

DETERMINACIÓN DE UMBRALES DE RUGOSIDAD (IRI) OBTENIDO DE BASE DE DATOS DE CAMINOS CON CONTROLES RECEPTIVOS

EDGARDO TOWNSEND PINTO, Ingeniero Civil

Dirección de Vialidad de Coquimbo, edgardo.townsend@moppt.gov.cl

CHRISTIAN E. VELIZ VARAS, Ingeniero Civil.

RESUMEN

El presente trabajo tiene por finalidad, analizar una base de datos de determinaciones de rugosidad, en contratos que cuentan con controles receptivos de dicho parámetro a lo largo del país.

Para los fines indicados, fue necesario conformar una base de datos de valores de rugosidad en contratos con superficies de asfalto, hormigón y doble tratamiento.

Posteriormente, toda la información catastrada fue analizada en forma estadística, determinándose los estadígrafos necesarios que permitieron derivar a los umbrales a exigir en futuras obras viales, definiéndose de igual forma los criterios de aceptación y rechazo que debieran exigirse en futuras obras viales que tengan como exigencia el Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

1. INTRODUCCIÓN

En la presente investigación, se estudia la incorporación del parámetro de irregularidad en los caminos pavimentados de Chile, conocido internacionalmente como INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI), todo ello respecto de la conceptualización de dicha determinación, equipos y formas de medida del mismo, umbrales y rangos de aceptación, tanto en lo actualmente especificado, como en aquello que se considera aconsejable de aplicar según el tipo de carpeta de rodado presente en una obra vial ya sea que esta corresponda a una etapa de construcción, pavimentación o rehabilitación.

Para los fines que se indican, fue necesario conformar una gran base de datos de controles receptivos de IRI a lo largo del país y proponer una definición de umbrales y rangos de aceptación o rechazo respecto del parámetro antes mencionado.

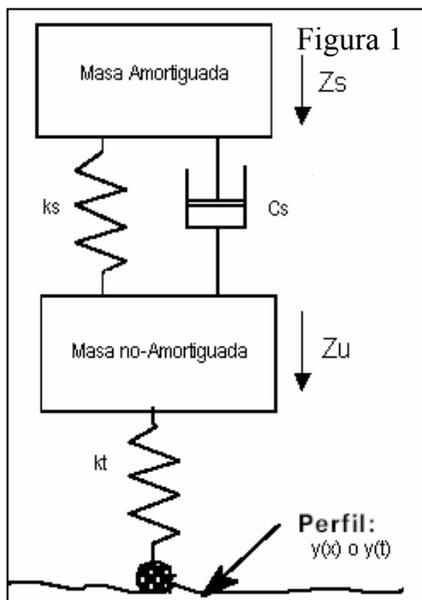
2. INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL, IRI

La investigación llevada a cabo permitió conocer la forma de obtención del Índice de Rugosidad Internacional, el cual contempla etapas claramente diferenciadas y ajustadas a un desarrollo

sistemático, en el cual se involucran aspectos de análisis estadístico del perfil y una posterior modelación para medir la rugosidad asociado al perfil de un camino.

Lo anterior, involucra la utilización de herramientas matemáticas, estadísticas y computacionales que permitan derivar a la medida de rugosidad asociada al camino.

Inicialmente es necesario medir las cotas de terreno que nos permitan representar el perfil real del camino a través de un sistema clasificatorio asociado a la precisión obtenida por parte del instrumento utilizado en la auscultación del camino, para posteriormente mediante análisis estadístico (media móvil) y adecuaciones matemáticas, poder generar un nuevo perfil posible de ser analizado desde el punto de vista de las irregularidades que en él se pudieran observar. Lo anteriormente expuesto debe ser reconocido como un procedimiento de **primer filtro** en el proceso de medida del Índice de Rugosidad Internacional.



A continuación se hace mención al **segundo filtro**, a través del cual debe ser sometido el perfil longitudinal del camino y se reconoce como el Modelo de Simulación del “Cuarto de Coche” (Figura 1), a través de éste se registran las características asociadas al camino basadas en los desplazamientos verticales inducidos a un vehículo estándar.

