los principales: puente sobre la quebrada (Km. 49+150), puente Pacarán (Km. 54+390), puente sobre la quebrada del Km. 62+000, puente San Gerónimo (Km. 72+340), puente Huallanpi (Km. 77+200), puente Catahuasi (Km. 78+050), puente Calachota (Km. 105+000), puente Huantán (Km. 139+820), puente Tinco – Alis (Km. 157+500) , puente Cunas (Km. 255+420) y varios pontones a lo largo de todo el tramo.

**Suelos.** La cuenca baja del río Cañete presenta en la parte más baja suelos de textura variable, entre ligeros a finos, con cementaciones salinas, cálcicas o yeso. Actualmente repercute la actividad agrícola en el valle aluvial irrigado (frutales).

**Ecología.** Según el Mapa Ecológico de la Reserva Paisajística en Cochabamba se ha identificado diez zonas de vida que se distribuyen a lo largo de la carretera entre Cañete- Yauyos- Chupaca, estos son:

Cuadro 1.1 Zonas de Vida

POBLADO	SIMBOLO	FORMACION ECOLOGICA
Cañete, Imperial, Lunahuaná	dd - S	Desierto desecado – Subtropical
Pacarán, Zuñiga	ds – S	Desierto semiárido – Subtropical
Catahuasi, Capillucas	dp – S	Desierto per árido – Subtropical
Calachota	md – S	Matorral desértico – Subtropical
Magdalena, Alis	e – MT	Estepa - Montano Tropical
Tomas, Tinco	ph – SaT	Páramo húmedo – Subalpino Tropical
San José de Quero	pmh – SaT	Páramo muy húmedo – Subalpino Tropical
Chupaca, Ronchas	bh - MT	Bosque húmedo – Montano – Tropical

Fuente: Estudio de Ingeniería e Impacto Ambiental - AYESA – ALPHA CONSULT



**Población de Zonas Aledañas** La población urbana y rural de los distritos de Cañete hasta Chupaca según los datos pronosticados del censo del INEI del 2007, es de 54,698 habitantes.

Cuadro 1.2 Datos de Población por Distritos

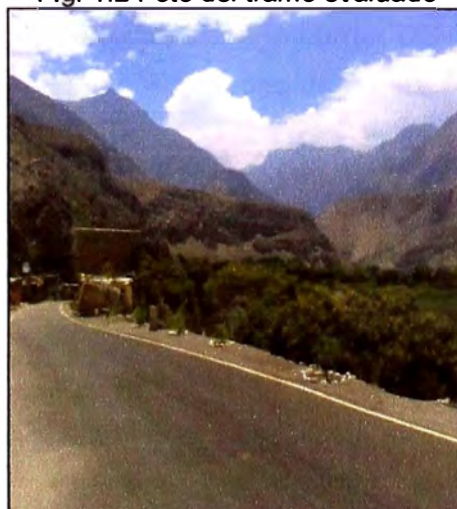
Provincia	Distritos	Población (Hab.)
Cañete	Lunahuaná	4,428
	Pacarán	1,673
	Zúñiga	1,132
Yauyos	Catahuasi	1,079
	Chocos	1,074
	Cacra	541
	Yauyos	2,652
	Colonia	1,439
	Huantan	923
	Laraos	733
	Alis	1,423
	Tomas	814
Chupaca	Chupaca	20,916
	Ahuac	6,546
	Huachac	3,728
	San Juan de Yscos	2,332
	Yanacancha	3,265

Fuente: INEI - CENSO 2007

#### 1.4 CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO EVALUADO KM 74+000 – 84+000.

El tramo en estudio comprende desde la progresiva del 74+000 al 84+000 de la Carretera Cañete-Chupaca, se encuentra ubicada en la provincia de Catahuasi, en el departamento de Lima a 1206 msnm.

Fig. 1.2 Foto del tramo evaluado



Fuente: Visita a campo

**Geología:** El tramo de la Carretera en estudio es una quebrada, conformada por una estrecha garganta en las zonas próximas a los contrafuertes andinos. Todas las superficies de los cerros son pétreas, rocallosas, resacas y completamente desprovistas de condiciones naturales para la agricultura, por falta de agua. Este tramo está considerado dentro de la Región Yunga (500msnm – 2300msnm).

**Clima:** Al estar ubicado, el tramo en estudio, dentro de la Región Yunga el clima predominante es el caluroso (sol todo el año), teniendo una temperatura que varía entre 20°C y 27° C durante el día y las noches son frescas a causa de los vientos que bajan de las regiones más altas.

**Topografía:** La carretera tiene una topografía bastante sinuosa y agreste. El ancho de la actual plataforma vial es variable entre 3m y 4m.

**Composición de Suelos de Fundación:** Los materiales de fundación del tramo en estudio, se clasifica en el Sistema SUCS como SC-SM y en el Sistema AASHTO varía entre A-1-b (0) y A-2-4(0). Los agregados gruesos de este material arenoso son de forma sub angular, mientras que la matriz tiene plasticidad comprendida entre escasa a moderada (como máximo I.P.=6%). En la sub-rasante se han encontrado bolonerías a partir de 0.40m (en promedio) mayor concentración de ellos, entre 40% y 50% y en tamaños variables entre 4" a 8".

**Geometría de la Carretera.** La geometría de la carretera está condicionada a la geografía de la zona (quebrada), presentando secciones a media ladera. El trazo geométrico de la carretera no cumple con la norma DG-2000 del MTC, por tener curvas muy próximas entre ellas, longitudes de transición cortos, sección de vía inadecuada, etc.

**Sistema de Drenaje** No cuenta con sistema de drenaje el tramo en estudio. Existe flujo de agua tanto superficial y subterráneo.

**Características Principales del Tramo en Estudio.** Las características principales obtenidos de los Estudios Técnicos para el Cambio de Estándar de

Afirmado a solución Básica de la Concesionaria CGC proyectado para el periodo del 2009-2013 son:

EAL (Número de Ejes Equivalentes a 8.2 tn) = 84,000.

IMDa (Veh/día) = 53.

Tasa de Crecimiento = 3.6%

DTA = IMD x 3.6% (Según USACE).

CBR (al 95%)= 20 Buena (Capacidad Portante del Terreno)

Modulo Resiliente Mr = 13.201psi.

Coefficiente de Drenaje CD=1.

### 1.5 ESTADO DEL ARTE.

En la década de los 40, para establecer criterios de calidad y comportamiento de las superficies de rodadura que indicaran sus condiciones actuales y futuras del estado superficial y funcional de las mismas; surgió la necesidad de establecer un índice que permitiera evaluar las deformaciones verticales de una superficie de rodadura, que afectaban la dinámica de los vehículos que transitan sobre ella. El Banco Mundial trató de unificar los criterios de evaluación con los equipos de medición de rugosidad a nivel mundial, tales como los perfilómetros o los equipos de tipo respuesta, y que de alguna manera sustituyera el método de la "American Association of State Highway Officials" (AASHO). Actualmente llamada AASHTO, que permite calificar la condición superficial de un camino solo en forma subjetiva.

En los inicios de la década de 1960, el departamento de investigación de la General Motors (GMR) desarrolló un perfilómetro usando instrumentación moderna, que fue capaz de medir la porción "dinámica" de un perfil de vía responsable de inducir el movimiento de un vehículo. Poco después de esto, el departamento de transporte de Michigan (MDOT, después llamado departamento del estado de caminos y transporte de Michigan) construyó el segundo perfilómetro GMR.

En ese entonces, el más conocido sistema de medida de rugosidad fue el BPR rugosímetro RTRRMS. A finales de 1960, ambos MDOT and K.J. Law desarrollan el "equivalente" electrónico del BPR rugosímetro, el cual emplea una simulación de vehículo usando una computadora análoga. Ya que el BPR rugosímetro tiene solo una llanta, éste vehículo de simulación fue llamado BPR rugosímetro de simulación de un cuarto de carro (BPR/QCS).

El BPR/QCS usado por MDOT and K.J. Law tiene ecuaciones idénticas en su forma a un modelo matemático de texto de estudio usado para describir varios sistemas dinámicos siendo esta la primera aplicación de este modelo para cuantificar la rugosidad de la vía.

El QCS es en efecto ese modelo, con parámetros de valores representativos de los vehículos. (Los dos BPR/QCSs usaron dos conjuntos diferentes de valores de parámetros, cada uno basado en medidas de un BPR rugosímetro “estándar” distinto). La mayoría de los perfilómetros producidos por K.J. Law han incluido el simulador BPR. Varios años después, K. J. Law introduce el segundo conjunto de valores de parámetros de un QCS para simular un auto de pasajeros Chevrolet Impala 1968. Uno de los perfilómetros tipo GMR con un BPR/QCS fue la base para la escala QI usado en el proyecto PICR, sin embargo, debido a un número de factores, la pieza nunca realmente midió el perfil durante el proyecto con la precisión que normalmente se le asociaba al instrumento. La escala QI no es por lo tanto el equivalente a las características publicadas del BPR/QCS.

A finales de la década de 1970, un proyecto NCHRP de investigación de gran escala fue llevado a cabo en el UMTRI (entonces llamado Instituto de Investigación en Seguridad de Autopistas) para:

- Estudiar los RTRRMS.
- Determinar la correlación entre los diferentes sistemas en uso.
- Crear una metodología de calibración.

La investigación incluyó extensos muestreos de los RTRRMS en un ambiente de laboratorio, junto con un análisis teórico formal de conceptos e instrumentos RTRRMS. Se hizo obvio que una fuente principal de los problemas provenía del hecho que los instrumentos fueron inventados sin haber dilucidado el concepto de lo que es “rugosidad” o de cómo este debería ser medido, se hizo necesario definir, matemáticamente, un aspecto medible del verdadero perfil longitudinal que serviría como una referencia de calibración.

La referencia que fue seleccionada es el QCS, con nuevos parámetros de modelo escogidos para ofrecer la máxima correlación los RTRRMSs existentes. Adicionalmente a un nuevo conjunto de parámetros, el QCS fue “mejorado” para la simulación de medio-carro, porque casi todos los RTRRMSs usados en los Estados Unidos están basados en vehículos de doble rodaje (carros de

pasajeros y vagones de doble rodaje). La forma en que una llanta “envuelve” pequeños chichones se consideró que tenía influencia crítica cuando el QCS era usado para simular velocidades bajas. En consecuencia, el envolvimiento de la llanta se añadió al modelo cuando se simulaban a bajas velocidades. El RQCS descrito en este reporte es casi idéntico a la referencia NCHRP, diferenciándose solo en el parámetro de la rueda envolvente, el cual fue cambiado sin razón alguna de 1 pie (300mm) a 250mm para simplificar los requerimientos de medición para métodos de mira y nivel.

El reporte 228 NCHRP recomienda una estadística de rugosidad llamada “velocidad rectificada promedio de referencia” (RARV) la cual es útil cuando se comparan medidas hechas por RTRRMSs a más de una velocidad de medida. La otra estadística asociada con el RQCS se llama “pendiente rectificada promedio referencial” (RARS). Ya que el RARS numérico obtenido con una velocidad de simulación de 80km/h (RARS 80) se selecciona en éste reporte como la mejor elección para un índice de rugosidad internacional, la mayor parte de los resultados obtenidos con el RQCS son reportados como valores RARS.

El Bump-integrador (BI), o BPR Roughmeter, fue desarrollado originalmente por la United States Bureau of Public Roads. TRRL desde entonces han hecho una serie de modificaciones para mejorar su rendimiento y simplificar el mantenimiento (Jordan y Young, 1980).

En 1982, el Banco Mundial inició en Brasil un experimento para establecer correlaciones y un estándar de calibración para las mediciones de rugosidad. Se notó que los valores de los equipos de medición de la rugosidad superficial existentes eran correlacionables. Una vez establecido este punto, uno de los objetivos de las investigaciones fue encontrar un índice de referencia al que posteriormente se denominó Índice Internacional de Rugosidad.

En el Perú el uso del equipo Bump Integrator fue utilizado por el Departamento de Provias Nacional del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) en el año 1995; quien realizó mediciones de rugosidad en la autopista del país como la Panamericana Norte, mediante la tesis “Evaluación de la Rugosidad de Pavimentos con Uso del Bump Integrator” del Ing. José Sologorre Huayta pero también ha sido utilizado el equipo BI por el Consorcio Sullana para la evaluación superficial del Sector Sullana-Aguas Verdes.

Actualmente el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) cuenta con diferentes equipos de Rugosímetros siendo uno de ellos el Bump Integrator, a la vez que lo utiliza para sus propias mediciones de la rugosidad de carreteras, también exige su uso en la medición de la rugosidad cuando conlleva un contrato de prestación de servicios de mantenimiento a una determinada carretera. Actualmente la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), mediante el Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil (IIFIC-UNI), cuenta con un equipo de Rugosímetro Electrónico Bump Integrator Tipo UNI (REBITU) conformado por un adquisidor de datos y un sensor de desplazamiento.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

**2.1 ENFOQUE DEL ESTUDIO.** Está orientada a la aplicación de una metodología de discriminación de datos que mediante el uso de herramientas estadísticas clasifique y procese la información histórica de los índices de rugosidad del tramo en estudio para obtener valores representativos con un grado de confiabilidad aceptable, sirviendo así como punto de partida para la elaboración de la estimación de una curva de deterioro y consecuentemente para la propuesta de manual para las carreteras de bajo volumen de tránsito (BVT).

Entre los objetivos específicos están:

- Evaluar la rugosidad del tramo de prueba con el equipo Bump Integrator.
- Hallar la fórmula de correlación entre los datos obtenidos en campo entre Bump Integrator y los del método MERLIN.
- Analizar la información histórica y actual recopilada, justificando su utilidad y confiabilidad para nuevas etapas de investigación.
- Procesar la información analizada, haciendo uso de las herramientas de la estadística y las probabilidades, que permita establecer modelos y teorías confiables.

**2.1.2 Metodología de Discriminación de datos.** Es la metodología que será usada en el presente trabajo de investigación que consiste básicamente en la recopilación, análisis y procesamiento de los datos obtenidos de antecedentes más lo obtenido en el tramo de prueba actual, obteniendo parámetros estadísticos útiles para la toma de decisiones. En efecto se usufructuará todas las herramientas estadísticas vistas anteriormente.

Este proceso va involucrar en esencia:

- ✓ Sectorización (números de secciones, número de datos por sección).
- ✓ Homogenización de tramos.
- ✓ Identificación de errores e intervalos de confianza para la data histórica que sirva para la elaboración de curva de deterioro.

**2.2 HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS.** Se hará uso de la estadística y probabilidades como herramienta de procesamiento y discriminación de datos. Y para esto se utilizará el software Minitab. A continuación algunos conceptos básicos.



**2.2.1 Teoría de errores.** En todo proceso de medición existen limitaciones dadas por los instrumentos usados, el método de medición, el observador (u observadores) que realizan la medición. Asimismo, el proceso de medición introduce errores o incertidumbres. Tanto los instrumentos que usamos para medir como las magnitudes mismas son fuente de incertidumbre al momento de medir. Los instrumentos tienen una precisión finita, por lo que, para un instrumento dado, siempre existe una variación mínima de la magnitud que puede detectar. Esta mínima cantidad se denomina la apreciación nominal del instrumento. Por ejemplo, con una regla graduada en milímetros, no podemos detectar variaciones menores que una fracción del milímetro.

Existen varias formas de clasificar y expresar los errores de medición como veremos a continuación.

#### **A. Errores según origen.**

##### **A.1 Errores introducidos por el instrumento:**

- ✓ **Error de apreciación:** Si el instrumento está correctamente calibrado la incertidumbre que tendremos al realizar una medición estará asociada a la mínima división de su escala o a la mínima división que podemos resolver con algún método de medición. Nótese que no decimos que el error de apreciación es la mínima división del instrumento, sino la mínima división que es discernible por el observador. La mínima cantidad que puede medirse con un instrumento dado la denominamos apreciación nominal. El error de apreciación puede ser mayor o menor que la apreciación nominal, dependiendo de la habilidad (o falta de ella) del observador. Así, es posible que un observador entrenado pueda apreciar con una regla común fracciones del milímetro mientras que otro observador, con la misma regla pero con dificultades de visión sólo pueda apreciar 2 mm.
- ✓ **Error de exactitud:** Representa el error absoluto con el que el instrumento en cuestión ha sido calibrado.

**A.2 Error de interacción:** Esta incertidumbre proviene de la interacción del método de medición con el objeto a medir. Su determinación depende de la medición que se realiza y su valor se estima de un análisis cuidadoso del método usado.



**A.3 Falta de definición en el objeto sujeto a medición:** Como se dijo antes, las magnitudes a medir no están definidas con infinita precisión.

## **B. Errores según su carácter.**

**B.1 Errores sistemáticos:** Se originan por las imperfecciones de los métodos de medición. Por ejemplo, pensemos en un reloj que atrasa o adelanta, o en una regla dilatada, el error de paralaje, etc. Los errores introducidos por estos instrumentos o métodos imperfectos afectarán nuestros resultados siempre en un mismo sentido. El valor de error de exactitud sería un ejemplo de error sistemático pero no son lo mismo, ni los errores de exactitud son los únicos responsables de los errores sistemáticos. Imaginemos por ejemplo el caso de una balanza bien calibrada que se usa para conocer el peso de las personas en los centros comerciales u otros negocios, como es usual que las personas (en público) se pesen vestidas, los valores registrados con estas balanzas tendrán un error sistemático por el peso de la vestimenta. La única manera de detectarlos y corregirlos es comparar nuestras mediciones con otros métodos alternativos y realizar un análisis crítico y cuidadoso del procedimiento empleado. También es aconsejable intercalar en el proceso de medición patrones confiables que permitan calibrar el instrumento durante la medición.

**B.2 Errores estadísticos:** Son los que se producen al azar. En general son debidos a causas múltiples y aleatorias. Ocurren, por ejemplo, cuando nos equivocamos en contar el número de divisiones de una regla, o si estamos mal ubicados frente al fiel de una balanza. Estos errores pueden cometerse con igual probabilidad por defecto como por exceso. Por tanto, midiendo varias veces y promediando el resultado, es posible reducirlos considerablemente. Es a este tipo de errores a los que comúnmente hace referencia la teoría estadística de errores de medición.

**2.2.2 Prueba de Hipótesis.** A menudo, el problema al que se enfrenta el ingeniero no es tanto la estimación de un parámetro poblacional, sino más bien la formación de un procedimiento de decisión que se base en los datos que pueda producir una conclusión acerca de algún sistema científico. Probar una hipótesis implica tomar una decisión al comparar la muestra observada respecto de la conjetura para el parámetro poblacional, una prueba estadística consiste

en verificar una hipótesis respecto a uno o mas valores de los parámetros es decir, probar su validez indicando que grado de evidencia es necesario para no rechazar la conjetura.

Una hipótesis estadística es una aseveración o conjetura con respecto a una o más poblaciones. (Walpole Ronald, 1999).

En toda prueba estadística participan dos hipótesis o teorías, la hipótesis propuesta por el observador y una negación de esta hipótesis. La primera, se denomina hipótesis alternativa o hipótesis de investigación, denotada por  $H_a$  y la segunda, se denomina hipótesis nula y denota por  $H_0$ ; el propósito del test de hipótesis es demostrar el fundamento de la hipótesis alternativa, si tal fundamento se justifica o decidir si los datos tienden a refutar la hipótesis nula.

**A. Intervalos de Confianza.** En el contexto de estimar un parámetro poblacional, un intervalo de confianza es un rango de valores (calculado en una muestra) en el cual se encuentra el verdadero valor del parámetro, con una probabilidad determinada.

La probabilidad de que el verdadero valor del parámetro se encuentre en el intervalo construido se denomina nivel de confianza, y se denota  $1-\alpha$ . La probabilidad de equivocarnos se llama nivel de significancia y se simboliza con  $\alpha$ . Generalmente se construyen intervalos con confianza  $1-\alpha=95\%$  (o significancia  $\alpha=5\%$ ). Menos frecuentes son los intervalos con  $\alpha=10\%$  o  $\alpha=1\%$ . Para construir un intervalo de confianza, se puede comprobar que la distribución Normal Estándar cumple que:

$$P(-1.96 < z < 1.96) = 0.95$$

Luego, si una variable  $X$  tiene distribución  $N(\mu, \sigma^2)$ , entonces el 95% de las veces se cumple:

$$-1.96 \leq \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma} \sqrt{n} \leq 1.96$$

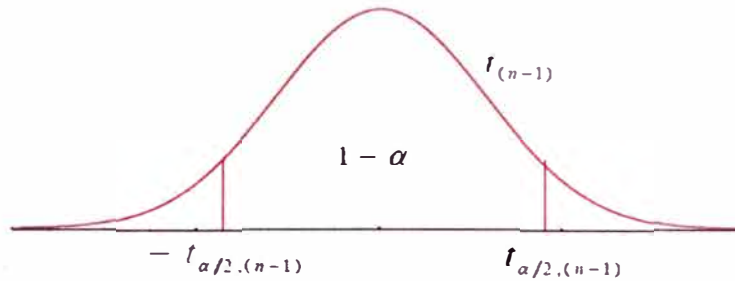
Despejando  $\mu$  en la ecuación se tiene:

$$\bar{X} - 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

El resultado es un intervalo que incluye al  $\mu$  el 95% de las veces. Es decir, es un intervalo de confianza al 95% para la media  $\mu$  cuando la variable  $X$  es normal y  $\sigma^2$  es conocido.

En forma general se resume así:

$$\Pr\left(\bar{X} - t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha$$



**B. Homogeneidad de varianzas.** En algunos casos, para comparar medias de dos poblaciones, se debe verificar que las varianzas poblacionales son iguales.

Fig. 2.1 Homogeneidad de varianzas

<p><b>Hipótesis</b></p> <p><math>H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2</math></p> <p><math>H_A : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2</math></p> <p><math>H_A : \sigma_1^2 &gt; \sigma_2^2</math></p> <p><math>H_A : \sigma_1^2 &lt; \sigma_2^2</math></p>	<p><b>Estadístico de prueba de <math>H_0</math></b></p> $F_0 = \frac{S_1^2}{S_2^2}$
--	---

Fuente: Navarro Luis, clases de estadística Curso de titulación (2010).

De la Fig. 2.1  $H_0$  es la hipótesis nula (varianzas iguales) y  $H_A$  es la hipótesis alternativa.

