

“AÑO DEL BUEN SERVICIO AL CIUDADANO”

UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**EFFECTOS DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL (IRI) EN EL
NIVEL DE SERVICIO DE VIAS AFIRMADAS – CARRETERA
CHUPURO - LAPA**

PRESENTADO POR:

BACH. LEANDRO IRWIN RIVERA JARA

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

HUANCAYO-PERÚ

2017

ASESORA: ING. NATALY LUCIA CORDOVA ZORRILLA

HOJA DE CONFORMIDAD DE JURADOS

DR. CASIO AURELIO TORRES LOPEZ

PRESIDENTE

ING. MARCO ANTONIO SALCEDO RODRIGUEZ

ING. RANDO PORRAS OLARTE

ING. YINA MILAGRO NINAHUANCA ZAVALA

MG. MIGUEL ANGEL CARLOS CANALES

SECRETARIO DE DOCENTE

DEDICATORIA:

A mis padres Jesús, mi madre Mercedes y mi hermana Gianelle, quienes son la razón de mis deseos de superación.

Igualmente, a mis maestros por haberme dado el apoyo y orientación para la concretización del trabajo.

Leandro Irwin Rivera Jara

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	xvii
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.2.1. PROBLEMA GENERAL.....	3
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	4
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.5. HIPÓTESIS	5
1.5.1. HIPÓTESIS GENERAL.....	5
1.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA	5
1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.7. VIABILIDAD DEL ESTUDIO.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN	8

2.2.	BASES TEÓRICAS	10
2.2.1.	CARACTERÍSTICAS DE LA RED NACIONAL DE CARRETERAS 10	
2.2.2.	CARRETERAS PAVIMENTADAS Y NO PAVIMENTADAS.....	12
2.2.3.	ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL	21
2.2.4.	VELOCIDAD DE OPERACIÓN.....	41
2.2.5.	COSTOS DE OPERACIÓN DE LOS VEHÍCULOS	57
2.2.6.	NIVEL DE SERVICIO	79
2.3.	BASES LEGALES	87
2.4.	DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES	89
2.4.1.	EQUIPO MERLIN	89
2.4.2.	FORMATO DE CONTEO DE TRÁFICO	90
2.5.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	90
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	93
3.1.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	93
3.2.	TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN	93
3.3.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	94
3.4.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LOS DATOS 95	
3.4.1.	POBLACIÓN	95
3.4.2.	MUESTRA	95
3.5.	TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	95
4.	RESULTADOS.....	98
4.1.	ÍNDICE DE RUGOSIDAD.....	98
4.2.	VELOCIDAD DE OPERACIÓN	100
4.3.	COSTOS DE OPERACIÓN.....	104
4.4.	NIVEL DE SERVICIO.....	114

4.4.1. ANÁLISIS OPERATIVO DE SEGMENTOS DE TERRENO EN GENERAL	114
4.4.2. ANÁLISIS OPERATIVO DE PENDIENTES ESPECÍFICAS	115
4.5. MANTENIMIENTO	120
4.6. CONTRASTE DE HIPÓTESIS	127
5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	141
5.1. CONCLUSIONES.....	141
5.2. RECOMENDACIONES	142
BIBLIOGRAFÍA	144
ANEXOS	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Situación de las carreteras en el Perú al 31/12/2015.	11
Tabla 2: Escala de Índice de Serviciabilidad.	22
Tabla 3: Clasificación de las características geométricas de la superficie de los pavimentos.	25
Tabla 4: Velocidad libre	48
Tabla 5: Porcentaje por pendiente de terreno	49
Tabla 6: FSRG1 Factor de condición de velocidad de pavimento a 110 NRM. 50	
Tabla 7:FSRG2 Factor de velocidad para la condición del pavimento a 250 NRM	51
Tabla 8: Parámetros de velocidad de operación final.....	55
Tabla 9: Factores que afectan la VOC	58
Tabla 10: Costos de combustible y factores de consumo	59
Tabla 11: Ajuste por pendiente del consumo de combustible.	61
Tabla 12: Ajuste por curvatura para el consumo de combustible.	62
Tabla 13: FCGRVF ajuste de rugosidad para consumo de combustible.....	65
Tabla 14: Costos de aceites y factores de consumo	67
Tabla 15: Desgaste de llantas y parámetros de costos.....	69
Tabla 16: Ajuste de costo de llanta por pendiente y curvatura	71
Tabla 17: Proporciones de pendiente y curvatura preestablecidas	71
Tabla 18: Matriz de ajuste por rugosidad para neumático.....	73
Tabla 19: Costo de reparación y mantenimiento (RMUC)	74
Tabla 20: Índice de condición de pavimento	74
Tabla 21: Factores de tiempo y depreciación.....	75