El modelo de Simulación del Cuarto de Coche, consta de una masa “amortiguada o suspendida” (masa de un cuarto-coche 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.

A partir de lo señalado, se define el modelo del Cuarto de Coche como un conjunto de masas inerciales, resorte sistemas de amortiguación que interactúan con el perfil del camino al cual le es aplicado el primer filtro y cuya resolución nos lleva a medir los movimientos verticales no

deseados atribuibles a la irregularidad del camino.

La figura 1 muestra un esquema del modelo de “Cuarto de Coche” ya mencionado, en el cual se incluyen los efectos dinámicos que determinan la rugosidad del camino que causan las vibraciones no deseadas a los usuarios que transitan por las vías.

Como una forma de profundizar en lo expuesto, cabe señalar que la definición del IRI se estableció a partir de conceptos asociados a la mecánica vibratoria de los sistemas dinámicos todo ello sobre la base de un vehículo que se modeló simplificada a través de un conjunto de masas ligadas entre sí y que generaban un movimiento vertical al ser desplazadas por el camino. Para efectos prácticos, el modelo a diferencia de otros (modelo del “Medio Coche” o “Coche Entero”), permite reducir el análisis de una superficie (la calzada) al análisis de una línea que representa el perfil longitudinal, es decir, desde un análisis bidimensional a un estudio unidimensional.

Los movimientos sobre el perfil de la carretera están asociados a desplazamientos verticales, velocidad y aceleraciones de masas, quedando todo el sistema regido por la primera Ley de Newton, $F = m \cdot a$.

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 se acumula. El valor en m/km (metros acumulados por la suspensión por kilómetros viajados) es la medida final de la regularidad del camino.

El sistema que representa el modelo dinámico del cuarto-coche tiene dos grados de libertad (los desplazamientos verticales z_u y z_s de las masas que representan el vehículo). El sistema dinámico está excitado por una fuerza exterior que es el perfil de la carretera.

De lo antes expuesto, el modelo se puede separar en dos sistemas independientes, tanto para la masa suspendida como para la masa no suspendida y los desplazamientos verticales inducidos por ambas masas al recorrer el perfil longitudinal del camino y se denominan z_s y z_u .

3. ANALISIS METODOLOGICO DE LA RUGOSIDAD EN CAMINO NACIONALES

Toda especificación que apunte a medir la calidad de las obras, desde cualquier punto de vista ya sea funcional o estructural, conlleva en una primera etapa el asumir valores umbrales máximos permisibles que permitan asegurar que las obras de infraestructura puedan mantenerse en el tiempo para la cual fueron concebidas.

En una etapa siguiente, una vez conocida la información real obtenida de la verificación de la calidad de las vías y por consiguiente, disponer de una base de datos de un gran número de controles receptivos, es posible validar o recalibrar los umbrales y metodologías que permitan establecer criterios de aceptación o rechazo de la infraestructura vial.

De acuerdo a las consideraciones expuestas, cabe señalar que a la fecha del presente estudio, se cuenta con una definición de umbrales de exigencias, los cuales han servido en una primera etapa para incorporar la exigencia de rugosidad en los caminos nacionales, pero hoy en día se dispone de una base de datos importantes de un sin número de contratos a lo largo del país, a través de los cuales, es posible analizar los mismos, con el propósito de hacer una propuesta metodológica que este acorde con las actuales técnicas constructivas y variables exógenas que pudieran ser importantes de considerar en la exigencias futuras con respecto a la rugosidad.

En una primera etapa de la presente investigación, se procedió a catastrar la información de controles receptivos hechos en distintos caminos del país, a los cuales se le había incorporado la exigencia de rugosidad, tanto en carpetas de Asfalto, Hormigón y Tratamientos Superficiales.

Los controles de los cuales se hace mención, fueron obtenidos por el “Departamento de Auscultaciones” perteneciente a la Unidad del Laboratorio Nacional de Vialidad, la cual dispone de equipos de última tecnología (Perfilómetro Láser) para la captura de información que caracteriza a los caminos.