**C. Lineamientos para hacer un test de hipótesis.**

Si se pone a prueba una hipótesis sobre el valor de un parámetro  $\theta$ , la declaración de igualdad siempre se incluye en  $H_0$ . Lo que se detecte o sustente es la hipótesis alternativa.

La hipótesis de investigación es  $H_A$ , de modo que se espera que los datos lleven a rechazar  $H_0$  y en consecuencia aceptar  $H_A$ .

Los elementos esenciales de un test de hipótesis son:

- ✓ La hipótesis nula  $H_0$ .
- ✓ La hipótesis alternativa  $H_A$ .
- ✓ El estadístico de la prueba de  $H_0$ .
- ✓ La región de rechazo de  $H_0$ .

Fig. 2.2 Lineamientos para test de hipótesis.

Planteamiento de hipótesis	
Hipótesis nulas	
$H_0 : \theta = \theta_0$ (conocido)	$H_0 : \theta_1 = \theta_2$
Hipótesis alternativas	
$H_A : \theta \neq \theta_0$ (bilateral)	$H_A : \theta_1 \neq \theta_2$ (bilateral)
$H_A : \theta > \theta_0$ (unilateral)	$H_A : \theta_1 > \theta_2$ (unilateral)
$H_A : \theta < \theta_0$ (unilateral)	$H_A : \theta_1 < \theta_2$ (unilateral)
Comparar con un estándar	Comparar dos poblaciones

Fuente: Navarro Luis, clases de estadística Curso de titulación (2010).

**D. Test de hipótesis sobre la diferencia de dos medias poblacionales.** Para esto se realizan los siguientes supuestos:

- ✓ Muestras aleatorias independientes.
- ✓ Comportamiento aproximadamente como distribución normal: Un test de normalidad es un método estadístico para determinar si la distribución de una muestra tiene las características de una distribución normal.
- ✓ Varianzas iguales (homogeneidad de varianzas).

Fig. 2.3 Test de hipótesis sobre la diferencia de dos medias.

Hipótesis	
$H_0 : \mu_1 = \mu_2$	$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$
$H_A : \mu_1 \neq \mu_2$	$H_A : \mu_1 \neq \mu_2$
$H_{A_1} : \mu_1 > \mu_2$	$H_{A_1} : \mu_1 - \mu_2 > 0$
$H_{A_2} : \mu_1 < \mu_2$	$H_{A_2} : \mu_1 - \mu_2 < 0$
↔	
Estadístico de prueba de $H_0$	
$x_1, x_2, \dots, x_n$ m. a. s. de $N(\mu_1, \sigma^2)$ $y_1, y_2, \dots, y_m$ m. a. s. de $N(\mu_2, \sigma^2)$	
Independientes	
$t_0 = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{(n-1)S_x^2 + (m-1)S_y^2}{(n+m-2)} \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right)}}$	

Fuente: Navarro Luis, clases de estadística Curso de titulación (2010).

Se prueba la hipótesis nula contra la hipótesis alternativa, Anderson Darling propone un método para probar la hipótesis  $H_0$ .

Una medida cuantitativa para la calidad del ajuste de los datos a la distribución normal la proporciona un valor probabilístico  $p$  (p-valor del inglés p-value). Si  $P$ -valor es menor que 0.05 se rechaza la hipótesis nula.

### **2.3 EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS**

La evaluación de la superficie de rodadura se realiza tomando en cuenta diferentes índices como el de Serviciabilidad Presente (PSI), evaluado a partir de la rugosidad de la superficie del pavimento, empleando equipos como el MERLIN o el Bump Integrator. Actualmente el Instituto de Investigación y el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FIC – UNI, ha concluido un equipo sistematizado de toma datos para evaluar la rugosidad, el mismo que deberá calibrarse.

Por otro lado para conocer las condiciones que presenta la superficie de los pavimentos, se realiza los relevamientos de fallas, de los cuales el Índice de la Condición del Pavimento (PCI), permite una evaluación más completa ya que corresponde a un método cualitativo y cuantitativo, muy útil para los metrados y determinación del presupuesto de obra. Éste método frente a los recomendados por el MTC, permiten evaluar el concepto de vida remanente y rehabilitación, además de determinar la frecuencia de evaluación necesaria para carreteras de diferentes categorías, según su prioridad y tiempo de servicio.

Así también la superficie del pavimento está estrechamente relacionada con su tracción la cual refleja el agarre de la llanta al pavimento, éste último permitirá evaluar la condición de la vía frente al patinaje que pudiera sufrir el vehículo.

De lo descrito, la evaluación de la superficie de pavimentos presenta los siguientes aspectos:

- 1) Determinación de las fallas, severidad y extensión, utilizando el Índice de Condición del Pavimento
- 2) Serviciabilidad del pavimento, transitabilidad a través del Índice de Rugosidad Internacional y el Índice de Serviciabilidad del Pavimento.
- 3) Seguridad del pavimento, riesgos de patinaje.

De acuerdo a la AASHTO, la serviciabilidad es la capacidad de un pavimento de brindar una circulación suave, confortable y segura para el tráfico del cual ha

sido diseñado, por ello su apreciación depende del usuario, de las características propias del vehículo, de la velocidad de operación y de la condición del pavimento. El estado superficial o transitabilidad según los valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) a nivel de la superficie de rodadura asfaltada, clasifican el estado de la superficie del pavimento de acuerdo al cuadro 2.1.

Cuadro 2.1: Estado Superficial en Función del IRI.

IRI	ESTADO
< 3	Bueno
3 – 4	Regular
4 – 6	Malo
6 – 10	Pésimo

Fuente: Tesis de Maestría, Ing. José Wilfredo Gutierrez Lázares FIC - UNI

**2.3.1 Evaluación superficial.** En la norma de ensayo ASTM E 867-06 Standard Terminology Relating to Vehicle - Pavement Systems, se define el concepto de Roughness como: "Desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de manejo, cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, el perfil longitudinal, perfil transversal."

En la década de los 70's, el Banco Mundial financió diferentes programas de investigación a gran escala, entre los cuales se encontraba un proyecto relacionado con la calidad de las vías y los costos a los usuarios, a través del cual se detectó que los datos de rugosidad superficial de diferentes partes del mundo no podían ser comparados. Aún datos de un mismo país no eran confiables, debido a que las mediciones fueron realizadas con equipos y métodos que no eran estables en el tiempo.

Con el objetivo de unificar los parámetros que se utilizaban en diferentes países para determinar la regularidad superficial de las carreteras, se realizó en Brasil en 1982, el proyecto International Road Roughness Experiment (IRRE), promocionado por el Banco Mundial; en el cual participaron equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica. En este proyecto se realizó la medición controlada de la rugosidad superficial de pavimentos para vías bajo diferentes condiciones y con una variedad de instrumentos y métodos. A partir de dicho proyecto, se seleccionó un parámetro



de medición de la regularidad superficial denominado Índice de Rugosidad Internacional (IRI, International Roughness Index).

De esta manera se definió como: "El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie de camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico, está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas (RARS80, Reference Average Rectified Slope, razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida) producto de la simulación del modelo de cuarto de carro, (RQCS, Reference Quarter Car Simulation), para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h". En términos más sencillos, el IRI es un modelo matemático, el cual calcula el movimiento acumulado en la suspensión de un vehículo de pasajero típico, al recorrer una superficie del camino a una velocidad de 80 km/h.

**2.3.2 Rugosidad.** No hay una definición sencilla y estándar de rugosidad pero podemos utilizar la que menciona la American Society of Testing and Materials (ASTM) que dice: "Es la desviación de la superficie del pavimento respecto de una superficie plana verdadera con las dimensiones características que afectan la dinámica del vehículo y calidad de recorrido".

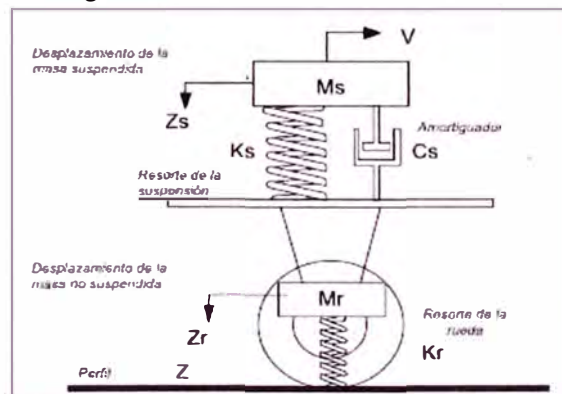
La rugosidad es un dato empleado en el inventario vial que permite calificar el estado o condición funcional de la vía y permite el cálculo de los costos de operación del usuario. El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) es el parámetro más recomendado por el Banco Mundial y es el más difundido actualmente para la medición de la rugosidad en pavimentos.

El concepto de Serviciabilidad ha sido desarrollado en la AASHTO Road Test y se define en relación con el propósito para el que fue construido el pavimento y asegurar una circulación suave, cómoda y segura.

**2.3.3 Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI).** El cálculo del IRI involucra la utilización de herramientas matemáticas, estadísticas y computacionales que permiten derivar la medida de rugosidad asociada a la vía; lo cual contempla etapas claramente diferenciadas y ajustadas a un desarrollo sistemático. El primer paso del procedimiento para el cálculo del IRI, y el más importante de todos, consiste en medir las cotas o elevaciones de terreno que permiten representar el perfil real del camino. Esto significa que, el IRI es

independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil, y dependerá únicamente de la calidad del perfil longitudinal. Estos datos son sometidos a un primer filtro, en el cual se realiza un análisis estadístico (media móvil) y adecuaciones matemáticas, para poder generar un nuevo perfil que permite ser analizado desde el punto de vista de las irregularidades que se pudieran observar. Al nuevo perfil generado se le aplica un segundo filtro, el cual consiste en la aplicación de un modelo de cuarto de carro que se desplaza a una velocidad de 80 km. A través de éste, se registran las características asociadas al camino basadas en los desplazamientos verticales inducidos a un vehículo estándar, el cual es modelado de forma simplificada como un conjunto de masas ligadas entre sí y con la superficie de la carretera, mediante resortes y amortiguadores. El movimiento sobre el perfil de la carretera produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las masas, que nos lleva a medir los movimientos verticales no deseados atribuibles a la irregularidad del camino.

Fig. 2.4. Modelo de cuarto de carro



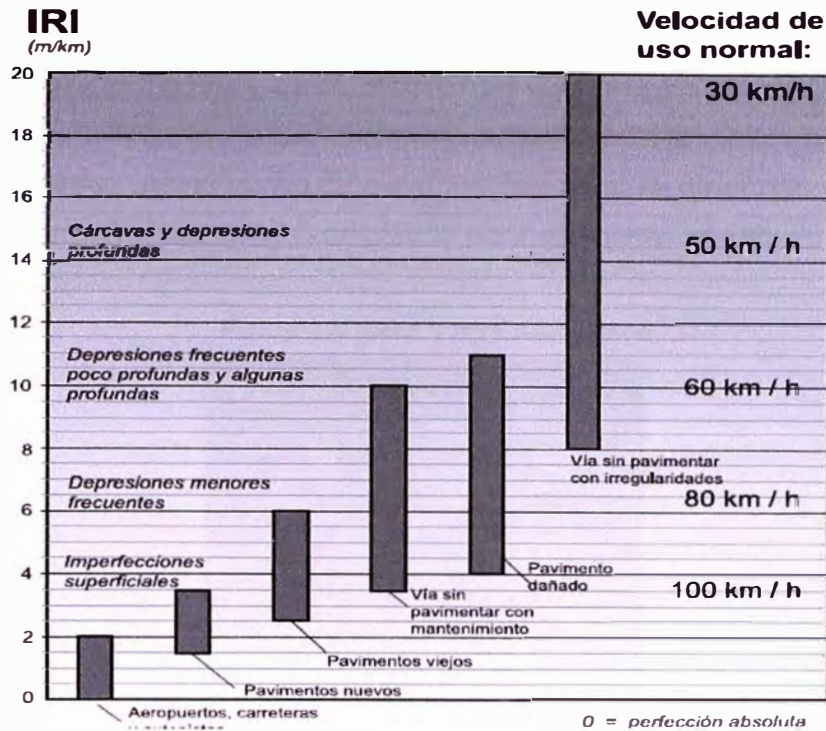
Fuente: De Solminihac, H. Presentación Power Point. Planificación y Gestión Vial. 2006

El modelo de simulación consta de una masa "amortiguada o suspendida" (masa de un cuarto de carro ideal) conectada a una masa "no amortiguada" (eje y neumático), a través de un resorte y un amortiguador lineal (suspensión), y por último el neumático es representado por otro resorte lineal.

Las ecuaciones dinámicas presentes en el modelo, forman un sistema de ecuaciones que utilizan como dato de entrada el perfil de la carretera (en la parte inferior del "resorte del neumático"). El movimiento vertical del eje respecto a la masa suspendida, se calcula y acumula. El valor en  $m/km$  es la medida final de la regularidad del camino.



Fig. 2.5 Escala estándar para la cuantificación del IRI



Fuente: Adaptada de UMTRI Research Review, Vol. 33. Número 1. Enero-Febrero 2002

Para caminos pavimentados, el rango de la escala del IRI es de 0 a 12 m/km, donde 0 representa una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable; para vías no pavimentadas la escala se extiende hasta el valor de 20. El perfil real de una carretera recién construida tiene un estado cero, pero se define por su IRI inicial mayor a cero, debido principalmente a que alcanza valores de IRI = 0 es sumamente difícil desde el punto de vista constructivo. Una vez puesta en servicio, la regularidad del pavimento se modifica lentamente en función del paso del tránsito.

**2.3.4 Equipos existentes para la medición de la regularidad superficial.** De acuerdo con la clasificación del Banco Mundial los métodos para la medición de la rugosidad se agrupan en 4 clases, siendo los de Clase 1 los más exactos (Mira y Nivel, TRRL Beam, perfilómetros estáticos). La Clase 2 agrupa a los métodos que utilizan los perfilómetros estáticos y dinámicos, pero que no cumplen con los niveles de exactitud que son exigidos para la Clase 1. Los métodos Clase 3 utilizan ecuaciones de correlación para derivar sus resultados a la escala del IRI (Bump Integrator, Mays meter). Los métodos Clase 4 permiten

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

- Nivel y mira topográfica. Es la manera más conocida para la medición del perfil longitudinal. El equipo consiste en una mira de precisión, graduada con unidades convenientes de elevación (típicamente divisiones de cm o pies), y un nivel topográfico empleado para establecer el dato de la línea horizontal.

Figura 2.6 Nivel y mira topográfica



Fuente: Internet

- Equipo MERLIN. El método de medición que utiliza el MERLIN, por haber sido diseñado este equipo como una variación de un perfilómetro estático y debido a la gran exactitud de sus resultados, califica como un método Clase 1.

Figura 2.7 Equipo MERLIN



Fuente: Ventura, J. Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI). 2005

- **Perfilógrafos.** Los perfilógrafos tienen una rueda sensible, montada al centro del marco para mantener el movimiento vertical libre. La desviación de un plano de referencia, establecido por el marco del perfilógrafo, se registra (automáticamente en algunos modelos) en papel según el movimiento de la rueda sensible. Se pueden encontrar en una gran variedad de formas, configuraciones y marcas.

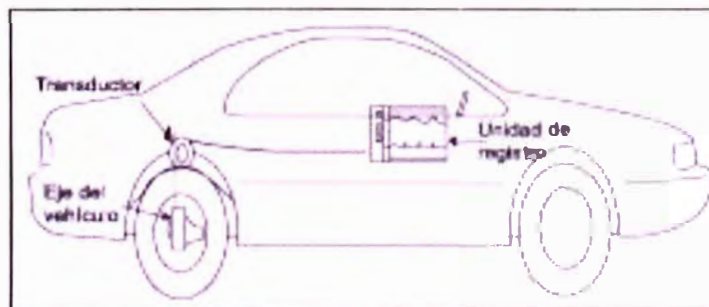
Fig. 2.8 Perfilógrafo California



Fuente: Romaro Internacional, S.A. de C.V.

- **Equipos Tipo Respuesta (RTRRMS)** .Los equipos RTRRMS operan a la velocidad normal de circulación de una carretera. Miden los movimientos verticales del eje trasero del automóvil o el eje del remolque respecto al marco del vehículo. De esta manera el equipo mide la respuesta (rebote) del vehículo a la regularidad del camino, por lo que no es realmente una medida verdadera de la lisura de la superficie.

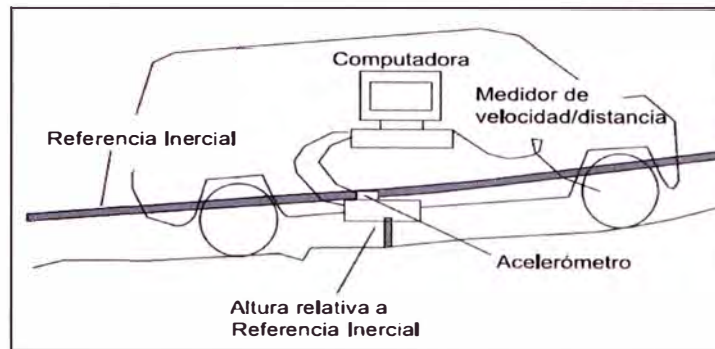
Fig. 2.9. Componentes de equipos de respuesta



Fuente: Adaptado de "A synopsis on the current equipment used for measuring pavement smoothness"

- **Perfilómetro Inercial.** Son equipos de alto rendimiento que producen medidas automáticas y de alta calidad del perfil del camino. Las mediciones son independientes de cualquier variación en el peso y velocidad del vehículo, temperatura, color y textura del pavimento.

Fig. 2.10 Componentes de equipos de referencia inercial



Fuente: Adaptado de "A synopsis on the current equipment used for measuring pavement smoothness"

## 2.4 RUGOSÍMETRO BUMP INTEGRATOR

**2.4.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BUMP INTEGRATOR.** Un método para la determinación de la rugosidad del camino es aquel que se obtiene con un instrumento tipo respuesta el cual va montado en un vehículo, el instrumento ampliamente empleado en nuestro país es el Bump Integrator. El sistema está constituido por: un vehículo con eje posterior transversal sólido instalado con el equipo Bump Integrator, capaz de registrar el movimiento del eje posterior mientras se desplaza por la carretera; así como un contador que registra las cuentas en unidades de medida.

Este instrumento registra la dislocación del chasis del vehículo con respecto al eje trasero en una distancia determinada, expresada por lo general en términos m/km.

Puesto que cada vehículo responde de modo diferente a la rugosidad debido a su propio sistema de suspensión y como es sabido éste cambia en un cierto plazo por el desgaste, es necesario calibrar el vehículo contra una medida estándar de la rugosidad.

Es también necesario seguir ciertos principios para conducir el examen y así asegurarse de que los resultados sean válidos.

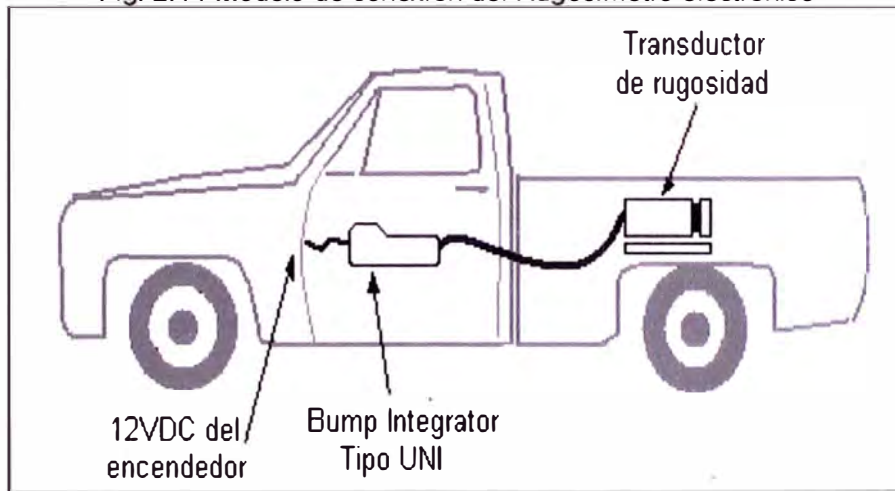
Un instrumento bien calibrado de la rugosidad que funciona correctamente dará datos exactos a un costo muy bajo. Sin embargo, un instrumento mal calibrado dará no solamente datos cuestionables, sino se puede conducir a decisiones erróneas.



El Rugosímetro Electrónico Bump – Integrator Tipo UNI (REBITU), es un equipo diseñado para medir la rugosidad de pavimentos y está conformado por un adquiridor de datos y un sensor de desplazamiento.

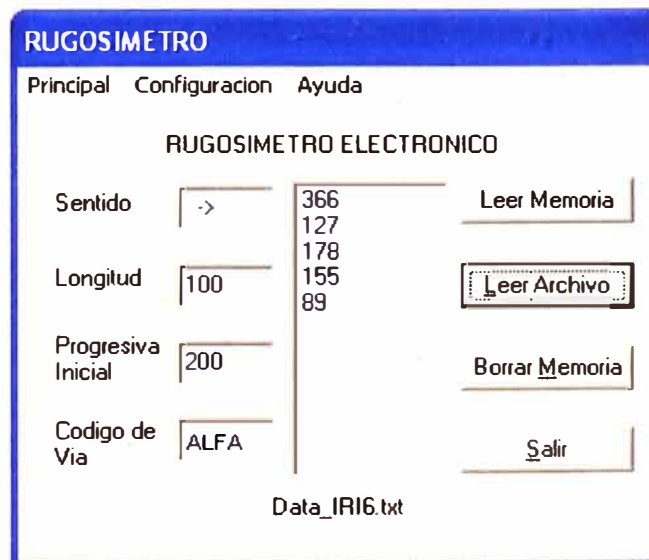
El REBITU va instalado en el eje posterior transversal de un vehículo. El desplazamiento del vehículo sobre la carretera produce desplazamientos en el eje posterior del vehículo debido a la irregularidad del asfalto, el equipo registra y acumula estos desplazamientos verticales, en la Figura 2.3 se detalla un esquema de cómo se deberá de instalar el equipo para su utilización.