Tabla 22: Factor por tipo de superficie.	76
Tabla 23: Nivel de servicio en un segmento de terreno general.....	81
Tabla 24: Factor de ajuste para distribución dirección en segmento de terreno general	81
Tabla 25: Factores de ajuste para el efecto combinado de ancho de carril y ancho de berma.	81
Tabla 26: Promedio equivalente a vehiculo de pasajeros para camiones, RV y buses.....	81
Tabla 27: Tabla de factores de hora pico.	83
Tabla 28: Valores de la relacion v/c	84
Tabla 29: Factor de ajuste para distribucion direccional.....	84
Tabla 30: Equivalentes a vehiculo de pasajeros	85
Tabla 31: Normativa de organizaciones para el control de IRI.	87
Tabla 32: Normativa de otros países respecto de la metodología de control de IRI.....	88
Tabla 33: Operacionalización de variables.....	94
Tabla 34: Índice de rugosidad internacional por progresiva y promedio.	99
Tabla 35: Velocidad de operación para los cuatro tipos de vehículos que transitan dicha carretera para el IRlc.	103
Tabla 36: Velocidad de operación para diferentes Índices de rugosidad y por tipo de vehículo	104
Tabla 37: Costo de operación por tipo de vehículo	110
Tabla 38: Costos de operación por km, por día, mes y año para todo el tramo y para el total de vehiculos.....	111
Tabla 39: Costos por índice de rugosidad internacional para los tipos de vehículos que transitan la vía.	112
Tabla 40: Costos de operación anual por el tráfico y por índices de rugosidad internacional	113

Tabla 41: tabla del análisis operativo para la sección con pendiente menor a 2%.	115
Tabla 42: análisis operativo para la sección con pendiente de 4%	116
Tabla 43: análisis operativo para la sección con pendiente de 5%:	117
Tabla 44: análisis operativo para la sección con pendiente de 6%:	118
Tabla 45: análisis operativo para la sección con pendiente de 7%:	119
Tabla 46: Costo de mantenimiento para un índice de rugosidad de 4.	120
Tabla 47: Costo de mantenimiento para un índice de rugosidad de 6.	121
Tabla 48: Costo de mantenimiento para un índice de rugosidad de 8.	121
Tabla 49: Costo de mantenimiento para un índice de rugosidad de 10.	122
Tabla 50: Costo de mantenimiento para un índice de rugosidad de 12.	122
Tabla 51: Costo de mantenimiento para un índice de rugosidad de 14.	123
Tabla 52: Costo de mantenimiento para diferentes índices de rugosidad	123
Tabla 53: Índice de rugosidad vs tiempo.	124
Tabla 54: Costos de operación y mantenimiento según el análisis para los diferentes índices de rugosidad.....	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Deformación	15
Figura 2: Erosión en vías afirmadas.	16
Figura 3: Baches o huecos en vías afirmadas.	16
Figura 4: Encalaminado en vías sin afirmar.	17
Figura 5: Lodazal y cruce de agua.	17
Figura 6: Curva del comportamiento de un pavimento.	22
Figura 7: Estado del pavimento vs vida del pavimento.	23
Figura 8: Índices de serviciabilidad de referencia.	23
Figura 9: Modelo cuarto de carro o Golden car.	26
Figura 10: Medición de las desviaciones de la superficie del pavimento respecto a la cuerda promedio.	31
Figura 11: Histograma de la distribución de frecuencias de una muestra de 200 desviaciones medidas en forma consecutiva.	32
Figura 12: Equipo MERLIN.	34
Figura 13: Hoja de escala adherida al equipo para determinar la dispersión de las desviaciones de la superficie respecto del nivel de referencia.	35
Figura 14: Formato para la recolección de datos de campo.	38
Figura 15: Velocidad de funcionamiento y VCR de los vehículos privados.	54
Figura 16: Distribución de los Índices de Rugosidad Internacional obtenidos con SPSS y Excel respectivamente.	99
Figura 17: Velocidad de operación para los cuatro tipos de vehículos que transitan dicha carretera para el $IRI_c=9.26$	103
Figura 18: Velocidad de operación para diferentes Índices de rugosidad y por tipo de vehículo	104

Figura 19 Costo de operación por tipo de vehículo en soles/km	110
Figura 20: Costo de operación en un año por tipo de vehículo para el IRIc encontrado	111
Figura 21: Costo de operación para el tráfico dado en la carretera, para un año	112
Figura 22: Costo de operación para el tráfico dado en la carretera, para un año	113
Figura 23: Costos de operación total por año para los índices de rugosidad indicados.	114
Figura 24: Índice de rugosidad internacional con respecto al tiempo.	124
Figura 25: Costo de mantenimiento para diferentes índices de rugosidad.....	125
Figura 26: Costo de operación según análisis para los diferentes índices de rugosidad.....	126
Figura 27: Costo de operación y mantenimiento según análisis para los diferentes índices de rugosidad	126

RESUMEN

En la presente investigación titulada: “Efectos de la regularidad superficial (IRI) en el nivel de servicio de vías afirmadas – carretera Chupuro – Lapa”, se realiza un minucioso trabajo para ver cómo influye la regularidad superficial en el nivel de servicio en vías afirmadas, para tal fin se analizan; el índice de rugosidad internacional, velocidad de operación, costos de operación y mantenimiento.