Cabe hacer notar que la información que ha servido de base a la presente investigación, solo guarda relación solamente con caminos pertenecientes a la red vial no incorporados en los actuales programas de concesiones que lleva a cabo el Ministerio de Obras Públicas a lo largo del país.

Una vez conformada la base de datos, se procedió en una segunda etapa a elaborar una encuesta, la cual tenía por finalidad, consultar a las respectivas Inspecciones Fiscales de los contratos antes mencionados, respecto de apreciaciones como igualmente acerca de identificación de variables tanto constructivas como geométricas asociadas al camino, que pudiesen ser relevantes e incidentes en la medida de rugosidad del camino.

Con la información antes indicada, se enfocó la presente investigación sobre la base de los siguientes aspectos:

- Un análisis estadístico de los resultados de rugosidad, que pudieran orientar respecto de umbrales, rangos de trabajo u otros.
- A partir de la encuesta, identificar aquellas variables que pudieran tener algún grado de correlación con la rugosidad de los caminos.

4. ANALISIS ESTADÍSTICO

Es común decir, que los métodos estadísticos de control de calidad resultan ser una metodología un tanto idealista, fuera de las posibilidades reales de un ingeniero común, la afirmación anterior, merece ser rebatida desde más de un punto de vista. En primer lugar, es un hecho fácil de comprobar que el control estadístico de calidad, es uno de los más económicos en el sentido que requiere menos muestreo y menos trabajo de laboratorio, además, la interpretación del trabajo de control es limpia e inmediata, en tanto que métodos más tradicionales ante un número excesivo de resultados hacen muchas veces dificultoso el análisis de los mismos. En segundo lugar, los métodos estadísticos de control ofrecen una garantía lógica a la cual es muy difícil de llegar por la simple acumulación de observaciones.

A mayor abundamiento en la materia, cabe señalar, que es posible a partir de la medida de estadígrafos, describir y cuantificar el comportamiento de una población de datos y además poder hacer inferencias respecto de las tendencias y del cumplimiento de la calidad de las obras.

Por las consideraciones antes expuestas, se puede afirmar que el análisis estadístico tiene plena validez en el control de la calidad asociado a la construcción vial.

Una vez validado la estadística como una herramienta de análisis, podemos afirmar que la experiencia nos muestra que si el número de datos que se dispone es lo suficientemente grande, el comportamiento asociado al conjunto de datos se acerca a una curva continua de distribución de datos reconocida como una Distribución Normal o de Gauss, lo anterior es verificado con la ayuda de una prueba de Ajuste de Bondad, la cual nos permite verificar la hipótesis anterior, denominada “Prueba de Kolmogorov- Smirnov”.

A continuación y bajo las consideraciones antes expuestas, se llegó a determinar algunos estadígrafos, tales como el promedio y desviación estándar, que nos permitirán describir la situación particular de cada contrato analizado y junto con ello lograr definir el comportamiento asociado a cada una de las superficies controladas.

De acuerdo a lo anterior y consultada la literatura referida a especificaciones de rugosidad aplicada en otros países, se estimó procedente estudiar el comportamiento de cada contrato en particular sobre la base de generar “**Curvas de Frecuencias Porcentuales Acumuladas**” o de “**Frecuencia Relativa Acumulada**”, las cuales permiten reconocer el porcentaje acumulado de valores de rugosidad presentes en una carpeta de rodado en estudio.