Fig. 2.11 Modelo de conexión del Rugosímetro electrónico



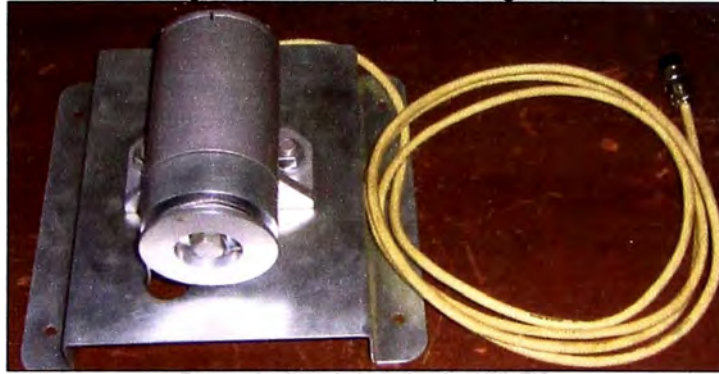
Fuente : Instituto de Investigacion UNI- FIC.

Fig. 2.12 Software de comunicación para el rugosímetro electrónico



Fuente : Instituto de Investigacion UNI- FIC.

Fig. 2.13 Unidad Bump Integrator



Fuente : Instituto de Investigacion UNI- FIC.

Fig. 2.14 Unidad de adquisición de datos de Rugosímetro Bump integrator.



Fuente : Instituto de Investigacion UNI- FIC.

## 2.5 EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD CON EQUIPO BUMP INTEGRATOR

El sistema está constituido por un vehículo con un eje posterior transversal sólido instalado con el equipo Bump Integrator, capaz de registrar el movimiento del eje posterior mientras se desplaza por la carretera; así como de un contador que registra estos desplazamientos. Este instrumento registra la dislocación del chasis del vehículo con respecto al eje trasero en una distancia determinada, expresada por lo general en términos de cantidades BI /Km. Puesto que cada vehículo responde de modo diferente a la rugosidad debido a su propio sistema de suspensión y como es conocido éste cambia en un cierto plazo por el desgaste, es necesario calibrar el vehículo contra una medida estándar de rugosidad.

### 2.5.1 El Vehículo. Tres tipos de vehículos pueden ser usados:

1. Un automóvil de pasajeros o camioneta ligera con un eje posterior rígido, un vehículo con suspensión posterior independiente no puede ser utilizado debido a que los movimientos de rotación pueden ser percibidos como rugosidad. Un vehículo de tracción se recomienda debido a la masa del eje es mas compatible con el estándar, muelles helicoidales son preferibles a las hojas de ballesta, porque tienen menos fricción de Coulomb.
2. Un remolque de dos llantas, el remolque debe de tener un eje rígido, la configuración real del tracto del vehículo no es crítico, pero el tracto del mismo vehículo debe ser usado siempre entre calibraciones, ya que sus medidas influyen en la medida del ARS. Si se sustituye el tracto del vehículo el STRMRV debe de ser recalibrado.
3. Un remolque con una llanta, al igual que el remolque con dos llantas, la calibración es necesaria si se cambia el tracto del vehículo, el enganche debe de tener disposición en mantener el remolque en posición vertical durante su uso.

Fig. 2.15 Foto de la camioneta usada para la evaluación.



Fuente: Visita a campo

**2.5.2 Instalación del instrumento en el vehículo.** El Bump Integrator se instala en la parte trasera del vehículo por encima de la suspensión trasera. El instrumento está montado en el piso del vehículo y un cable se conecta a la suspensión.

Hay varias configuraciones diferentes para la instalación de la Bump Integrator en un vehículo:

**1.- Eje trasero sólido:** Si el vehículo tiene un eje trasero sólido que debe ser instalado sobre el centro del eje. Esto medirá lo que se denomina una rugosidad de “medio carro”.

**2.- Suspensión trasera independiente:** Si hay una suspensión trasera independiente, es recomendable que las dos unidades Bump Integrator sean instalados como: una para cada línea de rueda. Cada uno de estos medirá un “cuarto carro”. El promedio de estos dos dará la rugosidad total.

**3.- Suspensión trasera independiente:** El uso de una unidad de Bump Integrator con una suspensión trasera independiente es posible, pero no se recomienda. Esto es porque el vehículo medirá un “cuarto carro”, pero la medición de rugosidad estará dominado por la rugosidad de una línea de rueda mas no por el promedio. Resultará difícil tener una buena calibración de la medida, porque las rugosidades variará entre líneas de rueda y entre secciones de prueba.

**2.5.3 Velocidad de Operación.** La velocidad estándar de obtención del IRI es 80km/h. El IRI numérico está diseñado para que coincida con el funcionamiento normal de un STRMRV, cuando funciona a ésta velocidad, por lo que la reproducibilidad asociada con un STRMRV es generalmente mejor cuando ésta velocidad es alcanzada. La medida obtenida del ARS por un STRMRV son de velocidad dependiente, por lo que los operadores de los instrumentos deben de apreciar la importancia de hacer toda medición a la misma velocidad, hay situaciones, sin embargo donde una menor velocidad es necesaria.

La solución recomendada para los problemas relacionados con los mecanismos frágiles o incompatibles es sustituir el vehículo y/o instrumento con alguno que sea más resistente, si alguna de estas condiciones son inevitables para más que unas pocas secciones entonces una velocidad menor estándar puede ser adoptada para todas las medidas del STRMRV (velocidades menores de 50 a 32 Km./h son recomendadas). La referencia de calibración es aún la misma que



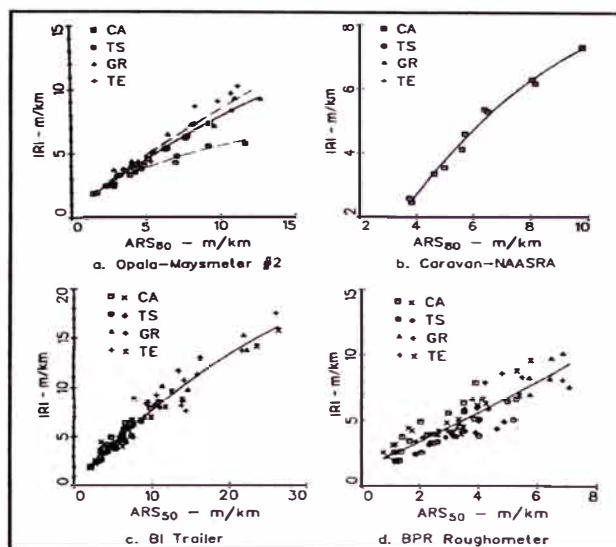
para velocidades de 80 Km./h con diferencia de que el STRMRV funciona a la velocidad seleccionada.

**2.5.4 Calibración.** Debido a que el comportamiento de respuesta de un STRMRV particular es único y variable en el tiempo, el sistema debe calibrarse cuando sea inicialmente puesto en servicio y periódicamente durante su uso. La calibración se realiza mediante la obtención de las medidas de rugosidad en las secciones de calibración (los desplazamientos/Km. u otro número similar producido como salida del instrumento). Estas son secciones de carretera que tienen valores de rugosidad IRI conocido determinados con métodos clase 1 o 2 (mira y nivel o un perfilómetro como el MERLIN). Cuando la velocidad estándar de 80 Km./h no puede ser alcanzada como en superficies rugosas una velocidad recomendada es de 50 Km./h. o 32 Km./h, pero velocidades menores deben ser evitadas debido a que el promedio de pendiente ARS sufre un efecto considerable en las propiedades envueltas de la llanta usada en el STRMRV.

Los datos de las secciones de calibración son usados para la regresión del IRI contra las mediciones del STRMRV. Reduciendo al mínimo el error entre los valores de IRI referencial y los valores estimados del STRMRV usando una ecuación de calibración. Cuando se utiliza una sola huella la regresión es calculada en base de la medida individual de la huella de la llanta. Cuando se usan dos huellas, el IRI es medido para ambas huellas de la llanta del STRMRV y estos dos son promediadas. El promedio es entonces usado como una sola medida de IRI para ese carril.

Para que una calibración sea válida, las secciones de calibración a ser inspeccionadas en el proyecto deben ser representativas de la carretera. Cuando sea posible, las secciones deben encontrarse en tangente o baja curvatura, sólo en excepcionales circunstancias pueden hasta una ligera curvatura ser aceptadas y deben de tener propiedades de rugosidad uniformes en toda su longitud incluyendo una ventaja de 50 m al inicio y al final, cuando se utilizan secciones para proyectos de largo plazo, las secciones de calibración deberán ser ubicadas en vías poco usadas cuyas propiedades de rugosidad no cambiarán rápidamente con el tiempo.

Fig. 2.16 Ejemplos de Gráficas IRI – Valores STRMRV



Fuente: Directrices para la Medición y Calibración de Medidas de Rugosidad en Vías, Banco Mundial.

La carretera no necesita estar a nivel, pero ésta puede cambiar en pendiente inmediatamente antes del sitio, como la transición en pendiente puede afectar la medida de un STRMRV, suave pendientes también facilitan el mantenimiento de pruebas a velocidad constante y reduce el esfuerzo necesario para manualmente medir el perfil con mira y nivel. En orden a ser la ecuación de calibración, ésta deberá estar basada en una cantidad suficiente de datos de ensayos, el Cuadro N° 2.3 se da en la lista los requerimientos mínimos concernientes al número de secciones y sus longitudes.

Cuadro 2.2 Requerimientos de las Secciones de Calibración

Descripción	Dos Huellas	Una Huella
Número mínimo de secciones	8	12
Número de secciones recomendados por cada nivel	2	3
Máxima variación en el número de secciones	1	1
Longitud mínima de sección	200 m	200 m
Variación permisible en la longitud de secciones	0	0
(Todos las secciones deben de ser de la misma longitud)		
Longitudes total recomendada	4.50 Km.	6.0 Km.
(Longitud de sitio x número de secciones)		
Número recomendado de repeticiones STRMRV	1000/L	1000/L
Medidas por sitio (L = Longitud en metros)		
Mínima distancia de aproximación por sitio	50 m	50 m

Fuente: Directrices para la Medición y Calibración de Medidas de Rugosidad en Vías Banco Mundial.

## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE DISCRIMINACIÓN DE DATOS.

### 3.1 APLICACIÓN AL TRAMO EN ESTUDIO.

La metodología de discriminación de datos será aplicada al tramo de estudio correspondiente desde el 74+000 KM al 84+000 KM de la carretera Cañete Chupaca y consistirá básicamente en la recopilación, análisis y procesamiento de los datos obtenidos de antecedentes más lo obtenido en el tramo de prueba actual, obteniendo parámetros estadísticos útiles para la toma de decisiones. Por tanto se usufructuara todas las herramientas estadísticas vistas en el capítulo II Este proceso va involucrar en esencia:

1. Sectorización (números de secciones, número de datos por sección).
2. Homogenización de tramos.
3. Identificación de errores e intervalos de confianza para la data histórica que sirva para la elaboración de curva de deterioro.

Con la salida de campo al tramo de la carretera en estudio se procede a la evaluación de la rugosidad mediante la siguiente metodología.

- **Ubicación y Trazos:** Antes de iniciar las mediciones, se identificó las singularidades existentes (gibas, badenes, puentes y otros) teniendo ubicadas las progresivas en donde se encuentran además de realizar la sectorización de los 10km en estudio en tramos de 400m en los trayectos lineales libres de irregularidades y en tramos en 100m para los trayectos en curvas con presencia de irregularidades. Anteriormente se consideraba para la evaluación con equipo Bump Integrator solo tramos de 400 metros y en trayectos que sean los más rectos posibles dado que la precisión en la evaluación en tramos curvos e irregulares bajaba considerablemente sin embargo esto se puede resolver tramificando en estos sectores críticos con tramos de 100m.
- **Instalación de Equipo.** Se procede a instalar el equipo Bump Integrator en la camioneta que ha sido proporcionada, como se ha utilizado el equipo REBITU se deberá de proceder como se indican en sus especificaciones.

- **Medición.** Teniendo el equipo instalado, los tramos a medir y las singularidades identificadas y debidamente señalizadas, se procede a hacer las mediciones para lo cual se deberá de tener a lo más 3 personas en el vehículo, un apuntador un chofer y uno que realiza la lectura, movilizándolo el vehículo a una velocidad de 40km/h constante.

**3.2 RECOPIACIÓN DE DATOS.** Esta etapa consiste en reunir toda la información existente en el proyecto o en oficinas vinculadas a él, sobre las evaluaciones anteriores ejecutadas en la carretera y también sobre normas y/o manuales de diseño de carreteras de BVT (etapa heurística). No obstante, para esta trabajo de investigación la información importante que se pudo obtener, fue la evaluación de la rugosidad para el mismo tramo en estudio (del kilómetro 74 al 84) llevada a cabo en el año 2009, la cual iba servir para contrastarla con los valores de rugosidad obtenidos en el año actual y de esa forma observar la evolución del deterioro del tramo en estudio.

**3.2.1 Recopilación de Datos del BI/IRI 2009.** En el curso de titulación del año 2009 fue realizada la evaluación de la rugosidad con el equipo Bump Integrator para los tramos 74+000 al 79+000 KM y 79+000 al 84+000 KM por los señores Pedro Álvarez y Jorge Quillas respectivamente. Tal información es el único antecedente para el tramo en estudio específico el cual justamente es del Kilometro 74 al Kilometro 84 de la Carretera Cañete – Chupaca. A continuación se muestra el detalle de estos resultados tanto en unidades BI y luego en unidades IRI.

Cuadro 3.1 Valore BI recopilados del 2009 del tramo 74-79 Km

SUBTRAMO Km	SENTIDO DE MEDICION			
	IDA		RETORNO	
	1º	2ª	1º	2ª
74-75	2589	2601	2595	2693
75-76	2212	2239	2073	1978
76-77	2361	2539	2073	2198
77-78	2242	2348	2225	2424
78-79	1833	1807	1861	1989

Fuente: Álvarez Pedro, Informe de suficiencia UNI-FIC 2009

En el cuadro 3.1 se observa los valores en unidades BI dadas por el equipo Bump integrator los cuales con la ecuación de calibración

$IRI = 0.0018 \times BI - 0.491$  se obtiene finalmente los valores IRI relativos para cada kilometro del tramo en estudio.

Cuadro 3.2 Valores IRI recopilados del 2009 del tramo 76-84 Km

SUBTRAMO Km	SENTIDO DE MEDICION				IRI Promedio
	IDA		RETORNO		
	1º	2ª	1º	2ª	
74-75	4.17	4.19	4.18	4.36	4.22
75-76	3.49	3.54	3.24	3.07	3.33
76-77	3.76	4.08	3.24	3.47	3.64
77-78	3.54	3.74	3.51	3.87	3.67
78-79	2.81	2.76	2.86	3.09	2.88

Fuente: Álvarez Pedro, Informe de suficiencia UNI-FIC 2009

Cuadro 3.3 Valores BI recopilados del 2009 del tramo 79 al 84 Km.

SUBTRAMO Km	SENTIDO DE MEDICION			
	IDA		RETORNO	
	1º	2ª	1º	2ª
79-80	3276	3336	3470	3358
80-81	3115	2961	2964	2948
81-82	3162	3113	2790	3072
82-83	2157	--	1995	--
83-84	2035	--	1954	--

Fuente: Quillas Jorge, Informe de suficiencia UNI-FIC 2009.

En el cuadro 3.3 se observa los valores en unidades BI dadas por el equipo Bump Integrator los cuales con la ecuación de calibración  $IRI = 0.0005 \times BI + 3.1848$  se obtiene finalmente los valores IRI relativos para cada kilometro del tramo en estudio.

Cuadro 3.4 Valores IRI recopilados del 2009 del tramo 79 al 84 Km.

SUBTRAMO Km	SENTIDO DE MEDICION				IRI Promedio
	IDA		RETORNO		
	1º	2ª	1º	2ª	
79-80	4.82	4.85	4.92	4.86	4.86
80-81	4.74	4.67	4.67	4.66	4.68
81-82	4.76	4.74	4.58	4.72	4.7
82-83	4.26		4.18		4.22
83-84	4.2		4.16		4.18

Fuente: Quillas Jorge, Informe de suficiencia UNI-FIC 2009.

**3.2.2 Recopilación de Datos del BI/IRI 2010.** Con la salida de campo al tramo de la carretera en estudio se procedió a la evaluación de la rugosidad mediante la metodología señalada anteriormente:

- **Ubicación y Trazos:** Se identificó las singularidades existentes (gibas, badenes, puentes y otros) señalando las progresivas en donde se encuentran, además de realizar la sectorización de los 10km en estudio en tramos de 400m en los trayectos lineales libres de irregularidades y en tramos en 100m para los trayectos en curvas con presencia de irregularidades.
- **Instalación de Equipo.** Se instaló el Equipo Bump Integrator en la camioneta que ha sido proporcionada, como se ha utilizado el equipo REBITU se deberá de proceder como se indican en sus especificaciones.
- **Medición.** Teniendo el equipo instalado, los tramos a medir y las singularidades identificadas y debidamente señaladas, se procede a hacer las mediciones para lo cual se deberá de tener a lo más 3 personas en el vehículo, un apuntador un chofer y uno que realiza la lectura, movilizándolo a una velocidad de 40km/h constante. Para facilitar y agilizar las mediciones se dividieron los 10 km en dos subsectores los cuales fueron del 74-79 y 79-84 km. En el primer subsector se realizaron 6 pasadas tanto en la ida como en la vuelta con la camioneta y de la misma forma para el segundo subsector se realizaron 5 pasadas.

A continuación, en los cuadros 3.5 y 3.6 se muestra para los subsectores de los kilómetros 74-79 y 79-84 respectivamente los valores proporcionados por el equipo Bump Integrator en todo el proceso de la medición tanto en los sentidos de ida como de vuelta correspondientes a los sub-tramos de 400m y 100m según corresponda.



Cuadro 3.5 BI Recolectados en sub – tramo Progresiva km. 74 - 79

SUBTRAMOS	IDA							BUMP INTEGRATOR	UNIDADES BI	SUBTRAMOS	RETORNO						BUMP INTEGRATOR	UNIDADES BI				
	OBS	1#	2#	3#	4#	5#	6#				7#	OBS	1#	2#	3#	4#			5#	6#		
74+300	74+400			367	1041	1054	959	1310	957	1008	2016	74+100	74+300		294	231	357			238	280	2240
74+400	74+800			345	1001	934	715	843	843	813	1526	74+200	74+100		257	266	220			230	253	2026
74+300	75+200			352	535	944	838	895	907	879	1758	74+600	74+200		937	990	936			890	938	1877
75+200	75+600			725	710	735	650	765	923	758	1516	75+000	74+500		385	1001	755			937	907	1814
75+500	76+000			315	504	897	854	925		905	1811	75+400	75+300		763	746	400	703		712	666	1332
76+300	76+400			341	551	865	946			855	1710	75+800	75+400		840	799	858	798		846	836	1672
76+400	76+800			375	335		808	811		834	1567	76+200	75+300		895	1045	958	594		832	895	1790
76+300	76+900			245	182		229			220	1760	76+600	76+200		849	829	854	1017	746	815	852	1703
76+300	77+000			235	210		257			219	1749	77+000	76+500		849	889	752	554	852	750	831	1662
77+300	77+100		175	175	135		158	343		195	1557	77+100	77+300			174	159	189			187	1499
77+100	77+200	G	337	422	465		427	132		358	2366	77+200	77+100	G	341	390	356	357	171		323	2584
77+200	77+300	G	260	342	425		350	230		330	2542	77+300	77+200	G	333	400	307	324	458		364	2915
77+300	77+400		390	355	276	235	222	269		292	2335	77+400	77+300		231	200	233	207	241		222	1779
77+400	77+500		191	193	205	175	207	205		197	1573	77+500	77+400		247	210	247	212	240		231	1850
77+500	77+600		298	213	238	204	245	201		233	1865	77+600	77+500		234	228	212	217	252		231	1845
77+500	77+700	P	441	467	396	172	410	329		369	2355	77+700	77+600	P	423	397	445	380	405		411	3290
77+700	77+800		268	265	255	322	257	312		282	2253	77+800	77+700		203	234	242	267	204		230	1840
77+800	77+900		225	232	235	235	177	220		222	1772	77+900	77+800		162	185	151	191	114		169	1349
77+900	78+000		281	285	226	287	259	280		272	2172	78+000	77+900		199	212	221	222	134		210	1677
78+300	78+100	G	385		345	415	235	319		353	2521	78+100	78+300	G	322	363	344	405	359		359	2869
78+100	78+200		194	203	185	202	303			217	1739	78+200	78+100		175	218	206	219	217		207	1658
78+200	78+300		188	224	218	217	219	209		213	1700	78+300	78+200		322	315	457	297	329		346	2768
78+300	78+400		178	192	176	177	176	200		183	1465	78+400	78+300			200	154	215	138		199	1594
78+400	78+500	G	399	352	422		438	315		386	3091	78+500	78+400	G		413	356		332		400	3203
78+500	78+600			775	207	225	152	231		215	1716	78+600	78+500			190	239	405	126		240	1920
78+500	78+700				248	265	238	235		247	1972	78+700	78+600			177	157	356	221		215	1722
78+700	78+800	P				575		339		457	3556	78+800	78+700	P					339		399	3192
78+300	78+900	C				265		257		262	2392	78+900	78+800	C					453		463	3704
78+300	79+000	G																				

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.6 BI Recolectados en sub – tramo Progresiva km. 79 - 84

SUBTRAMOS		IDA					BUMP INTEGRATOR	UNIDADES B	RETORNO					BUMP INTEGRATOR	UNIDADES B		
		OBS	1º	2º	3º	4º			5º	OBS	1º	2º	3º			4º	5º
79+000	79+400		731	895	579	531	912	810	1619			1033	1102	1033	955	1031	2062
79+400	79+800		848	805	852	864	845	844	1687			904	867	911	898	895	1790
79+800	80+200		976	1115	1168	1006	982	988	1977			1015	993	1175	999	1002	2005
80+200	80+600		945	919	961	599	956	956	1912		792	793	699	781	805	775	1550
80+600	81+000			1028	1051	1078	1027	1045	2092		961	995	921	921	975	955	1910
81+000	81+400		996	1102	913	521	1028	992	1984			819	888	881	921	877	1755
81+400	81+800		912	871	955	882	927	905	1819			923	983	928	933	943	1886
81+800	82+200		927	899	1158	1017	942	985	1978			837	723	757	727	761	1522
82+200	82+600		1077	1021	777	890	822	918	1835		741	912	680	850	765	790	1579
82+600	82+700		247	162	144	154	332	177	1414		226	157	158	157	272	194	1552
82+700	82+800		318	288	296	218		305	2440			292	308	307	230	284	2274
82+800	82+900		724	244	240	232		360	2880		552	262	236	274	136	227	1816
82+900	83+000	B	415	821	836	792		716	5728	E	798	794	807	714	835	790	6317
83+000	83+100	B		484	514	514		504	4032	E	301	310	337	345		323	2586
83+100	83+200		269	250	258	176	265	244	1955		144	165	166	180		164	1310
83+200	83+300			308	302	220	284	304	2428		288	277	292	290		287	2294
83+300	83+400	G		393	379	354	206	333	2664	G	376	374	397	377		381	3048
83+400	83+500		212	218	232	219	230	222	1778		228	219	185	240		218	1744
83+500	83+600		254	254	239	247		249	1988		304	285	241	257		272	2174
83+600	83+700				254	258		256	2048			261	333	259		260	2080
83+700	83+800	G			387	406		397	3172	G		432	330	409		390	3123
83+800	83+900				200	199		200	1596			195	202	193		197	1573
83+900	84+000				96	90		93	744		180	92	97	111		100	803

Fuente: Elaboración propia

Donde la leyenda para los cuadros anteriores es:



Valor erróneo no tomar en consideración



Medidas en puntos como Giba, Puentes, rompemuelleres , etc.

P PUENTE

G GIBA

C CURVA

B BADEN

- Las marcas rojas indican el inicio el primer dato del archivo del Bump
- Las marcas verdes indican que el dato no se usa para calcular el promedio

Además:

Unidades BI = ( Bump Integrator x 0.8 x 1000 ) / Distancia medida

Donde:

0.8 es el Valor en milímetros equivalente a 1 cuenta del Bump Integrator

Distancia Medida es la distancia donde se midió con el Bump Integrator, en este caso 400 m y 100 m

### 3.3. ANÁLISIS DE DATOS.

**3.3.1 Análisis de errores.** Cuando se realizan mediciones repetidas con un instrumento, un resultado exacto no puede esperarse, porque el proceso de medición incluye los efectos aleatorios que varían de medición a medición. El nivel de repetición no siempre puede ser evidente, porque los instrumentos a menudo implican una cuantificación de la producción que enmarca los efectos de las variaciones pequeñas. En estos casos, la repetición se debe asumir que no es buena cuando el error alcanza la mitad del tamaño de cuantificación. Por ejemplo, un STRMRV que produce desplazamiento correspondiente a 3,0 mm. deberá tener un error de repetición como máximo de 1,5 mm.

Cuando se mide la rugosidad de la vía por la superficie del perfil longitudinal cuidadosamente, la precisión está limitada por:

1. Los instrumentos utilizados para medir el perfil.
2. La ubicación aleatoria de los puntos específicos a lo largo del ancho de vía donde se toman las medidas de elevación.
3. La selección de la parte aleatoria de la posición lateral de la huella de la llanta.



Los primeros dos errores se reducen mediante las especificaciones de mayor calidad del perfil (es decir, medidas de elevación más precisas y puntos de prueba más próximos entre sí). Cuando estas fuentes de errores son controladas, entonces la imprecisión asociada con la ubicación de la huella de la llanta se convierte en el factor más importante, que representa las variaciones de hasta un 5% cuando la longitud de la huella de llanta es de 320 m.

Al medir la rugosidad con un STRMRV, las repeticiones son afectadas por la variación parcialmente aleatoria en la posición lateral del STRMRV en la vía, y también por otros factores aleatorios tales como variaciones en la operación de la velocidad y cambios menores en la dinámica de los vehículos que ocurren en lapsos de tiempo corto, estas fuentes de variabilidad pueden ser mantenidas al mismo nivel que para la medición de perfiles directamente con la operación de cuidado. Los errores de repeticiones son básicamente de naturaleza aleatoria y por lo tanto pueden ser controlados por la ampliación del proceso de medición a fin de cancelar los errores aleatorios con el promedio. Esto puede ser logrado simplemente usando secciones de suficiente longitud.

Una segunda forma de promedio se obtiene mediante mediciones repetidas en el mismo sitio de prueba, en este tipo, errores de repeticiones puede ser reducidos a secciones cortas que son de longitud suficiente para un promedio. En general el error de repeticiones es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la longitud total cubierta, donde la longitud total es la suma de las veces de longitud muestreada en el sitio, así el error esperado en un sitio de 1,6 Km. De longitud es el mismo para un sitio de 320 m. con 5 mediciones, como regla una longitud de 1.6 Km. o más se recomienda para minimizar el error de repeticiones de los instrumentos utilizados a altas velocidades.

Otro factor importante es lo referente a los sentidos de las mediciones (ida y vuelta) y la coincidencia de la ubicación de las huellas que sirven como sitio de medición tanto por el Bump Integrator y como por el equipo MERLIN, no hay una normativa al respecto, solo las experiencias del MTC que sugieren recomendaciones al respecto. En el presente trabajo dadas las condiciones se presentaría un error de tipo sistemático debido a la contrastación de valores de rugosidad se da por un lado con el equipo MERLIN en una huella derecha en un solo sentido mientras que con el Bump Integrator se da en huella central y en ambos sentidos.

Cuadro 3.7 1ra discriminación de datos para el sub – tramo km. 74-79

SUBTRAMOS		IDA							SUBTRAMOS		RETORNO						
		OBS	1'	2'	3'	4'	5'	6'			7'	1'	2'	3'	4'	5'	6'
74+000	74+400			967	1041	1054	969			74+100	74+000	294	231	357			238
74+400	74+800			845			715	843	849	74+200	74+100		766	770			790
74+800	75+200			852	839	944	838	895	907	74+600	74+200	937	990	936			890
75+200	75+600			725	710	739	680	765	928	75+000	74+600		1001	755			987
75+600	76+000			916	904	897	884	926		75+400	75+000	768	746		703		712
76+000	76+400			841		869				75+800	75+400			898	798		846
76+400	76+800			876	839		808	811		76+200	75+800	895	1045	958			882
76+800	76+900			249	182		229			76+600	76+200	849	829	854		746	815
76+900	77+000			239	210		207			77+000	76+600	849	889	782	854	862	750
77+000	77+100		173	175	139		138	348		77+100	77+000		174	199	189		
77+100	77+200	G								77+200	77+100						
77+200	77+300	G								77+300	77+200						
77+300	77+400		390	355	276	239	222	269		77+400	77+300	231	200	233		241	
77+400	77+500		191	193	205	178	207	206		77+500	77+400	247	210	247	212	240	
77+500	77+600		298	213	238	204	245	201		77+600	77+500	234	228	212	217	262	
77+600	77+700	P								77+700	77+600						
77+700	77+800		268	266	255	322	267	312		77+800	77+700	203	234	242		204	
77+800	77+900		225	232	239	236	177	220		77+900	77+800	162	185	191	191	114	
77+900	78+000		281	286	226	287	269	280		78+000	77+900	199	212	221	222	194	
78+000	78+100	G								78+100	78+000						
78+100	78+200		194	203	185	202	303			78+200	78+100	176	218		219	217	
78+200	78+300		188	224	218	217	219	209		78+300	78+200	322	315		297	329	
78+300	78+400		178	192	176	177	176	200		78+400	78+300		200	194	215	188	
78+400	78+500	G								78+500	78+400						
78+500	78+600				207	228	192	231		78+600	78+500		190			126	
78+600	78+700				248	265	238	235		78+700	78+600		177	107		221	
78+700	78+800	P								78+800	78+700					399	
78+800	78+900	C								78+900	78+800					463	
78+900	79+000	G															

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.8 1ra discriminación de datos para el sub – tramo km. 79 - 84

SUBTRAMOS		OBS	IDA					RETORNO				
			1°	2°	3°	4°	5°	1°	2°	3°	4°	5°
79+000	79+100		731	895	579	931	912		1033	1102	1033	955
79+400	79+800		848	805	852	864	849		904	867	911	898
79+800	80+200		976			1006	983		1015	993		999
80+200	80+600		945	919	961	999	956	792	798	699	781	805
80+600	81+000			1028	1051	1078	1027	961	996	921	921	975
81+000	81+400		996	1102	913	921	1028		819	888	881	921
81+400	81+800		912	871	955	882	927		928	983	928	933
81+800	82+200		927	899	1158	1017	943		837	723	757	727
82+200	82+600		1077	1021	777	890	823	741	912	680	850	765
82+600	82+700		247	162	144	154		226	157	158	157	272
82+700	82+800		318	288	296	318			292	308	307	230
82+800	82+900		724	244	240	232			262	236	274	136
82+900	83+000	B										835
83+000	83+100	B										
83+100	83+200		269	250	258	176	269	144	165	166	180	
83+200	83+300			308	302	320	284	288	277	292	290	
83+300	83+400	G										
83+400	83+500		212	218	232	219	230	228	219	185	240	
83+500	83+600		254	254	239	247		304	285	241	257	
83+600	83+700				254	258			261		259	
83+700	83+800	G										
83+800	83+900				200	199			195	202	193	
83+900	84+000				96	90			93	97	111	

Fuente: Elaboración propia.



**3.3.2 Calibración del Equipo.** Para este proceso, lo ideal es contar con un mínimo de 3 secciones que reflejen los estados bueno, regular y malo. Para este caso se eligió 5 tramos representativos para la calibración que cuenten con la característica de ser lo más lineales posibles sin ningún tipo de irregularidad y con los datos de rugosidad IRI obtenidos por el grupo N°3 encargado de evaluar con el equipo MERLIN, se procede a calibrar los datos. Como se ilustra en el cuadro 3.9.

Cuadro 3.9 Calibración de los datos para la obtención de la ecuación de calibración.

TRAMO	BI prom	IRI prom
77+200-77+600	1829	3.13
79+400-79+800	1733	3.48
77+600-78+000	1799	3.46
79+800-80+200	1991	3.8
80+600-81+000	1991	3.88

Fuente: Elaboración propia

El detalle de todos los IRIs obtenidos para cada kilómetro del tramo en estudio por el grupo N°3 del Curso de titulación UNI-FIC 2010-II se muestra en el anexo C.

A continuación se procede a obtener las regresiones para las diversos tipos de graficas escogiendo la de mejor tendencia y mayor coeficiente de variación.

Fig 3.1 Regresion lineal

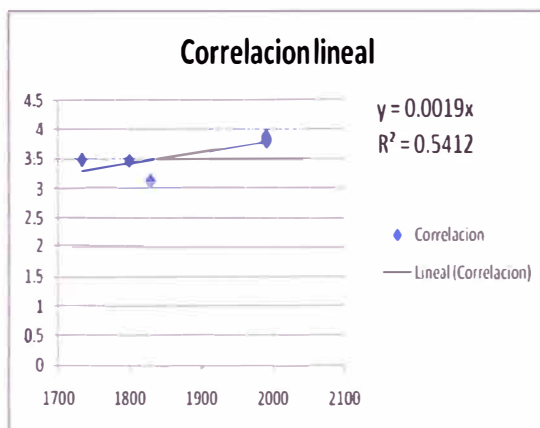


Fig 3.2 Regresion exponencial

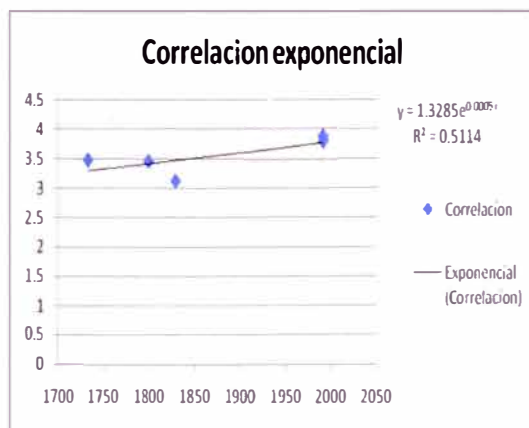
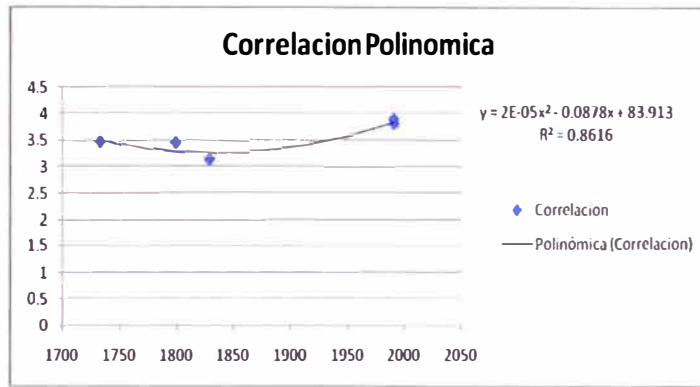


Fig 3.3 Regresión polinómica



Fuente: Elaboracion propia.

De las figuras 3.1 ,3.2 ,3.3 se considera a la curva de tendencia lineal para evaluar los datos obtenidos y como se observa el  $R^2$  es muy aceptable por lo tanto es aceptable utilizar la curva como apropiada.

Cuadro 3.10 Ecuación de calibración.

ECUACION DE CALIBRACION		
ECUACION	FORMULA	R <sup>2</sup>
LINEAL	IRI= 0.0019 x BI	0.5412

Fuente: Elaboración propia.

**3.4. PROCESAMIENTO DE DATOS.** Ya con la ecuación de correlación se pasa toda la data a valores IRI y se agrupa por kilómetros como se observa en los cuadros 3.11 y 3.12.

**3.4.1 Homogenización de Sub- tramos.** La Homogenización de la data de cada sub-tramo juega un papel relevante al momento de la toma de decisiones en cuanto a políticas de mantenimiento para este procedimiento se utilizara el programa Minitab especializado en estadística. Básicamente el proceso de homogenización consistirá en lo siguiente:

- a. En primer término, una vez agrupada la data en términos de IRI por kilometro como figura en el cuadro 3.14 se procede a realizar otra discriminación de datos que consiste en suprimir los valores de rugosidad de cada sub-tramo que notoriamente son datos alejados de la tendencia natural de toda los demás datos como los máximos y mínimos valores que por algún motivo y/o alteración fueron afectados en el proceso de

medición entonces los datos discriminados se observan en el cuadro 3.13.

- b. A continuación, toda la data se considera que presenta un comportamiento de una distribución normal, para esto se realiza el test de normalidad a cada grupo de datos, en el programa Minitab el cual utiliza la prueba de normalidad Anderson – Darling entonces si el parámetro P-valor resulta mayor a 0.05 se consideran de comportamiento normal caso contrario se concluye lo contrario.
- c. Luego viene la prueba de homogeneidad de varianzas la cual se aplica a tramos tomados de dos en dos, con lo cual si resulta P-valor mayor a 0.05 entonces se consideran varianzas homogéneas y el procedimiento consiste en configurar esto en la aplicación de la posterior prueba de hipótesis en el programa Minitab en caso contrario si resulta menor a 0.05 se considera varianzas diferentes entonces de la misma forma esto se debe configurar en el momento de la aplicación de esta prueba en el programa Minitab.
- d. Finalmente, después de haber realizado los pasos a y b se procede a la aplicación del test de hipótesis T – student para todos los tramos tomados de 2 en 2, con lo cual se realizara finalmente la homogenización de los tramos después de haber procesado absolutamente todos ellos. De la misma forma que las anteriores pruebas, si el parámetro P – valor es mayor a 0.05 se considera al conjunto de datos que se comporta estadísticamente igual de modo contrario se concluye que no son homogéneos.

Cuadro 3.11 Transformación de BI a IRI sub – tramo km. 74 - 79

SUBTRAMOS		IDA							SUBTRAMOS		VUELTA							TRAMOS KM	
		OBS			3º	4º	5º	6º			7º	OBS	1º	2º	3º	4º	5º		6º
74+000	74+400			3.67	3.96	4.01	3.68			74+100	74+000		4.47	3.51	5.43			3.62	74-75
74+400	74+800			3.21			2.72	3.20	3.23	74+200	74+100			4.04	3.34			4.41	
74+800	75+200			3.24	3.19	3.59	3.18	3.40	3.45	74+600	74+200		3.56	3.76	3.56			3.38	
										75+000	74+600			3.80	2.87			3.75	
75+200	75+600			2.76	2.70	2.81	2.58	2.91	3.53	75+400	75+000		2.92	2.83		2.67		2.71	75-76
75+600	76+000			3.48	3.44	3.41	3.36	3.52		75+800	75+400			3.41	3.03			3.21	
										76+200	75+800		3.40	3.97	3.64			3.35	
76+000	76+400			3.70		3.30				76+600	76+200		3.23	3.15	3.25		2.83	3.10	76-77
76+400	76+800			3.33	3.19		3.07	3.08		77+000	76+600		3.23	3.38	2.97	3.25	3.28	2.85	
76+800	76+900			3.78	2.77		3.48												
76+900	77+000			3.63	3.19		3.15												
77+000	77+100		2.63	2.66	2.11		2.10	5.29		77+100	77+000			2.64	3.02	2.87			77-78
77+100	77+200	G								77+200	77+100	G							
77+200	77+300	G								77+300	77+200	G							
77+300	77+400		5.93	5.10	4.20	3.63	3.37	4.09		77+400	77+300		3.51	3.01	3.51		3.66		
77+400	77+500		2.90	2.93	3.12	2.71	3.15	3.13		77+500	77+400		3.75	3.19	3.75	3.22	3.65		
77+500	77+600		4.53	3.24	3.62	3.10	3.72	3.06		77+600	77+500		3.56	3.47	3.22	3.30	3.98		
77+600	77+700	P								77+700	77+600	P							
77+700	77+800		4.07	4.04	3.88	4.89	4.06	4.74		77+800	77+700		3.09	3.56	3.68		3.10		
77+800	77+900		3.42	3.53	3.63	3.59	2.69	3.34		77+900	77+800		2.46	2.81	2.90	2.90	1.73		
77+900	78+000		4.27	4.35	3.44	4.36	4.09	4.26		78+000	77+900		3.02	3.22	3.36	3.37	2.95		
78+000	78+100	G								78+100	78+000	G							78-79
78+100	78+200		2.95	3.09	2.81	3.07	4.61			78+200	78+100		2.68	3.31		3.33	3.30		
78+200	78+300		2.86	3.40	3.31	3.30	3.33	3.18		78+300	78+200		4.89	4.70		4.51	5.00		
78+300	78+400		2.71	2.92	2.68	2.69	2.68	3.04		78+400	78+300			3.04	2.95	3.27	2.86		
78+400	78+500	G								78+500	78+400	G							
78+500	78+600				3.15	3.47	2.92	3.51		78+600	78+500			2.89			1.92		
78+600	78+700				3.77	4.03	3.62	3.57		78+700	78+600			2.69	1.63		3.36		
78+700	78+800	P								78+800	78+700	P					6.06		
78+800	78+900	C								78+900	78+800	C					7.04		
78+900	79+000	C																	

Fuente: Elaboración propia.



Cuadro 3.12 Transformación de BI a IRI sub – tramo km. 79- 84

SUBTRAMOS		OBS	IDA					VUELTA					TRAMOS KM
			1º	2º	3º	4º	5º	1º	2º	3º	4º	5º	
79+000	79+400		2.63	3.22	2.08	3.35	3.28		3.72	3.97	3.72	3.44	79-80
79+400	79+800		3.05	2.90	3.07	3.11	3.06		3.25	3.12	3.28	3.23	
79+800	80+200		3.51			3.62	3.54		3.65	3.57		3.60	
80+200	80+600		3.40	3.31	3.46	3.60	3.44	2.85	2.87	2.52	2.81	2.90	80-81
80+600	81+000		0.00	3.70	3.78	3.88	3.70	3.46	3.59	3.32	3.32	3.51	
81+000	81+400		3.59	3.97	3.29	3.32	3.70		2.95	3.20	3.17	3.32	81-82
81+400	81+800		3.28	3.14	3.44	3.18	3.34		3.34	3.54	3.34	3.36	
81+800	82+200		3.34	3.24	4.17	3.66	3.39		3.01	2.60	2.73	2.62	
82+200	82+600		3.88	3.68	2.80	3.20	2.96	2.67	3.28	2.45	3.06	2.75	82-83
82+600	82+700		3.56	2.33	2.07	2.22		3.25	2.26	2.28	2.26	3.92	
82+700	82+800		4.58	4.15	4.26	4.58			4.20	4.44	4.42	3.31	
82+800	82+900		10.43	3.51	3.46	3.34			3.77	3.40	3.95	1.96	
82+900	83+000	B										12.02	
83+000	83+100	B											83-84
83+100	83+200		3.87	3.60	3.72	2.53	3.87	2.07	2.38	2.39	2.59		
83+200	83+300			4.44	4.35	4.61	4.09	4.15	3.99	4.20	4.18		
83+300	83+400	G											
83+400	83+500		3.05	3.14	3.34	3.15	3.31	3.28	3.15	2.66	3.46		
83+500	83+600		3.66	3.66	3.44	3.56		4.38	4.10	3.47	3.70		
83+600	83+700				3.66	3.72			3.76		3.73		
83+700	83+800	G											
83+800	83+900				2.88	2.87			2.81	2.91	2.78		
83+900	84+000				1.38	1.30			1.34	1.40	1.60		

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.13 Datos organizados en kilómetros para homogenización

IFI 2010									
TRAMOS POR KILOMETROS									
74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84
3.67	2.76	3.20	2.63	2.95	2.78	3.71	3.78	3.52	4.09
3.21	3.48	3.33	5.93	2.86	3.22	3.59	3.47	4.09	3.22
3.24	2.70	3.78	2.90	2.71	3.40	3.49	3.91	3.75	3.86
3.96	3.44	3.63	4.53	3.09	3.06	3.65	4.19	4.83	3.80
3.19	2.81	3.19	4.07	3.40	2.20	3.82	3.31	3.42	4.68
3.68	3.41	2.77	3.42	2.92	3.24	3.80	3.99	3.88	3.31
2.72	2.58	3.19	4.27	2.81	3.54	3.74	3.47	2.46	3.86
3.18	3.36	3.30	2.66	3.31	3.28	3.63	3.63	4.38	3.92
4.01	2.91	3.07	5.40	2.68	3.47	3.01	4.10	4.40	4.59
3.59	3.52	3.48	2.93	3.15	3.23	3.86	3.50	2.95	3.53
3.20	3.53	3.15	3.24	3.77	3.93	3.03	3.35	2.19	3.63
3.40	2.92	3.08	4.04	3.07	3.44	3.77	3.90	4.50	3.86
3.23	3.40	3.23	3.53	3.30	4.19	2.66	3.91	3.86	3.04
3.45	2.83	3.23	4.35	2.69	3.29	2.97	3.52	3.38	1.46
3.51	3.97	3.15	2.11	3.47	3.93	3.80	3.65	2.34	2.68
4.04	3.41	3.38	4.20	4.03	3.46	3.06	3.78	4.83	4.86
3.76	3.64	3.25	3.12	4.61	3.63		3.11	3.58	3.33
3.80	2.67	2.97	3.62	3.33	3.41		3.53	3.13	3.75
5.43	3.03	3.25	3.88	2.68			3.50	2.82	3.92
3.34	2.71	2.83	3.63	2.92			3.37	3.44	3.02
3.56	3.21	3.28	3.44	3.62			3.74	3.18	1.37
2.87	3.35	3.10	3.59	3.18			3.50	3.47	4.09
4.47		2.85	4.36	3.04			3.35	2.39	4.32
3.56			3.63	3.51			3.53	4.44	3.50
3.62			2.71	3.57			3.71	2.75	2.19
4.41			3.10	2.68			3.50	2.58	4.38
3.38			4.89	4.89			3.55	2.40	3.47
3.75			2.69	3.31				4.68	4.62
			4.09	4.79				2.88	2.51
3.75			2.69	3.31				4.68	4.62
			4.09	4.79				2.88	2.51
			3.37	3.04				3.23	4.21
			3.15	2.89				2.39	3.33
			3.72	2.69				4.67	4.33
			4.06	2.95				2.76	3.97
			3.34	1.63				2.91	2.96
			4.26	3.33				4.13	1.41
			2.10	4.51				3.50	2.52
			5.29	3.27				2.07	4.44
			4.09	3.30					2.81
			3.13	5.00					3.66
			3.06	2.86					3.07
			4.74	1.92					1.47
			3.51	3.36					3.65
			3.75	6.06					3.91
			3.56	7.04					3.94
			3.09						2.93
			2.46						1.69
			3.02						2.74
			2.64						4.41
			3.04						
			3.19						
			3.47						
			3.56						
			2.81						
			3.22						
			3.02						
			3.54						
			3.75						
			3.22						
			3.68						
			2.90						
			3.36						
			2.87						
			3.22						
			3.30						
			2.90						
			3.37						
			3.10						
			1.73						
			2.95						
			3.66						
			3.65						
			3.98						

Fuente: Elaboración propia.