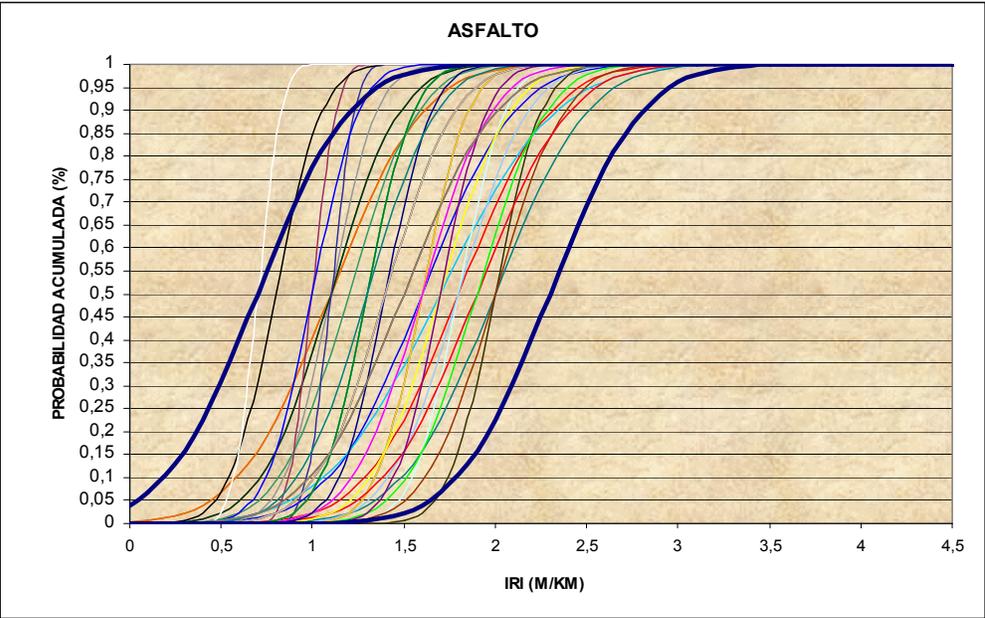


GRAFICO 1

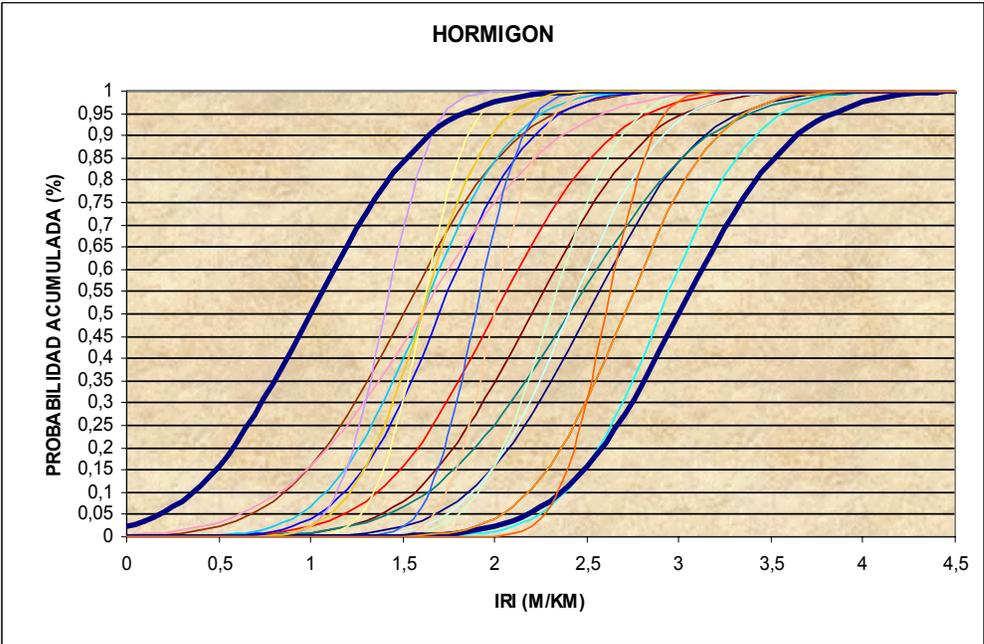


GRAFICO N°2

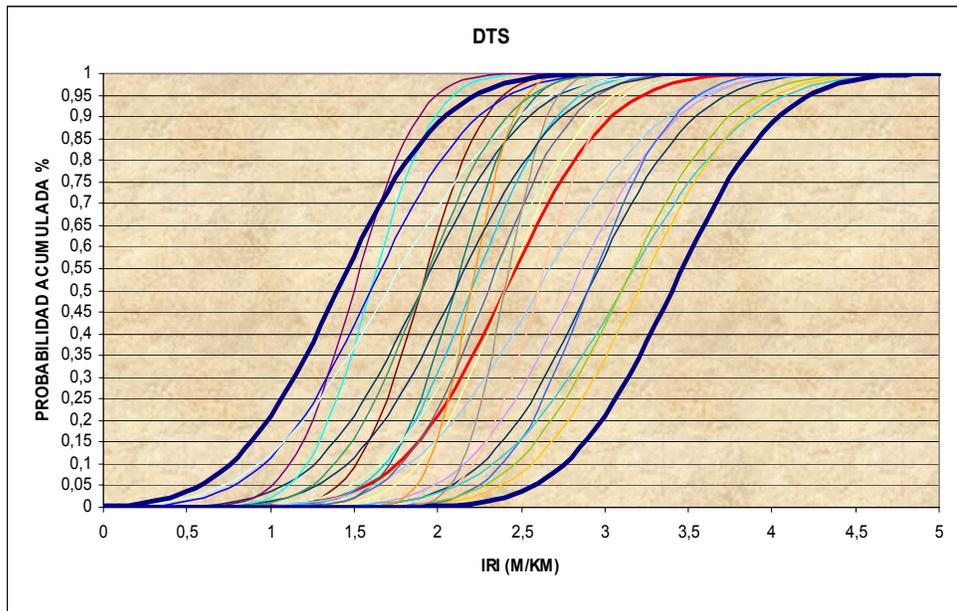


GRAFICO N°3

En los gráficos 1,2,3, se muestra el comportamiento de las distintas curvas obtenidas bajo las consideraciones antes expuestas, las cuales a su vez, han sido agrupadas de acuerdo al tipo de superficie de pavimento. De igual forma, en ellos se ha trazado curvas que delimitan un espacio gráfico (Color Azul), en el cual se encuentra la mayoría de las curvas obtenidas y con ello será posible derivar a los límites de especificaciones de rugosidad pretendidos, como igualmente de sus correspondientes niveles de tolerancias.

Si reconocemos los espacios gráficos definidos anteriormente, como las envolventes que representan el comportamiento de las distintas superficies analizadas, podemos a partir de ellas, obtener los valores más representativos de la población en estudio, tanto del punto de vista de su promedio, como de su desviación estándar, según se muestra en la tabla siguiente:

ESTADIGRAFOS ASOCIADO A CADA TIPO DE CARPETA

Carpeta de Rodado	Promedio (m/km)	Desv. Estándar (m/km)
Asfalto	1.5	0.4
Hormigón	2.0	0.5
D.T.S.	2.4	0.5

A partir de las envolventes que se muestran en los gráficos anteriores, podemos fijar una nueva condición de exigencia, el cual se determinará a partir de una curva central definida como “**Curva Patrón**”, que se caracteriza por un valor promedio y una desviación estándar y que su generación es a partir de fijar límites $\pm 1\sigma$ con respecto a la Curva Patrón. A continuación en los

gráficos 4, 5 y 6, se muestra la banda antes mencionada con la Curva Patrón asociada a cada tipo de carpeta en estudio.

GRAFICO N°4

CARPETA RODADO	% de Longitud con IRI		
	50%	85%	99%
D.T.S.	<2.4 m/km	<2.9 m/km	<3.4 m/km