Cuadro 3.14 Discriminación de datos alterados

IRI 2010									
TRAMOS POR KILOMETROS									
74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84
3.67	2.76	3.20	2.63	2.95	2.78	3.71	3.78	3.52	4.09
3.21	3.48	3.33	5.93	2.86	3.22	3.59	3.47	4.09	3.22
3.24	2.70	3.78	2.90	2.71	3.40	3.49	3.91	3.75	3.86
3.96	3.44	3.63	4.53	3.09	3.06	3.65	4.19	4.83	3.80
3.19	2.81	3.19	4.07	3.40	2.20	3.82	3.31	3.42	4.68
3.68	3.41	2.77	3.42	2.92	3.24	3.80	3.99	3.88	3.31
2.72	2.58	3.19	4.27	2.81	3.54	3.74	3.47	2.46	3.86
3.18	3.36	3.30	2.66	3.31	3.28	3.63	3.63	4.38	3.92
4.01	2.91	3.07	5.40	2.68	3.47	3.01	4.10	4.40	4.59
3.59	3.52	3.48	2.93	3.15	3.23	3.86	3.50	2.95	3.53
3.20	3.53	3.15	3.24	3.77	3.93	3.03	3.35	2.19	3.63
3.40	2.92	3.08	4.04	3.07	3.44	3.77	3.90	4.50	3.86
3.23	3.40	3.23	3.53	3.30	4.19	2.66	3.91	3.86	3.04
3.45	2.83	3.23	4.35	2.69	3.29	2.97	3.52	3.38	1.46
3.51	3.97	3.15	2.11	3.47	3.93	3.80	3.65	2.34	2.68
4.04	3.41	3.38	4.20	4.03	3.46	3.06	3.78	4.83	4.86
3.76	3.64	3.25	3.12	4.61	3.63		3.11	3.58	3.33
3.80	2.67	2.97	3.62	3.33	3.41		3.53	3.13	3.75
5.43	3.03	3.25	3.88	2.68			3.50	2.82	3.92
3.34	2.71	2.83	3.63	2.92			3.37	3.44	3.02
3.56	3.21	3.28	3.44	3.62			3.74	3.18	1.37
2.87	3.35	3.10	3.59	3.18			3.50	3.47	4.09
4.47		2.85	4.36	3.04			3.35	2.39	4.32
3.56			3.63	3.51			3.53	4.44	3.50
3.62			2.71	3.57			3.71	2.75	2.19
4.41			3.10	2.68			3.50	2.58	4.38
3.38			4.89	4.89			3.55	2.40	3.47
3.75			2.69	3.31				4.68	4.62
			4.09	4.79				2.88	2.51
			3.37	3.04				3.23	4.21
			3.15	2.89				2.39	3.33
			3.72	2.69				4.67	4.33
			4.06	2.95				2.76	3.97
			3.34	1.63				2.91	2.96
			4.26	3.33				4.13	1.41
			2.10	4.51				3.50	2.52
			5.29	3.27				2.07	4.44
			4.09	3.30					2.81
			3.13	5.00					3.66
			3.06	2.86					3.07
			4.74	1.92					1.47
			3.51	3.36					3.65
			3.75	6.06					3.91
			3.56	7.04					3.94
			3.09						2.93
			2.46						1.69
			3.02						2.74
			2.64						4.41
			3.04						
			3.19						
			3.47						
			3.56						
			2.81						
			3.22						
			3.02						
			3.54						
			3.75						
			3.22						
			3.68						
			2.90						
			3.36						
			2.87						
			3.22						
			3.30						
			2.90						
			3.37						
			3.10						
			1.73						
			2.95						
			3.66						
			3.65						
			3.98						

Fuente: Elaboración propia.

A. **Test de normalidad.** Ahora se procede aplicar el primer paso el cual consiste en corroborar el comportamiento como distribución normal de todos el conjuntos de datos, como se ve a continuación en las figuras siguientes.

Fig. 3.4 Test de normalidad tramos 74-75.

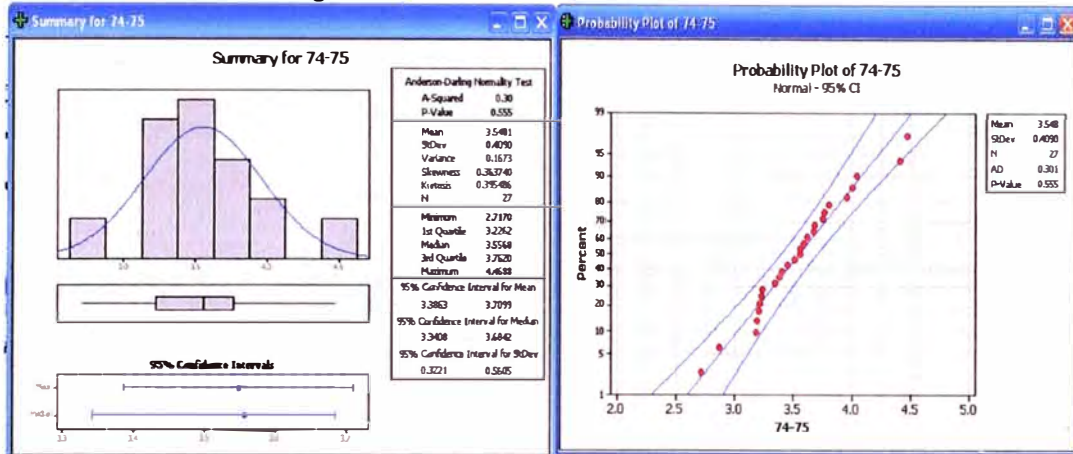


Fig. 3.5 Test de normalidad tramos 75-76.

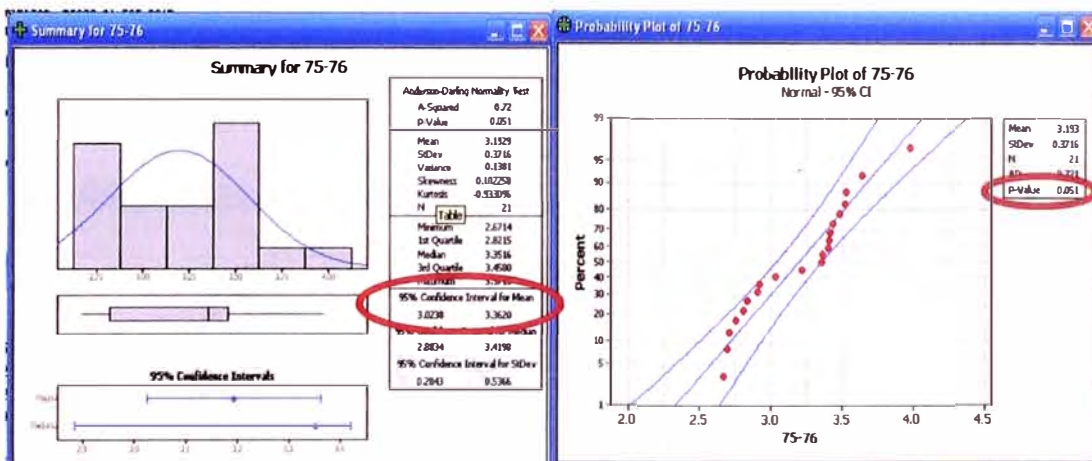


Fig. 3.6 Test de normalidad tramos 76-77.

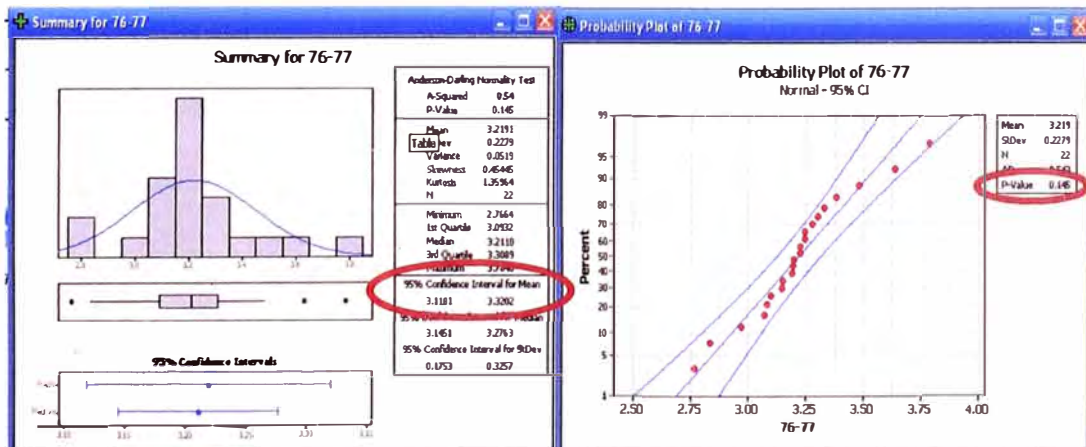


Fig. 3.7 Test de normalidad tramos 77-78.

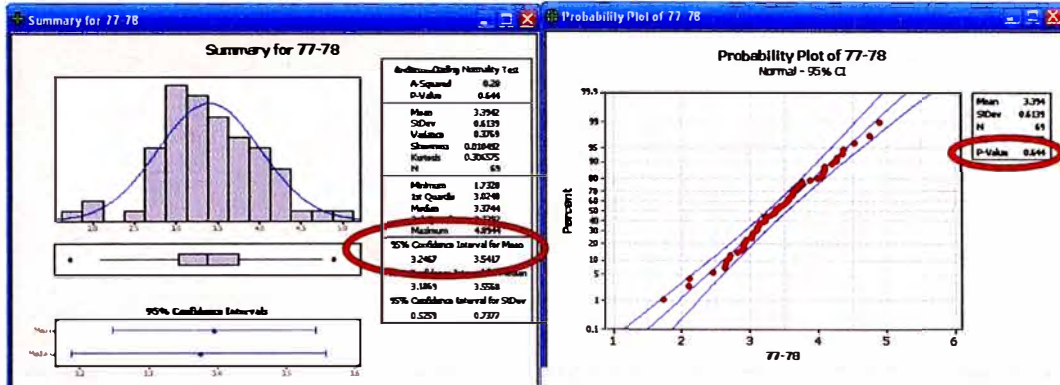


Fig. 3.8 Test de normalidad tramos 78-79.

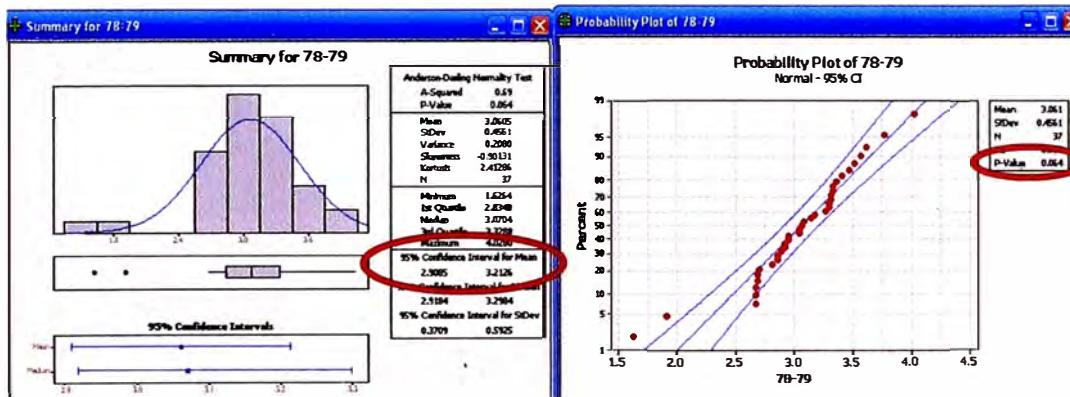


Fig. 3.9 Test de normalidad tramos 79-80.

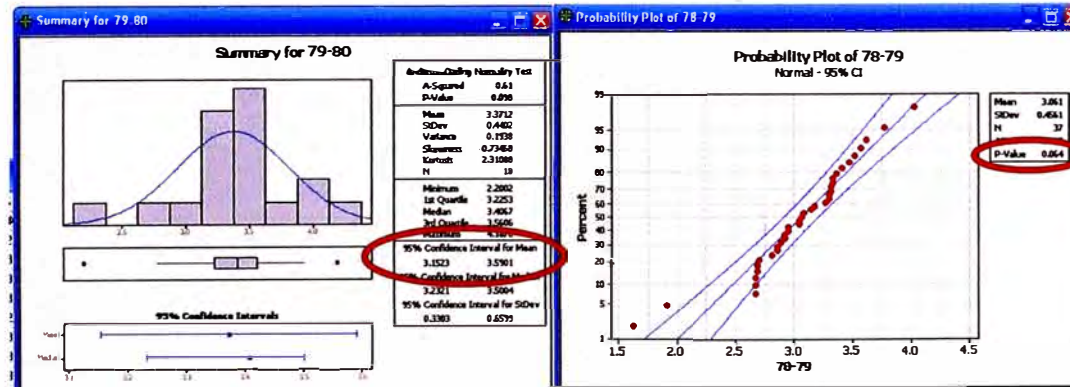


Fig. 3.10 Test de normalidad tramos 80-81.

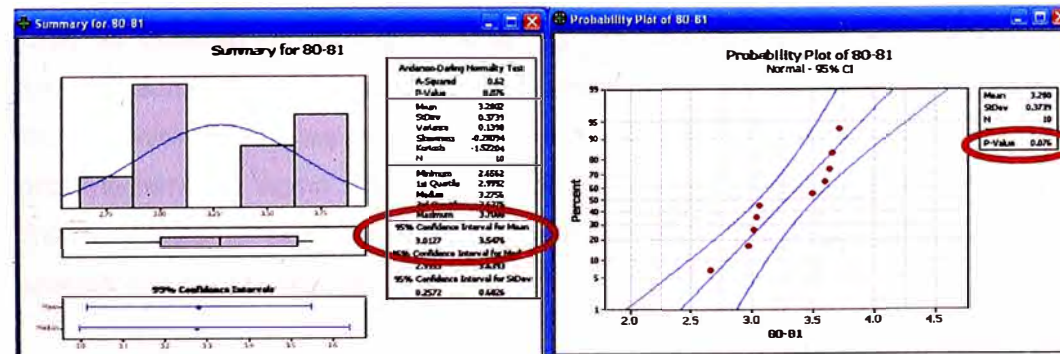




Fig. 3.11 Test de normalidad tramos 81-82.

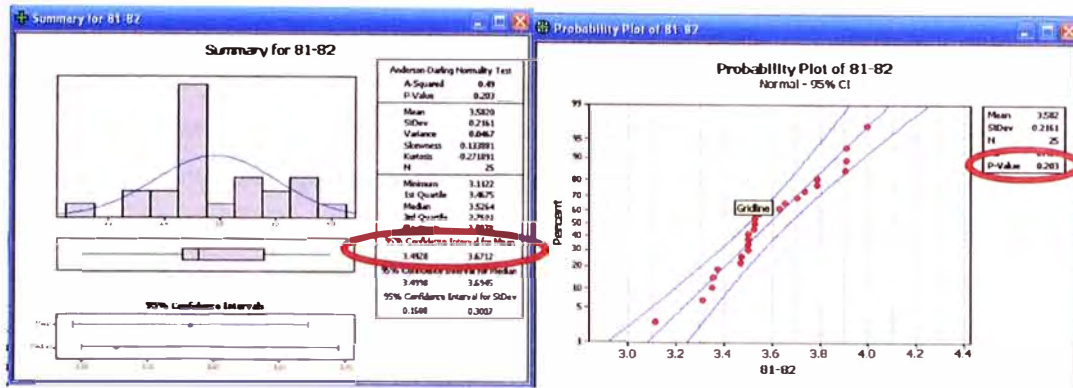


Fig. 3.12 Test de normalidad tramos 82-83.

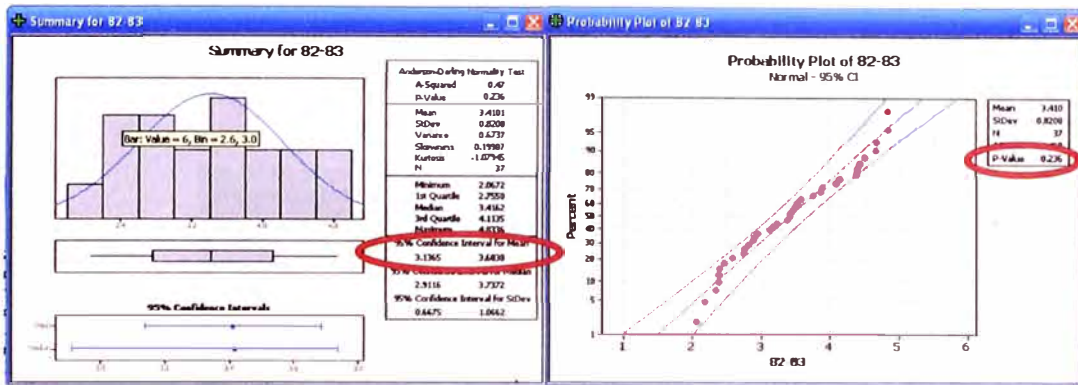
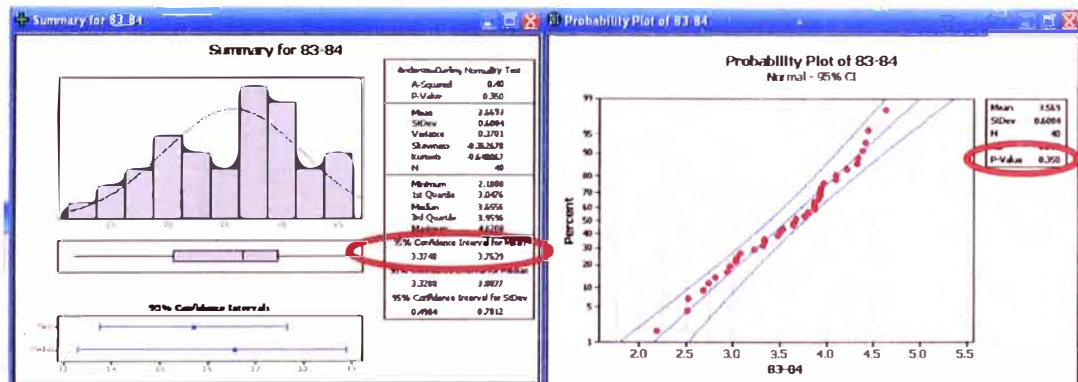


Fig. 3.13 Test de normalidad tramos 83-84.

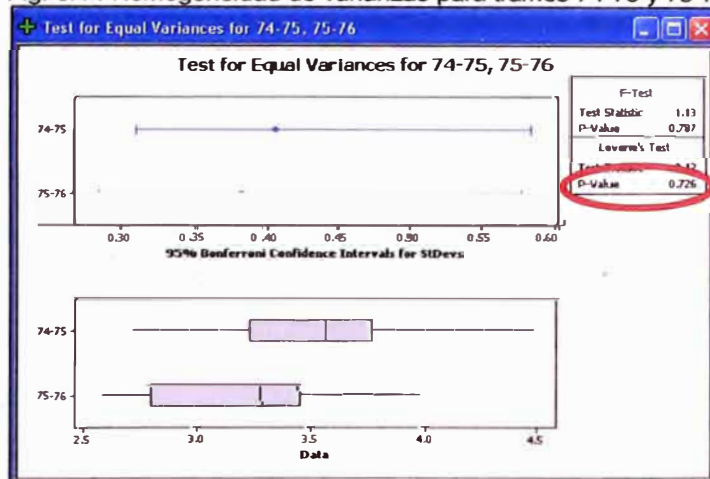


Fuente: Aplicación en el programa Minitab.

Como se observa en las Fig.3.4 a la Fig. 3.13 correspondientes a los 10 sub-tramos notamos que en los test de normalidad en todos los casos el P-valor resulta mayor a 0.05 por lo tanto se infiere que todos los valores se comportan aproximadamente como una distribución normal, cumpliéndose así la primera condición para la posterior aplicación de la prueba de hipótesis. Ahora se continua con la siguiente prueba.

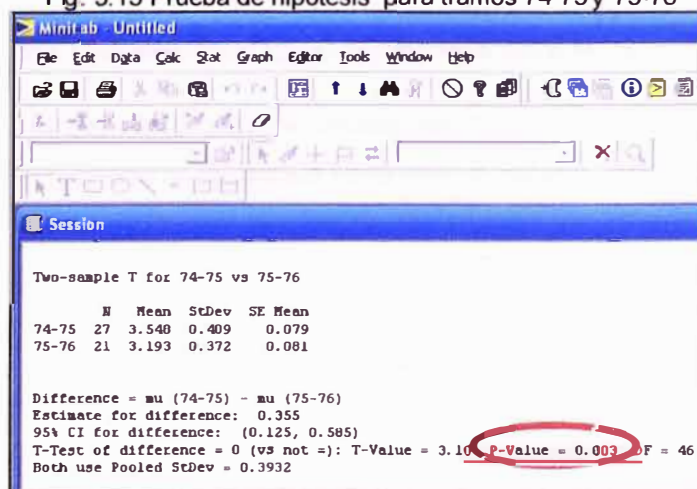
**B. Homogeneidad de varianzas y prueba de hipótesis.** Ahora bien se procede a someter a los datos primero a la prueba de homogeneidad de varianzas y después al test de hipótesis T – student, tramo por tramo para ver cuales tramos se pueden agrupar y considerar como homogéneos. A continuación en las figuras ulteriores se muestra los resultados que muestra el programa Minitab para los diferentes tramos y como se ve más líneas abajo algunos de ellos presentan varianzas homogéneas y algunos otro no, esto se configura en las opciones del programa Minitab para la prueba de hipótesis la cual es con 95% de confiabilidad, siendo la hipótesis nula  $H_0$  que los datos sean homogéneos y la hipótesis alternativa  $H_a$  que no son iguales. Se procede a evaluar tramo por tramo tanto la homogeneidad de varianzas como la prueba de hipótesis resultando lo siguiente:

Fig. 3.14 Homogeneidad de varianzas para tramos 74-75 y 75-76



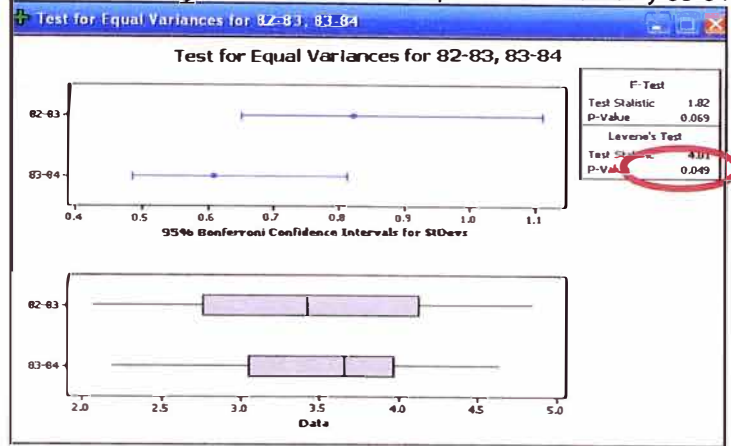
Fuente: Aplicación en el programa Minitab.

Fig. 3.15 Prueba de hipótesis para tramos 74-75 y 75-76



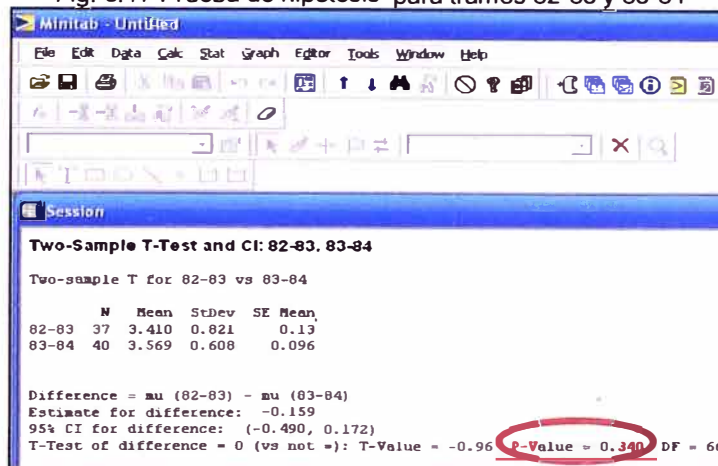
Fuente: Aplicación en el programa Minitab.

Fig. 3.16 Homogeneidad de varianzas para tramos 82-83 y 83-84



Fuente. Aplicación en el programa Minitab.

Fig. 3.17 Prueba de hipótesis para tramos 82-83 y 83-84



Fuente: Aplicación en el programa Minitab.

De la Fig. 3.14 el P-valor es mayor a 0.05 por tanto se acepta la Hipótesis Nula con un nivel de significancia del 95%. Es decir, existe evidencia que las varianzas de los tramos 74-75 y 75-76 deben ser considerados como homogéneos, esta consideración debe ser tomada para la prueba de hipótesis.

Ahora bien, de la Fig. 3.15 para la prueba de hipótesis el P-valor es menor a 0.05 por tanto se rechaza la Hipótesis Nula con un nivel de significancia del 95%. Es decir, existe evidencia que los IRI de los tramos 74-75 y 75-76 deben ser clasificados de manera homogénea.

Del mismo modo de la Fig. 3.16 el P-valor es menor a 0.05 por tanto se rechaza la Hipótesis Nula con un nivel de significancia del 95%. Es decir, existe evidencia que las varianzas de los tramos 82-83 y 83-84 deben ser considerados como diferentes, esta consideración debe ser tomada para su prueba de hipótesis.



Por tanto de la Fig. 3.17 para la prueba de hipótesis el P-valor es mayor a 0.05 por tanto se acepta la Hipótesis Nula con un nivel de significancia del 95%. Es decir, existe evidencia que los IRI de los tramos 82-83 y 83-84 deben ser clasificados de manera homogénea.

El procedimiento descrito líneas arriba se lleva a cabo para todos los tramos existentes en la evaluación, tomados de dos en dos, para al final sacar las conclusiones de los resultados obtenidos de las pruebas estadísticas. Es notorio que dependiendo del caso ya sea si resulta las varianzas homogéneas o no, se configuran en las opciones del test T - student para proceder al agrupamiento de los mismos en el programa Minitab. El resumen y análisis de estos resultados se muestra en el siguiente capítulo y toda la aplicación en el programa Minitab para todos los tramos se muestra en los Anexos.

## CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

### 4.1 EVOLUCIÓN DE LA RUGOSIDAD EN EL TRAMO EN ESTUDIO.

Del capítulo anterior, se puede obtener la evolución del IRI para el tramo en estudio, dado que se cuenta con la información de los años 2009 y 2010 para el mismo tramo, por tanto se obtiene el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1 Evolución del IRI en el tramo en estudio para los años 2009 y 2010.

	IRI	IRI
	2009	2010
<b>74-75</b>	4.22	3.55
<b>75-76</b>	3.33	3.19
<b>76-77</b>	3.64	3.22
<b>77-78</b>	3.67	3.39
<b>78-79</b>	2.88	3.06
<b>79-80</b>	4.86	3.37
<b>80-81</b>	4.68	3.28
<b>81-82</b>	4.70	3.58
<b>82-83</b>	4.22	3.41
<b>83-84</b>	4.18	3.57
<b>Prom</b>	<b>4.04</b>	<b>3.36</b>

Fuente: Elaboración propia

**4.1.1 Valores IRI con intervalo de confianza.** Del test de normalidad aplicado en el capítulo anterior se resumió lo referente a los intervalos de confianza con 95% de confiabilidad (Fig. 3.1 a 3.10) para el IRI representativo para cada kilómetro (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2 IRI 2010 con intervalos de confianza 95 % confiabilidad

	IRI	Intervalo de confianza	
	2010	95 % de confiabilidad	
<b>74-75</b>	3.55	3.39	3.71
<b>75-76</b>	3.19	3.02	3.36
<b>76-77</b>	3.22	3.12	3.32
<b>77-78</b>	3.39	3.25	3.54
<b>78-79</b>	3.06	2.91	3.21
<b>79-80</b>	3.37	3.15	3.59
<b>80-81</b>	3.28	3.01	3.55
<b>81-82</b>	3.58	3.49	3.67
<b>82-83</b>	3.41	3.14	3.68
<b>83-84</b>	3.57	3.37	3.76

Fuente: Elaboración propia

Según los IRIs obtenidos para el 2010, estos resultan menores a los obtenidos un año antes (2009) que evidentemente no era lo esperado ya que se supone que la carretera con el paso del tiempo tendería a deteriorarse por tanto a presentar un IRI mayor con el tiempo y no al contrario. Sin embargo, indagando al respecto se encontró que previo a la visita de campo realizada para la toma de datos en el tramo en estudio se había realizado un mantenimiento periódico lo cual justifica el hecho que el IRI haya resultado menor para este caso.

**4.2 DE LA HOMOGENIZACIÓN DE TRAMOS.** Del contraste tramo por tramo evaluado en el capítulo anterior en la parte de homogenización de tramos se obtiene el cuadro 4.3 a manera resumen de los resultados obtenidos.

Cuadro 4.3 Homogenización de tramos

Km vs Km	Homogenización de Tramos									
	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84
74-75	No	No	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si
75-76		No	Si	Si	Si	No	Si	No	Si	No
76-77			No	Si	Si	Si	Si	No	Si	No
77-78				No	Si	Si	Si	No	Si	Si
78-79					No	No	Si	No	No	No
79-80						No	Si	No	Si	Si
80-81							No	No	Si	Si
81-82								No	Si	Si
82-83									No	Si
83-84										No

Fuente: Elaboración propia.

Del cuadro 4.3 por ejemplo si 74-75 con 77-78 es igual a SI, y SI 74-75 con 79-80 = si, y como 77-78 con 79-80 también es SI entonces se agrupa 74-75, 77-78 y 79-80 y así sucesivamente se puede obtener el agrupamiento final visto en el cuadro 4.4

Cuadro 4.4 Agrupamiento de sub-tramos

GRUPOS	SUBTRAMOS A HOMOGENIZAR						IRI prom	Estado
I	74-75	77-78	79-80	80-81	82-83	83-84	3.43	Regular
II	75-76	76-77	78-79				3.16	Regular
III	81-82						3.28	Regular

Fuente: Elaboración propia

Del cuadro 4.4 se observa que el único tramo que no se ha podido agrupar con ninguno fue el correspondiente a los kilómetros del 81 al 82, esto se explica debido a que es el tramo con el que menos información se contaba, por tanto este se aproximaba menos al comportamiento como distribución normal.

Por otro lado se observa que en los tres grupos el estado resulta ser regular, lo cual se refleja con la realidad tomando en cuenta que al ser un tramo corto de 10 Km todas las condiciones tanto climáticas, estacionales, geográficas eran similares para todos los sub tramos, hecho tal que no necesariamente ocurre si se va a analizar una carretera completa la cual pasa por varias regiones naturales o si se analiza un tramo considerablemente más grande, lo cual sería lo más recomendable tratándose de carreteras, las cuales son de gran longitud.

Como se menciona anteriormente, esta homogenización es de gran utilidad a la hora de la toma de decisiones respecto a políticas de mantenimiento debido a que se reducen la cantidad de sectores y se conoce que sectores se comportan de forma similar de manera tal de tener las mismas consideraciones al momento de tomar una decisión respecto a la conservación y/o mantenimiento de la vía resultado más el análisis más práctico, rápido y económico.

## CONCLUSIONES.

1. La medición de la rugosidad con equipo Bump Integrator es bastante versátil y práctica pudiéndose obtener resultados en poco tiempo y de buena calidad siempre y cuando se tenga en cuenta consideraciones en el proceso de medición y teniendo cuidado en que las variables de desempeño no alteren los resultados.
2. Las medidas son mucho más consistentes cuando la carretera no posee curvas, mientras más pronunciada y larga sea la curva, la medida será variable en el tramo que contenga dicha curva, esto por la dificultad de mantener la velocidad estable.
3. Es importante analizar y procesar la información histórica sobre la rugosidad de la carretera en estudio mediante herramientas estadísticas y/o probabilísticas que garanticen un adecuado grado de confiabilidad para así poder estimar modelos fidedignos sobre el deterioro del tramo en estudio para posteriormente tomar decisiones confiables respecto a políticas de mantenimiento de la vía.
4. La utilización de la metodología de discriminación de datos que permitió recopilar la información de investigaciones sobre carreteras de bajo volumen de tránsito; y se obtuvieron valores representativos de las variables relevantes con un grado de confiabilidad adecuada (95%) que permite estimar la evolución en el tiempo de este tipo de vías, sirviendo de punto de partida para la elaboración del modelo de deterioro y a la vez como parámetro confiable respecto a toma de decisiones sobre el mantenimiento y conservación para este tipo de carreteras.
5. Esta implementación de la metodología de discriminación de datos permitió minimizar los errores sistemáticos que se puedan presentar en el proceso, además de la homogenización de la información de cada tramo, lo cual coadyuvó en la clasificación más conveniente de los tramos que para este caso de acuerdo al IRI resultaron ser de estado regular para este tramo de 10 Km. Más interesante resultará realizar la evaluación en tramos de mayor dimensión y envergadura en los cuales



seguramente si habrá marcadas diferencias en los estados. Además, queda pendiente la aplicación de esta metodología tomando en cuenta a otras variables relevantes como el tráfico, la altitud, clima, etc. y no solo a la rugosidad como se desarrollo en el presente trabajo. A dicho análisis con varias variables para cada objeto estudiado se le denomina en estadística análisis multivariado o multivariante.

6. Resulta evidente la carencia de una normativa bien clara y elaborada respecto a las mediciones con equipo Bump Integrator que evitarían errores sistemáticos referentes a la concordancia de sentidos de medición y coincidencia de las huellas lineales tomadas para el cálculo de la rugosidad como el que se presenta durante la correlación de datos en este caso tomando como contraparte al equipo MERLIN.

## RECOMENDACIONES.

1. Es recomendable realizar varias pasadas con la camioneta BUMP INTEGRATOR de manera de contar con la data suficiente la cual te asegure de antemano su comportamiento estadístico aproximado como distribución normal.
2. En lo posible con respecto a la tramificación se debe procurar que sea homogénea de 400m o 100m dependiendo de las características pero las mismas distancias para el mismo sub-tramo. De esa forma se obtendrá una mejor clasificación en el momento del procesamiento.
3. Los resultados obtenidos por los vehículos sólo serán coherentes si las propiedades mecánicas del vehículo (y el medidor de respuestas) se mantienen constantes respetando prácticas adecuadas de mantenimiento y operación.
4. Resultaría ideal hacer la calibración de datos con equipos de clase 1 como el de mira y nivel que cuenta con un precisión muy buena, en el presente trabajo se tuvo que correlacionar con el equipo MERLIN solamente pero hubiera recomendable el ultimo calibrarlo también con el método Mira y nivel para obtener una alta precisión.
5. Se recomienda revisar meticulosamente, en lo concerniente a la correlación, que entre los datos de Bump Integrator y el equipo MERLIN sean contrastables; es decir, que aproximadamente si ambos pasan por los dos sentidos entonces que pasen por la misma huella lineal para evitar errores sistemáticos. Es decir que si las mediciones con equipo MERLIN se realizaron tanto en sentido de ida y vuelta y por los carriles derechos (huella derecha) entonces las mediciones con el equipo Bump integrator deberían haberse hecho de la misma forma para que así la contrastación sea más valida y precisa.

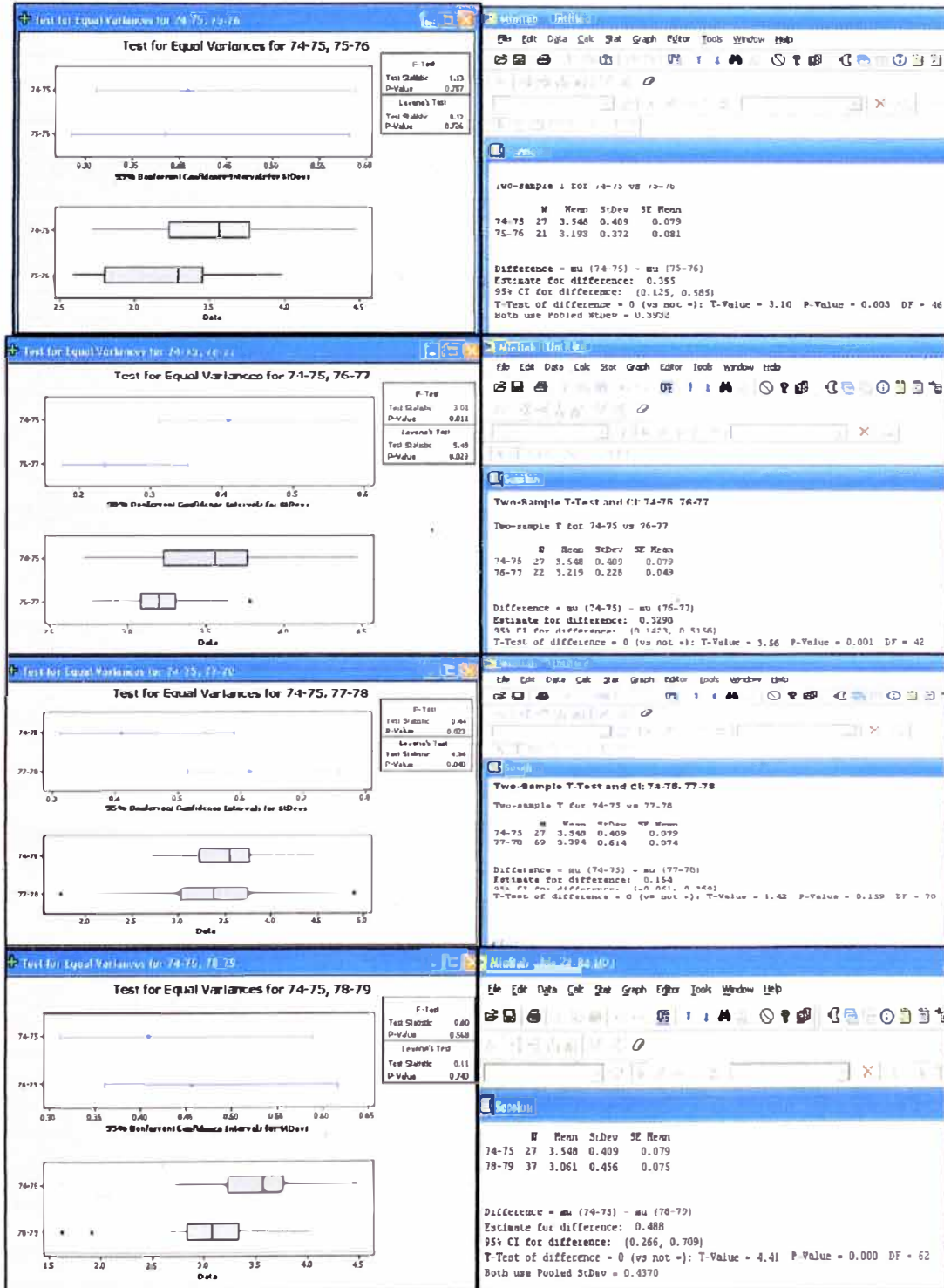
## BIBLIOGRAFÍA.

1. **ÁLVAREZ ASCENCIO Pedro**, *“Evaluación de la rugosidad de la carretera Cañete - Yauyos - Chupaca con equipo Bump Integrator tramo km. 74+000 - km. 79+000”*. Informe de suficiencia UNI. Perú, 2009.
2. **GUTIÉRREZ LÁZAREZ Wilfredo**. *“Modelación Geotécnica de Pavimentos Flexibles con Fines de Análisis y Diseño en el Perú”*, Tesis de Maestría UNI. Perú, 2007.
3. **MEYER Paul**, *“Probabilidad y aplicaciones estadísticas”*. Editorial Fondo Educativo Interamericano. México, 1992.
4. **RAMOS ALONSO Cristian**, *“Evaluación de la rugosidad de la carretera Cañete - Yauyos - Chupaca con equipo Bump Integrator tramo km. 79+000 - km. 84+000”*. Informe de Suficiencia UNI. Perú, 2009.
5. **WALPOLE Ronald**. *“Probabilidad y Estadística para Ingenieros”*. Editorial Prentice Hall. México, 1999.