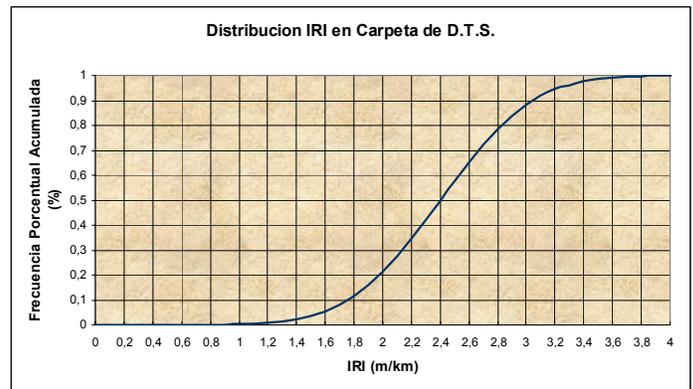
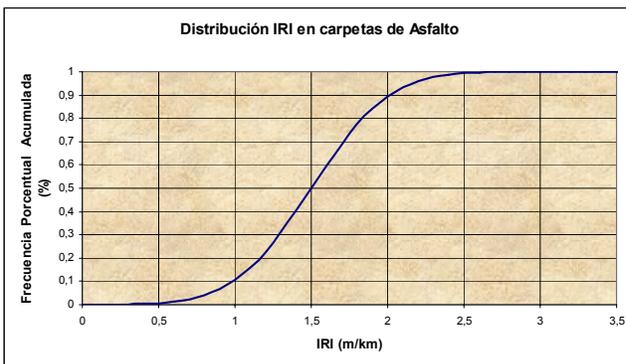
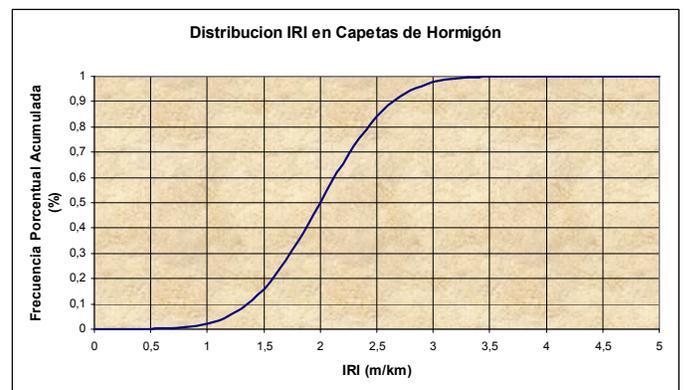


GRAFICO N°5



CARPETA RODADO	% de Longitud con IRI		
	50%	85%	99%
Asfalto	<1.5 m/km	<1.9 m/km	<2.4 m/km

CARPETA RODADO	% de Longitud con IRI		
	50%	85%	99%
Hormigón	<2.0 m/km	<2.5 m/km	<3.0 m/km



En resumen, lo anterior debe ser entendido en la idea de no exceder valores de rugosidad superiores a los expuestos en las gráficas mencionadas, aún cuando, condiciones exógenas vinculadas con aspectos constructivos como de proyecto pudieran afectar la medida del parámetro de rugosidad asociado a la Infraestructura Vial.

Lo anteriormente expuesto se propone como un marco referencial, que permita establecer las especificaciones de rugosidad y los niveles de aceptación en los futuros contratos de obras que contrate la Dirección de Vialidad.

5. ANALISIS CUALITATIVO

Según fuera señalado, en una segunda etapa se procedió a realizar una encuesta, la cuál se formuló sobre la base de consultas hechas respecto de posibles factores que a priori, se estimaban que pudieran incidir en forma desfavorable sobre la rugosidad de los caminos.

De acuerdo a lo anterior, el formato de encuesta se elaboró haciendo indagaciones preliminares con Inspectores Fiscales de la Dirección Regional de Vialidad de Coquimbo, los cuales de acuerdo a la experiencia de terreno en contratos afectos a control de rugosidad, dieron sus apreciaciones respecto de aquellas variables que a juicio de éstos pudieran ser incidentes en el Índice de Rugosidad Internacional. De lo expuesto se reconocen los siguientes en orden de importancia:

- Existencia de desvíos durante la ejecución de las obras.
- Existencia de obras de paralelismo durante el desarrollo del contrato.
- Características Geométricas del camino.
- Tecnología utilizada para la obtención de cotas de terreno en el nivel de subrasante.