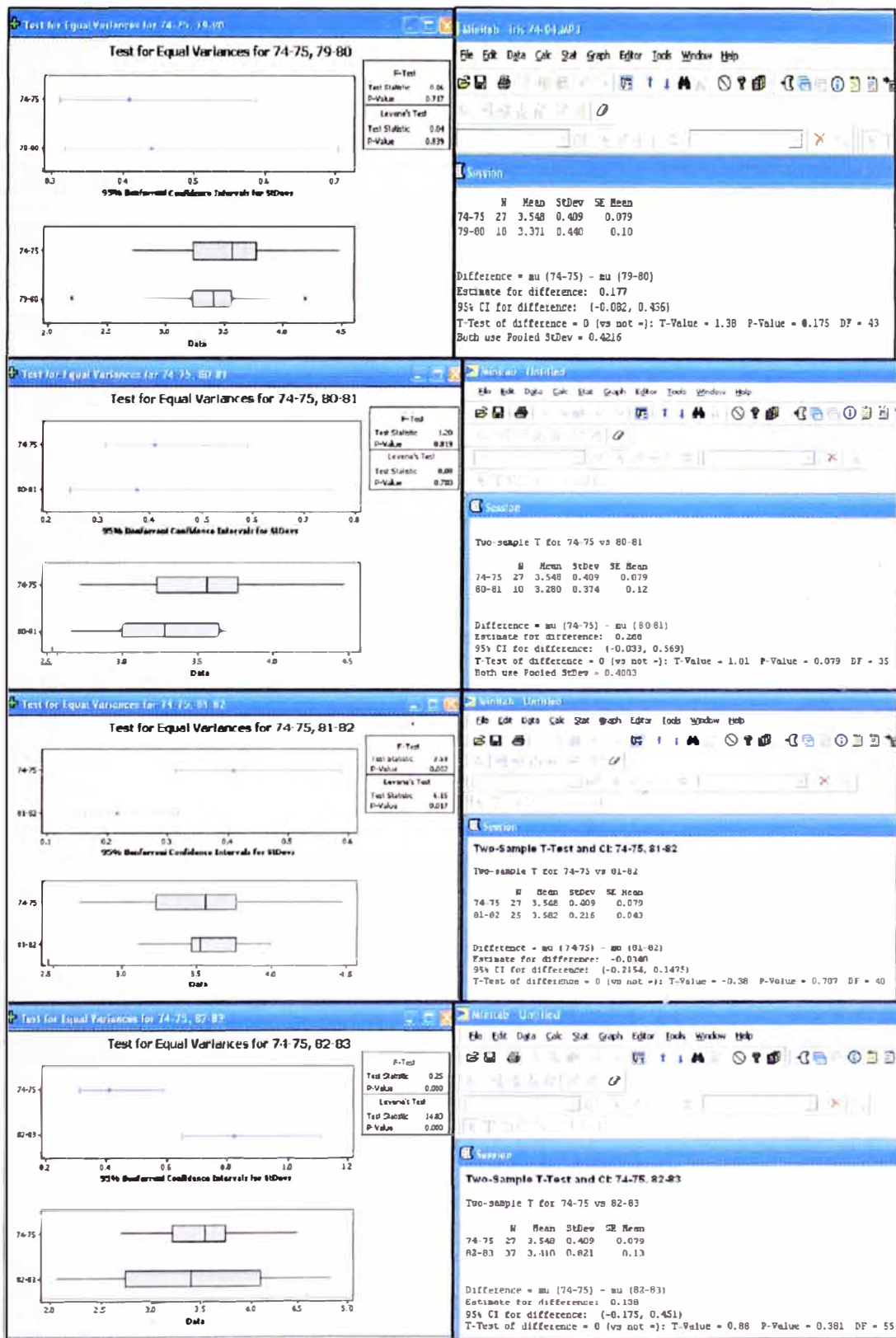
# ANEXOS

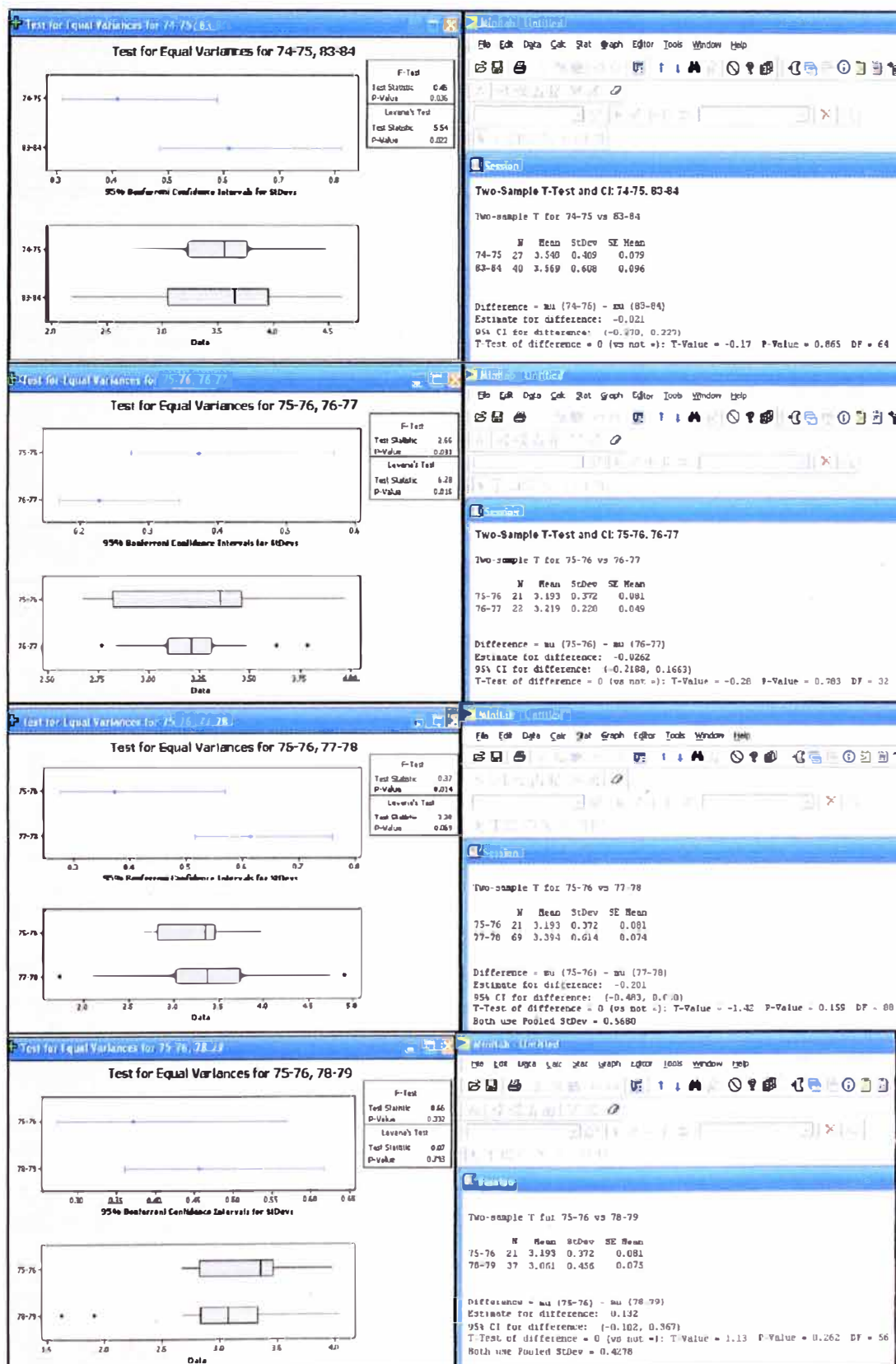
## ANEXO A

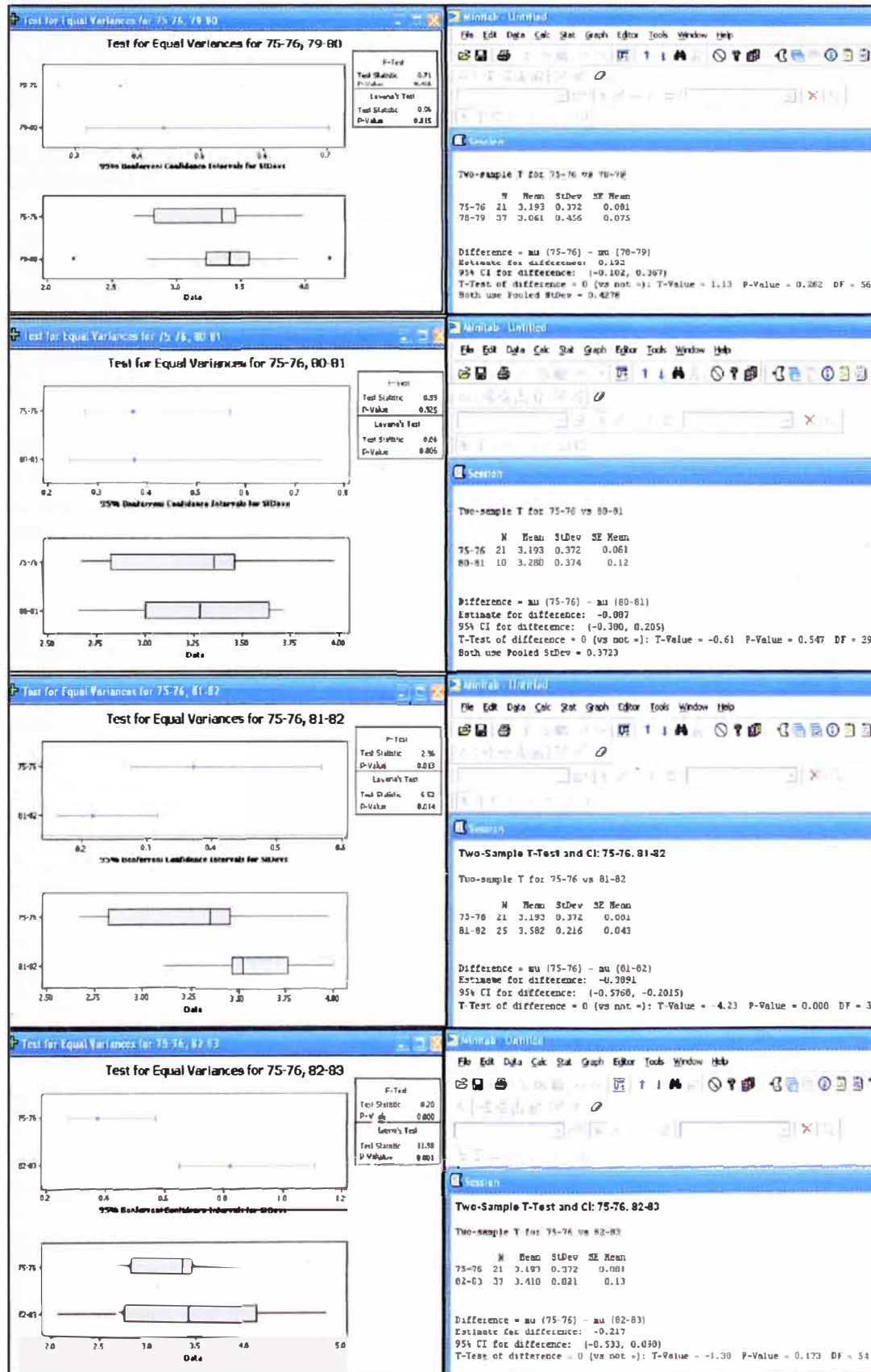
### Homogeneidad de varianzas y prueba de hipótesis en los tramos tomados de dos en dos.