A mayor abundamiento en la materia, se comenta más en extenso las variables precedentemente enumeradas, con las consideraciones que se estiman más relevantes y significativas respecto de la medida de rugosidad.

- Los desvíos hechos durante la construcción de las obras, tienen una alta incidencia en los valores receptivos de IRI, siendo este factor independiente del tipo de carpeta de rodado de la cual se trate. En dicho contexto, se puede afirmar que aquellos caminos que presentan valores de IRI por encima del patrón ya definido en el análisis estadístico, se asocian a obras ejecutadas con ausencia de desvíos durante la etapa constructiva de las mismas y cuya situación inversa (con desvíos) muestra índice de rugosidad menores.
- La existencia de obras de paralelismos, atraviesos u otras que provocan interferencias al buen desarrollo de las obras camineras, resulta ser otra variable que incide en la rugosidad.
- La geometría del camino asociada a curvas verticales y horizontales, pendientes, gradientes, peraltes y otras se reconocen como otro factor de incidencia durante la etapa constructiva de las obras, que pudieran afectar la medida de rugosidad.
- La calidad y tecnología de las maquinarias, los equipos topográficos, el adiestramiento y capacitación de operadores, deben asegurar la mejor terminación para las distintas capas estructurales establecidas en el proyecto vial y como consecuencia de ello, se debiera esperar que la superficie de rodado presente una baja rugosidad.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten reconocer que del análisis estadístico, se ha podido establecer que la población de datos de Rugosidad de un camino es asimilable a una Distribución Normal del tipo Gaussiana y a ella le son aplicables todos los conceptos estadísticos asociados. Lo anterior es aplicable sólo si el número de datos de rugosidad sea superior a 50, en caso contrario la población difícilmente será representada por la distribución antes mencionada.

De acuerdo a lo anterior, se logró representar cada uno de los contratos analizados en curvas de Frecuencia Relativa Acumulada permitiéndonos reconocer una curva de tendencia, denominada Curva Patrón, a través de la cual se generan las siguientes restricciones asociadas a cada una de las carpetas de rodado en estudio.

Carpeta de Rodado	% de longitud con IRI		
	50%	85%	99%
Asfalto	<1.5 m/km	<1.9 m/km	<2.3 m/km
Hormigón	<2.0 m/km	<2.5 m/km	<2.8 m/km
D.T.S.	<2.4 m/km	<2.9 m/km	<3.4 m/km

Analizado los resultados de la encuesta hecha para todos los contratos con controles receptivos correspondientes a todas las regiones del país, se ha podido establecer en términos cualitativos, lo siguiente:

-La presencia de desvíos en las obras, aseguran valores de rugosidad bajos, respecto de aquellas obras ejecutadas sin la presencia de éstos.

-La existencia de obras de paralelismos, atravesos u otras que provocan interferencias al buen desarrollo de las obras camineras, incide significativamente en la rugosidad.

-La geometría del camino asociada a curvas verticales y horizontales, pendientes, gradientes, peraltes y otras, afectan la adecuada terminación de los caminos en términos de obtener valores de IRI aceptables.

-La calidad y tecnología de las maquinarias, los equipos topográficos, el adiestramiento y capacitación de operadores, aseguran una baja rugosidad.

Por último, al ser aplicados los valores permisibles de IRI determinados en la presente investigación, en las correlaciones que vinculan éste último parámetro con el índice de serviciabilidad para mezclas asfálticas como superficies de hormigón, se ha podido establecer que los resultados obtenidos presentan una cercana concordancia (valores de “p” característicos de pavimentos nuevos para valores receptivos de IRI)

CARPETA DE ASFALTO	CARPETA DE HORMIGON	FUENTE
IRI = 1.5	IRI = 2.0	
$p = 5.85 - 1.68 * IRI^{0.5}$ p = 3.8	$p = 7.10 - 2.19 * IRI^{0.5}$ p = 4.0	D. Dujisin A. Arroyo
$p = 5 * \exp(-IRI/5.5)$ p = 3.8	-	HDM- III

7. SUGERENCIAS

De acuerdo a la presente investigación, se ha podido establecer la conveniencia de anticipar los controles de rugosidad en las capas estructurales inferiores a la superficie de rodado según así lo ha demostrado la experiencia Internacional, por lo cuál, ha modo de recomendación y acorde a la investigación realizada, se sugiere adoptar los valores referenciales que se indican en la siguiente tabla, con la finalidad de asegurar la mejor de las terminaciones en la superficie correspondiente a la última capa estructural a controlar.