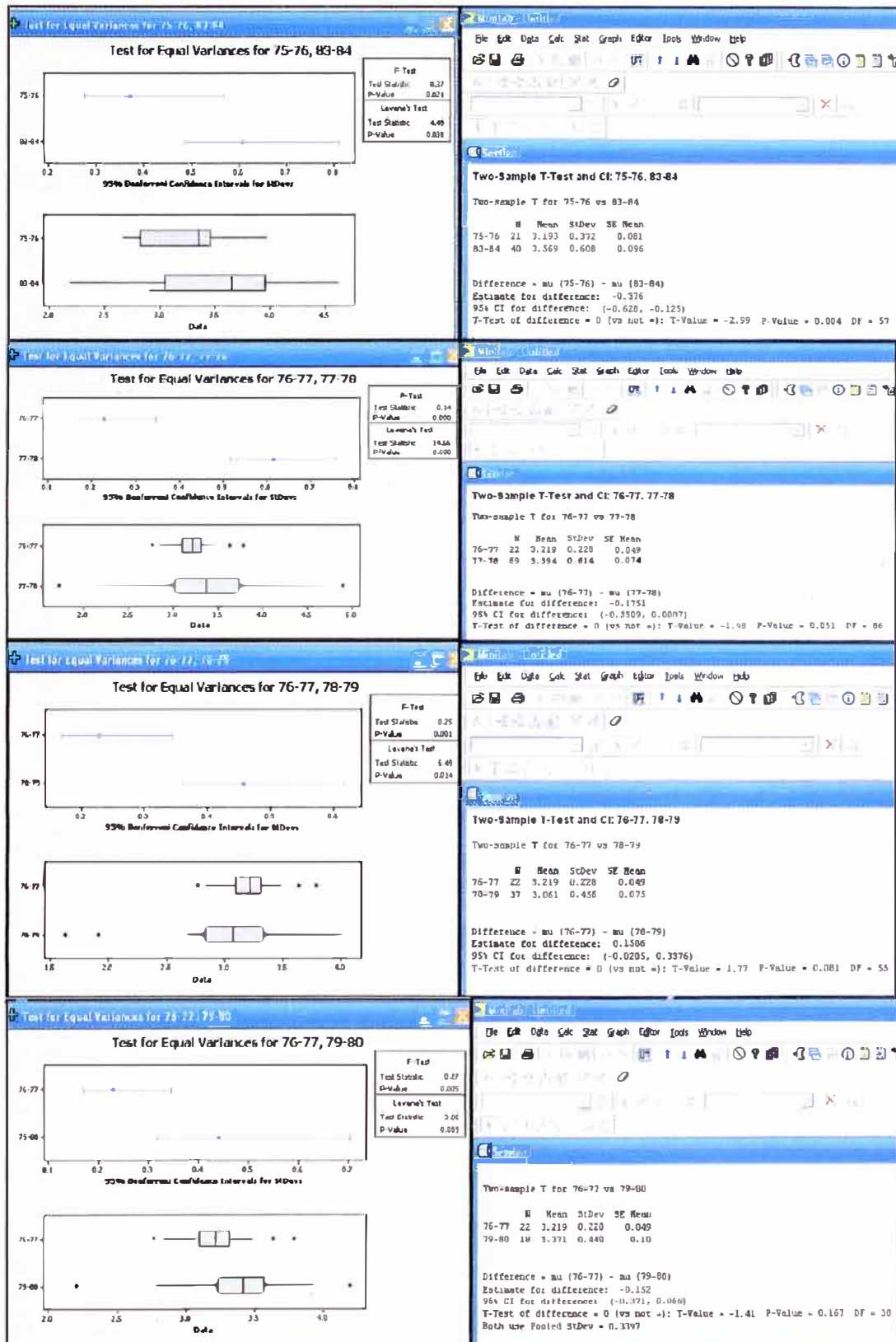


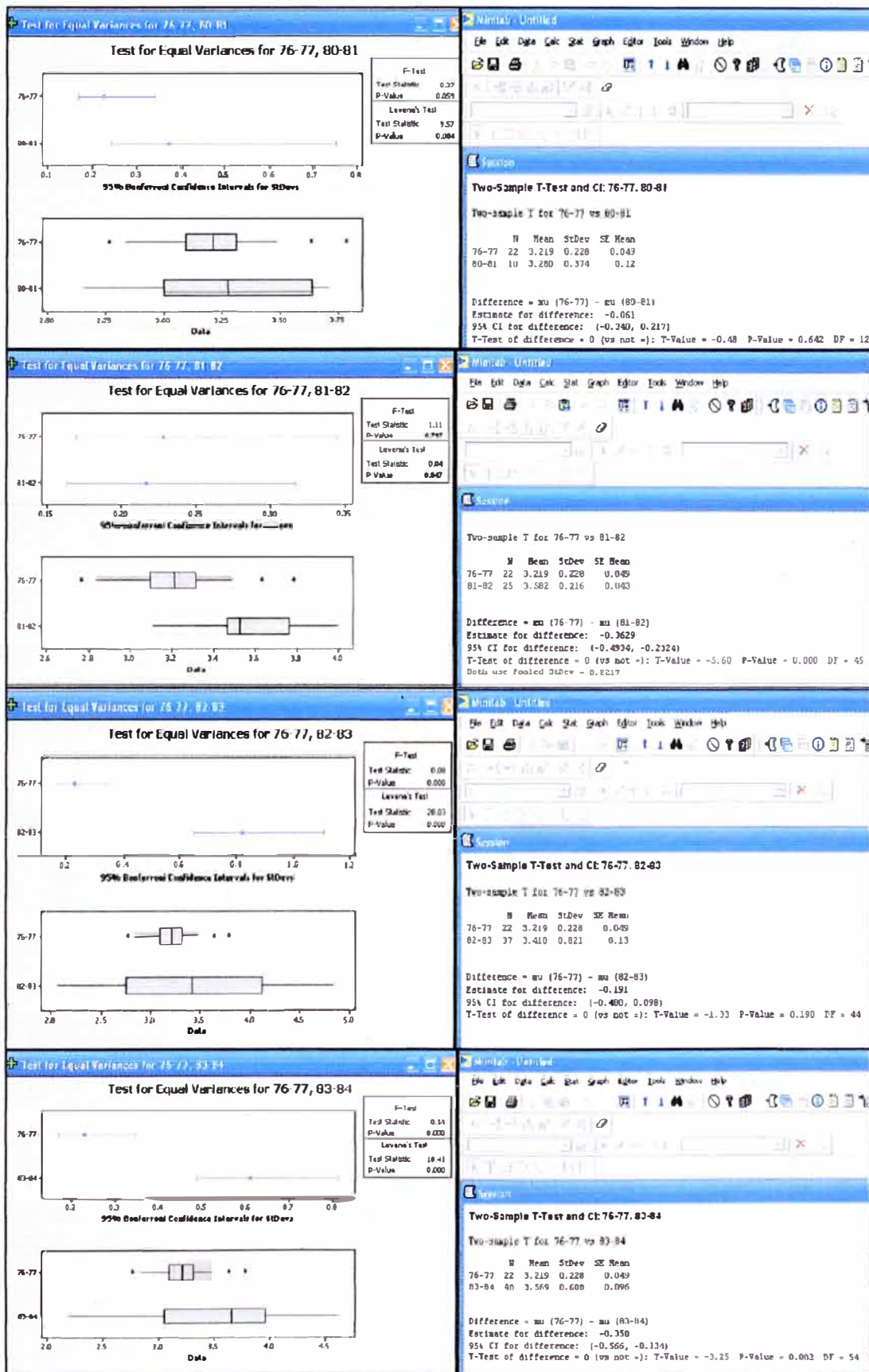




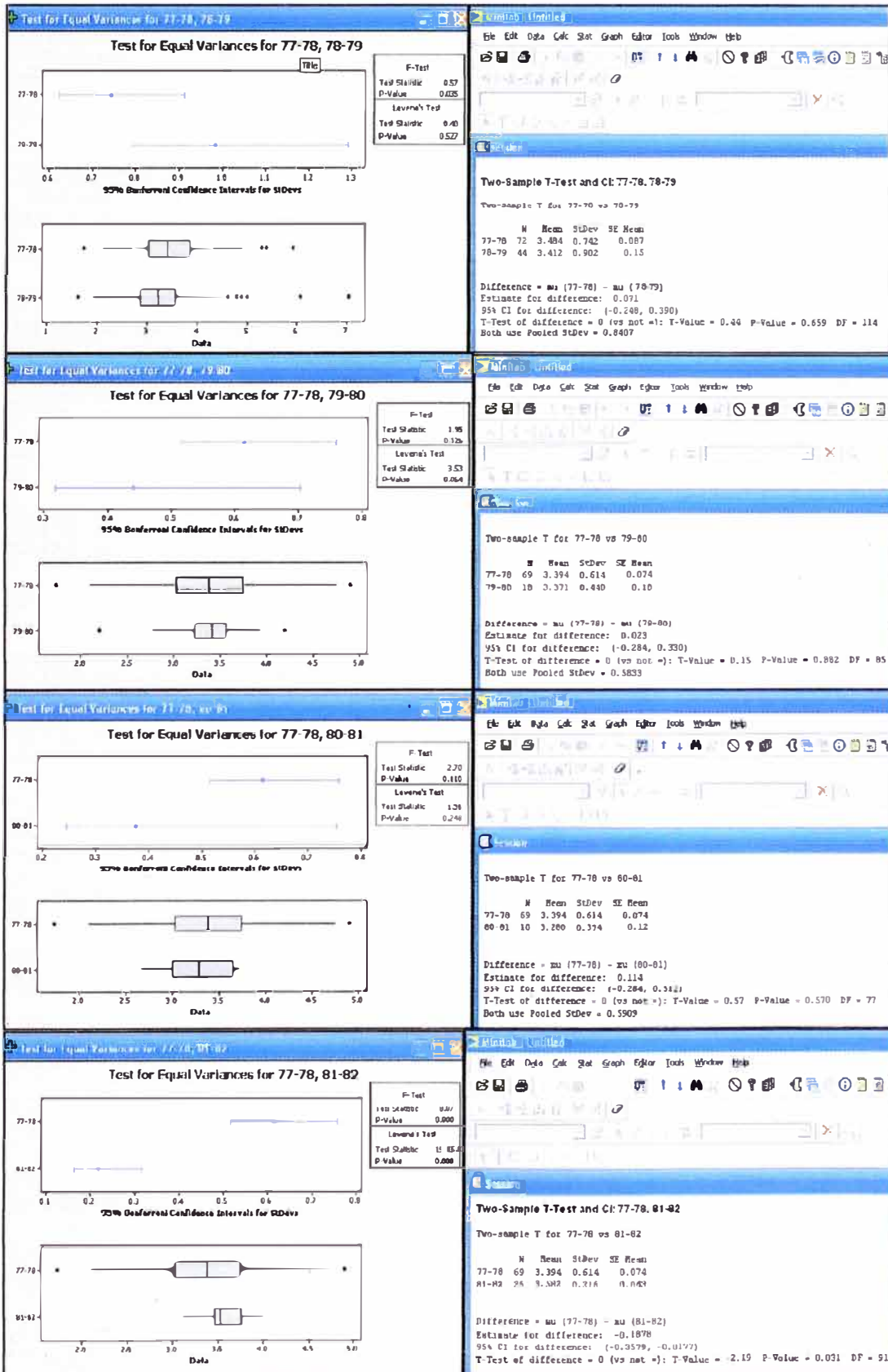


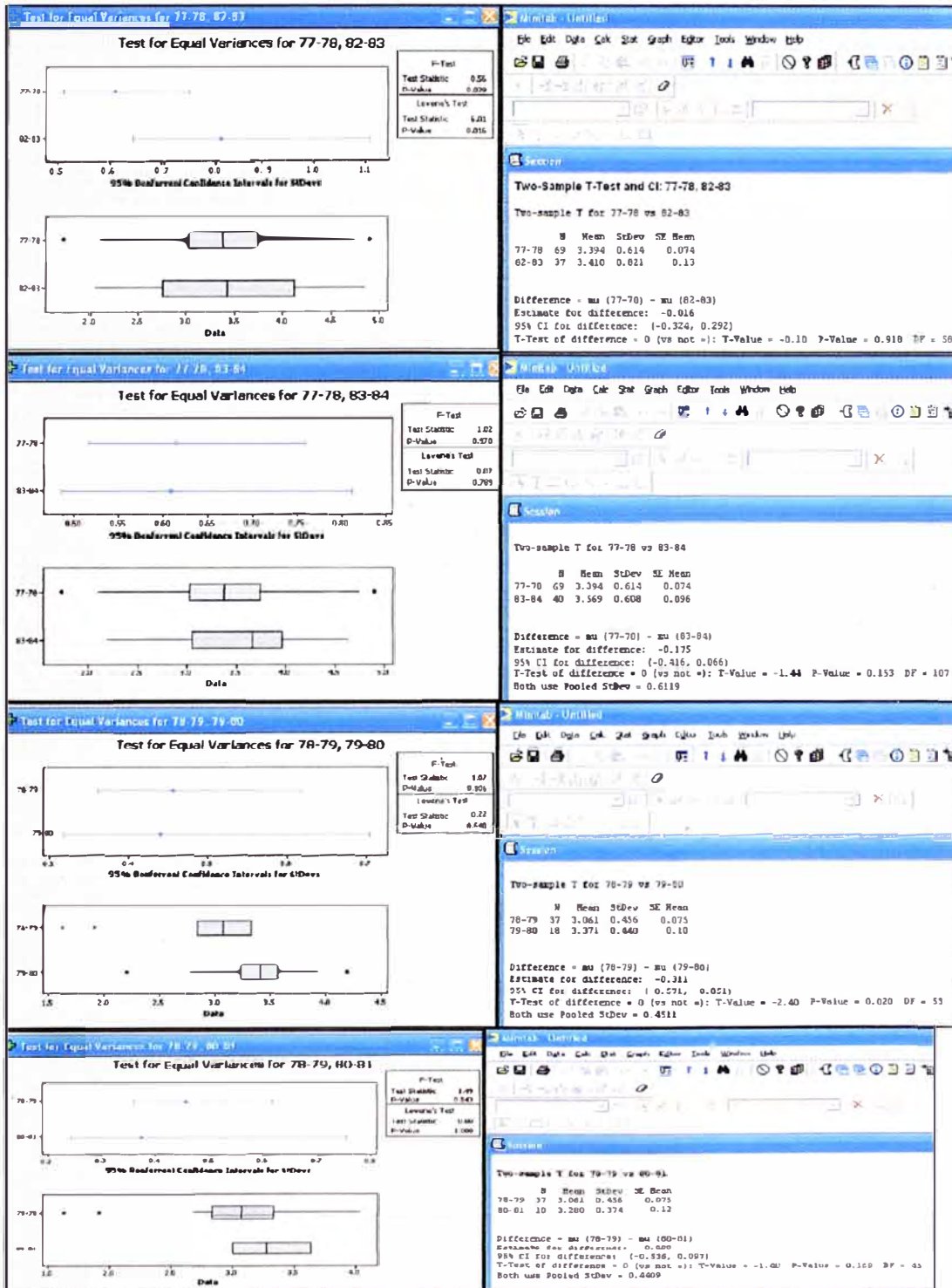


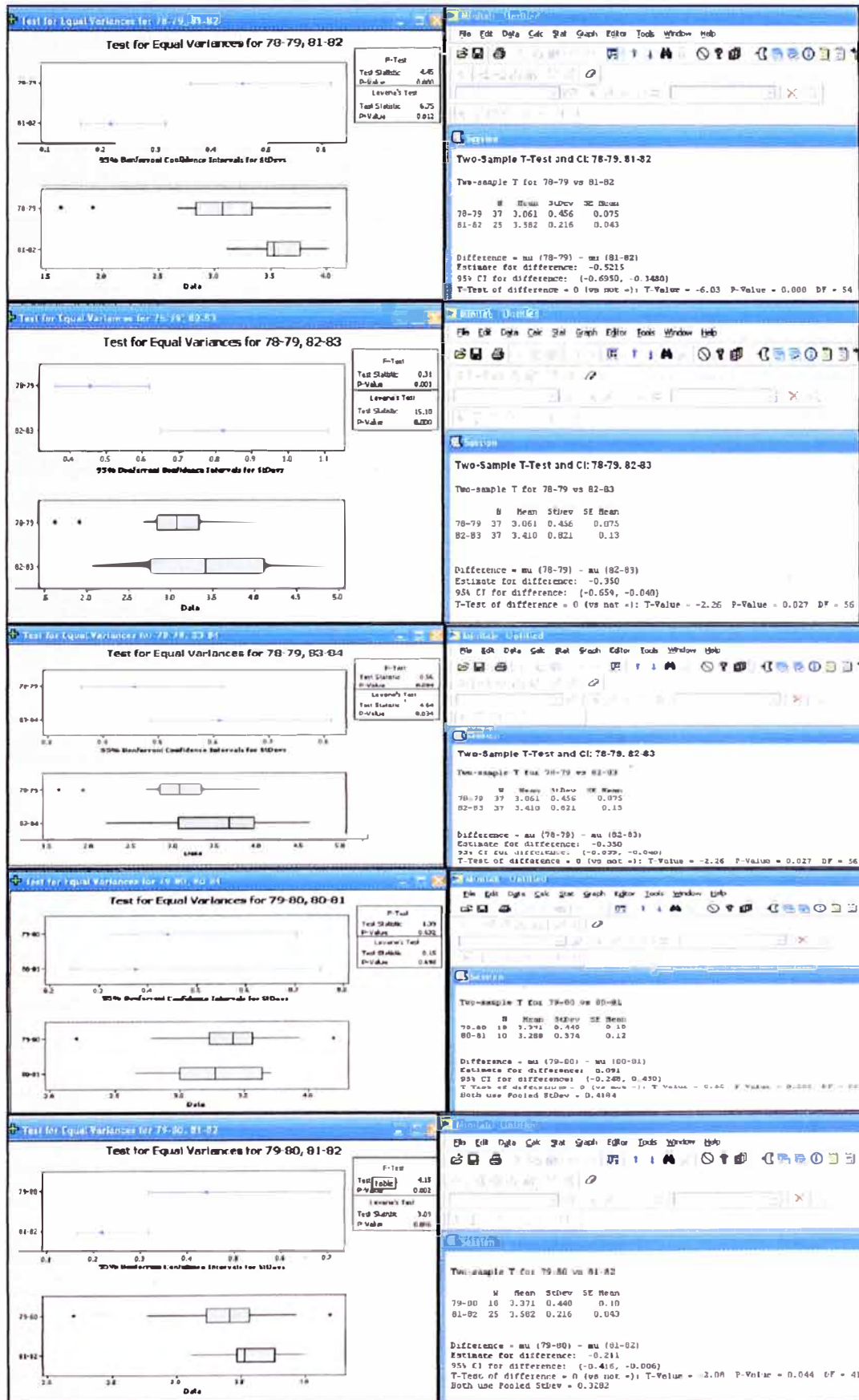






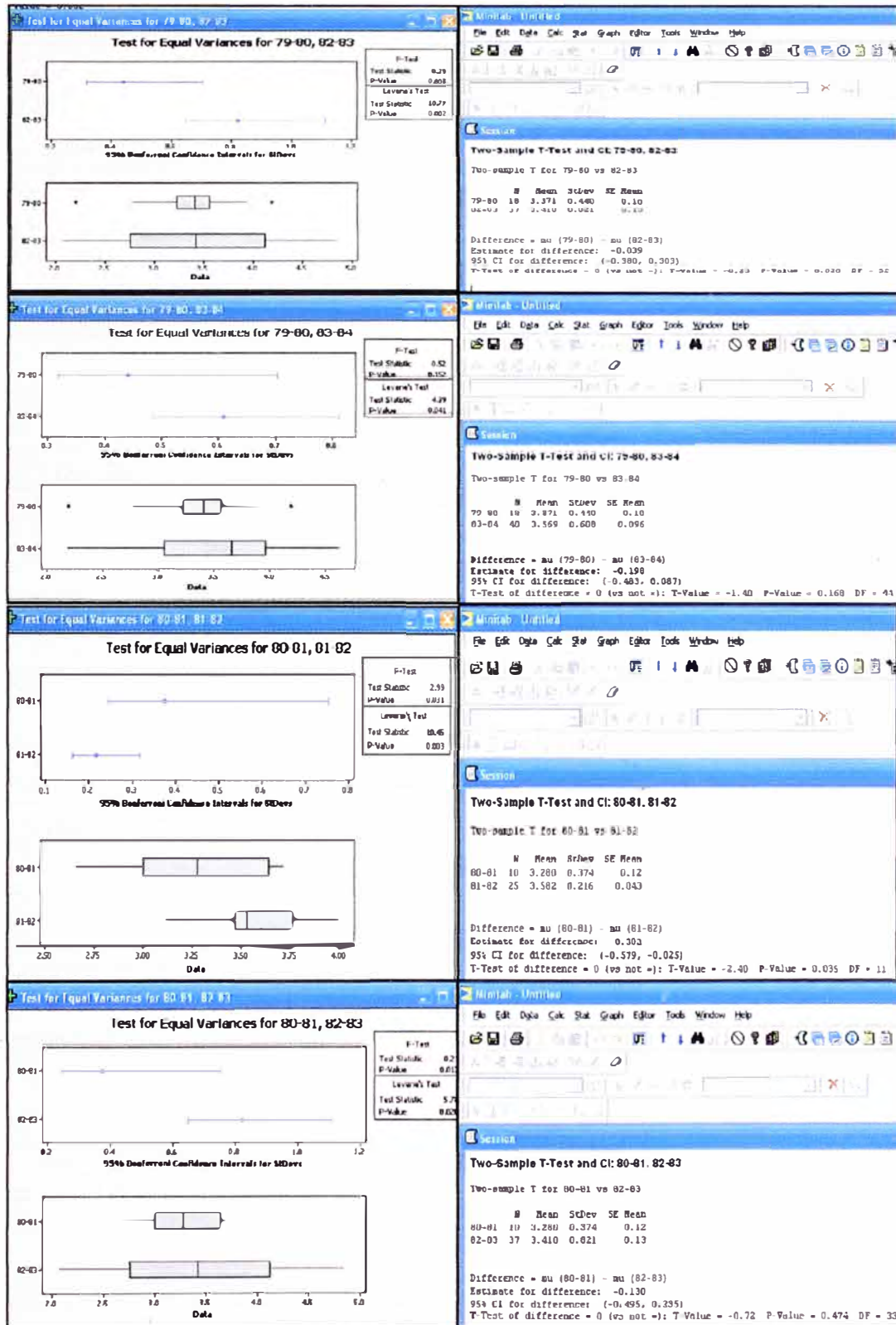


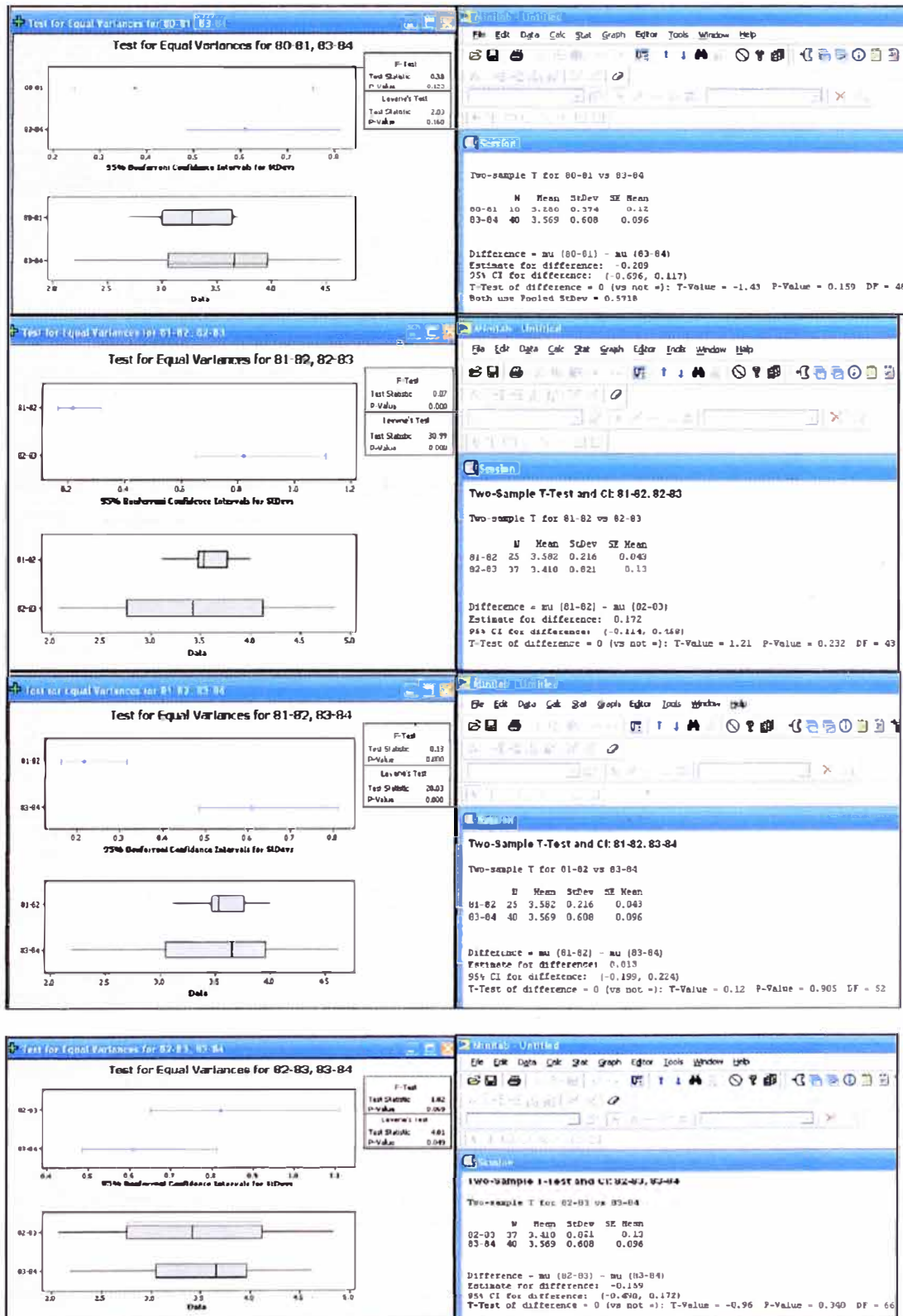




EVALUACION DE LA RUGOSIDAD CON EQUIPO BUMP INTEGRATOR CARRETERA CAÑETE - CHUPACA  
METODOLOGIA DE DISCRIMINACION DE DATOS  
Chambi Bonifacio Javier Alexis







Fuente: Aplicación en el programa Minitab



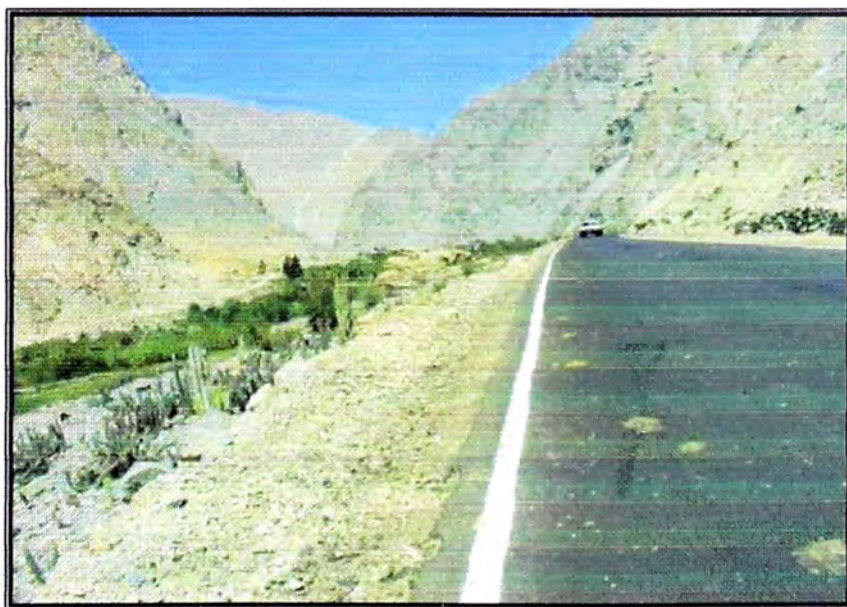
## ANEXO B.

### ANEXO B

#### ARCHIVO FOTOGRAFICO



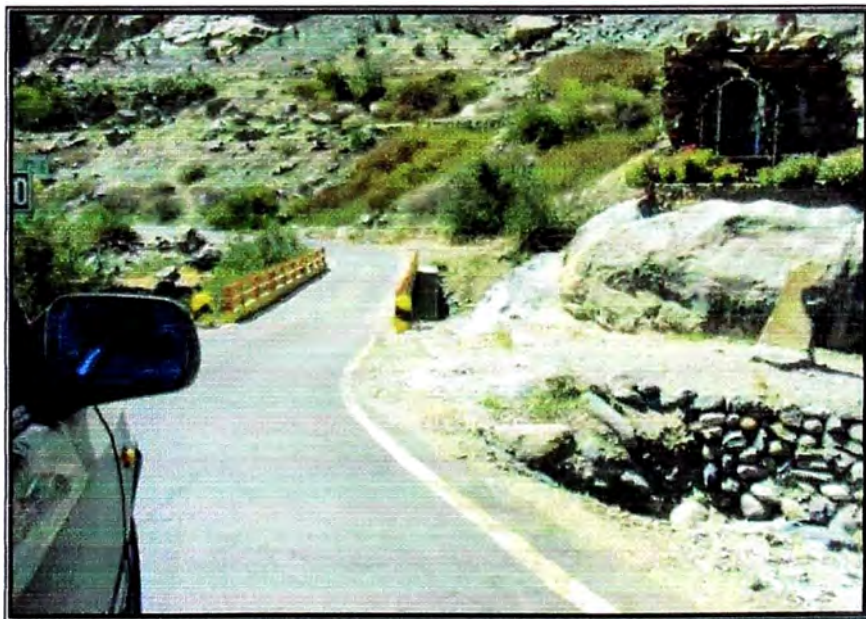
Hito de inicio de Tramo



Deben seleccionarse tramos rectos para la medición de la rugosidad



Presencia de Gibas en partes de las Vías, dificultan la medición.



Presencia de Puentes en el Circuito exige al tramo para la evaluación de la rugosidad porque es de material diferente al resto de la carretera





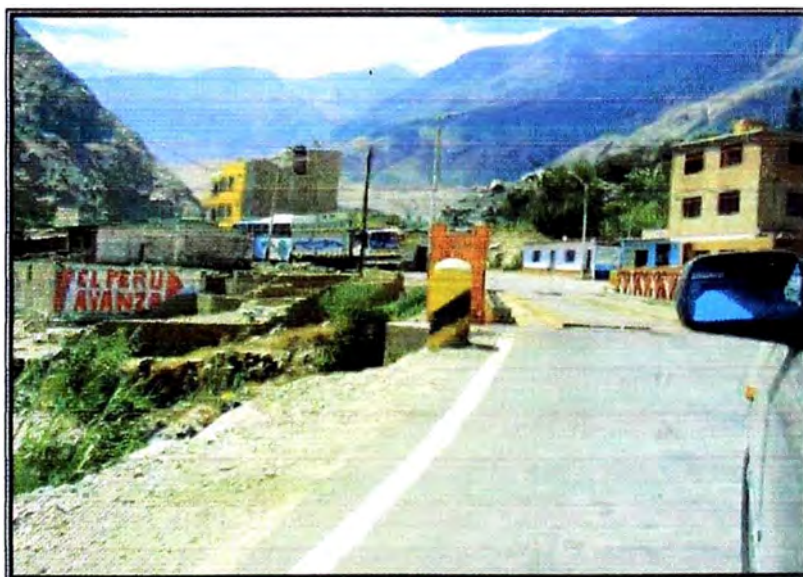
Medición a la altura del Km 76.00



En el caso de gibas obliga a que se suspenda el proceso de medición de la rugosidad, ya que el equipo Bump Integrator obtiene valores de rugosidad altos por la diferencia de nivel existente en el tramo de la giba.



Desprendimiento de material de los cerros, por lo cual obliga a reducir la velocidad del vehículo por lo que el tramo no es considerado en la evaluación.



Llegada a la Zona de Catahuasi

## ANEXO C.

### VALORES IRI MEDIDOS CON EQUIPO MERLIN.

PROGR. INICIAL	PROGR. FINAL	TIPO DE TRATAMIENTO	FECHA	IRI (m/km) MERLIN AUTOMAT (carril derecho)	IRI (m/km) MERLIN MANUAL (carril izquierdo)	Promedio
74 + 000	74 + 400	SLURRY SEAL	27/11/2010	4.16	3,70	3.93
74 + 400	74 + 800	SLURRY SEAL	27/11/2010	3.27	3,29	3.28
74 + 800	75 + 200	SLURRY SEAL	27/11/2010	3.76	3,30	3.53
75 + 200	75 + 600	SLURRY SEAL	27/11/2010	3.15	2,85	3
75 + 600	76 + 000	SLURRY SEAL	27/11/2010	3.76	3,30	3.53
76 + 000	76 + 400	SLURRY SEAL	27/11/2010	3.53	3,67	3.6
76 + 400	76 + 800	SLURRY SEAL	27/11/2010	3.65	3,28	3.46
76 + 800	77 + 200	SLURRY SEAL	27/11/2010	3.22	3,08	3.15
77 + 200	77 + 600	SLURRY SEAL	27/11/2010	3.06	3,20	3.13
77 + 600	78 + 000	SLURRY SEAL	27/11/2010		3,46	3.46
78 + 000	78 + 400	SLURRY SEAL	27/11/2010		3,10	3.1
78 + 400	78 + 800	SLURRY SEAL	27/11/2010		3,72	3.72
79 + 000	79 + 400	SLURRY SEAL+ MONOCAPA	27/11/2010	4.36	4,28	4.32
79 + 400	79 + 800	SLURRY SEAL + MONOCAPA	27/11/2010	3.7	3,27	3.48
79 + 800	80 + 200	SLURRY SEAL + MONOCAPA	27/11/2010	3.88	3,72	3.8
80 + 200	80 + 600	SLURRY SEAL + MONOCAPA	27/11/2010	4.31	3,65	3.98
80 + 600	81 + 000	SLURRY SEAL +MONOCAPA	27/11/2010	3.62	4,13	3.88

Valores de Iris medidos por el grupo N°3 del curso de titulación UNI- FIC 2010-II.