Carpeta Asfáltica			
CAPA	PORCENTAJE TRAMO		
	50%	80%	100%
1ª Capa bajo rodadura	2.3	3.1	3.9
2ª Capa bajo rodadura	3.1	4.3	5.5

Carpeta Hormigón			
CAPA	PORCENTAJE TRAMO		
	50%	80%	100%
1ª Capa bajo rodadura	3.0	4.0	5.0
2ª Capa bajo rodadura	4.0	5.5	7.0

En otro orden de ideas, se sugiere seguir profundizando en aquellos aspectos relativos a la valoración que debiera asociarse a las áreas de pavimentos que no cumplen con las exigencias de rugosidad, lo cuál debe ser llevado a cabo mediante un análisis técnico-económico, que considere aspectos relativos a: daño patrimonial de la infraestructura, los mayores costos de operación

asumidos por los usuarios de las vías, disminución del tiempo en que una obra se encuentra al servicio y otros.

De igual manera, se estima que para aquellas superficies del tipo Doble Tratamiento Superficial, no es procedente aplicar grados de afectación a las mismas, en consideración ha que éste tipo de superficie se condiciona a la terminación que se pudiera dar a la base granular que la sustenta.

8. BIBLIOGRAFÍA

- A Solminhiac, Hernán
“Infraestructura Vial”
Universidad Católica de Chile, (1999), Chile, 150 p.
- B Crespo del Río, Ramón
“Introducción a la pavimentación de firmes”
Cuaderno AEPO N° 4, Madrid, España, (1997) 40 p.
- C Sayers, M. W.; Gillespie, T.D. y Paterson, W.D.O.
“Guideline for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements”
World Bank Technical Paper Number 46, World Bank, Washington, (1986) 87 p.
- D Sayers, M.W. y Karamihas, S.M.
“The Little Book of Profiling”
University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI), USA, 1997,
100 p.
- E Sayers, M.W.
“On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile”
Transportation Research Record 1501, USA, (1995) 1-12 p.
- F Gillespie, T.D.
“Everything You always Wanted to Know About the IRI, but Were Afraid to Ask!”
Presentación desarrollada en “Fourth Annual Road Profile Users Group Meeting”,
Lincoln, Nebraska (Septiembre 22-24 1992) 13 p.
- G Sayers, M.W. y Karamihas, S.M.
“Interpretation of Road Roughness Profile Data”
University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI), (1996) 177p.
- H Jelves Mella, Enrique Juan Octavio
“Influencia del Diseño Geométrico de los pavimentos en IRI”
Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Universidad de Chile, (2000), Chile, 87 p.
- I Crespo del Río, Ramón
“Calidad ante la Rodadura”

Jornadas sobre la Calidad en el Proyecto y la Construcción de Carreteras, Barcelona, España, (19 de Mayo de 1999), 30 p.

J Yarza Alvarez, Pedro; Aliseda Pérez de Madrid, Pedro ; Crespo del Río, Ramón
“Regularidad Superficial en Carreteras de Reciente Construcción”
Jornadas sobre Auscultación y Toma de Datos para Planificación y Gestión de Carreteras.
Cáceres, (14 al 16 de Diciembre de 1999) 5 p.

K Schawn, Serie- Murra y R. Spiegel
“Estadística”
Edit. Mc. Graw-Hill Book Co. (1984).
México

Páginas Web de interés

www.aepo.es/ausc

www.arrb.org.au

www.umtri.umich.edu/erd/roughness/index.html

www.apsa.cl/HTML_Principal/Principal_Apsa.html

www.cedex.es/default.html