En primer lugar, se determinó el índice de rugosidad internacional de la carretera Chupuro – Lapa desde el km 0+000 hasta el km 10+460, utilizando un equipo de bajo costo, bajo rendimiento, pero gran precisión y fácil manejo, como es el equipo de MERLIN.

Obtenida el índice de rugosidad internacional de la carretera se procedió a calcular la velocidad de operación, factor importante para calcular los costos de operación, considerando el conteo de tráfico, tipos de vehículos y la rugosidad de la vía. Obtenida la velocidad de operación se calculó los costos de operación para vehículos privados, vehículos comerciales ligeros, buses y camiones; ya que son los 4 tipos de vehículos que transitan por dicha carretera.

Por último, se calculó el nivel de servicio para el tramo de carretera considerando el conteo de tráfico, el volumen en la hora pico, el flujo vehicular y otros factores señalados en la sección 2.2.6.

Como resultado de la investigación, se obtuvo que la velocidad de operación vehicular es afectada por la rugosidad de la carretera, teniendo mayor efecto en los camiones y buses, con una velocidad de operación vehicular de 46 km/h y 51 km/h, respectivamente. Asimismo, los costos de operación obtenidos para vehículos particulares son de S/.98.6 por día, para vehículos comerciales de S/.

112.45 por día, para camiones es de S/. 366.19 por día y para buses de S/.648.83 por día; y un costo de operación anual de la carretera para todos los vehículos de S/. 2, 554,533.54 por año.

Así mismo se concluye que el costo de mantenimiento será menor cuanto mayor sea el índice de rugosidad, ya que, para mantener el índice de rugosidad, se requiere hacer más veces el mantenimiento mientras que para índices de rugosidad más alto indica que se realizó menos veces el mantenimiento.

Palabras clave: índice de rugosidad internacional (IRI), velocidad de operación vehicular, costos de operación vehicular, costo de mantenimiento, nivel de servicio vías afirmadas.

ABSTRACT

In the present investigation titled: "Effects of surface regularity (IRI) on the level of service of affirmed roads - Chupuro - Lapa highway", a thorough work is done to see how influence the superficial regularity in the level of service in affirmed roads , For this purpose are analyzed; The international roughness index, operating speed, operating and maintenance costs.

Firstly, the Chupuro - Lapa international roughness index was determined from km 0 + 000 to km 10 + 460, using a low cost, low performance equipment, but great precision and easy handling, such as Team of MERLIN.

Obtaining the international roughness index of the road proceeded to calculate the speed of operation, an important factor to calculate the operating costs, considering the traffic count, vehicle types and road roughness. Obtained the operating speed was calculated operating costs for private vehicles, light commercial vehicles, buses and trucks; Since they are the 4 types of vehicles that transit by that highway.

Finally, the service level for the road segment was calculated considering the traffic count, peak volume, traffic flow and other factors indicated in section 2.2.6.

As a result of the investigation, it was obtained that the speed of vehicular operation is affected by the roughness of the road, having a greater effect on trucks and buses, with a vehicle operating speed of 46 km / h and 51 km / h, respectively. Also, the operating costs obtained for private vehicles are S / .98.6 per day, for commercial vehicles of S / . 112.45 per day, for trucks is S / . 366.19 per day and for buses of S / .648.83 per day; And an annual highway operating cost for all S / . 2, 554,533.54 per year.

It is also concluded that the maintenance cost will be lower the higher the roughness index, because, in order to maintain the roughness index, maintenance is required more times, while for higher roughness indexes, The maintenance.

Keywords: International roughness index (IRI), vehicle operating speed, vehicle operating costs, maintenance cost, service level asserted roads.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como título: “Efectos de la regularidad superficial (IRI) en el nivel de servicio de vías afirmadas – carretera Chupuro – Lapa” cuyo objetivo fue determinar la influencia de la regularidad superficial en el nivel de servicio en vías afirmadas.

El 29.6% de la red vial en el Perú corresponde al nivel de afirmado cuyo estado es materia de análisis, ya que muchas de estas vías requieren un mantenimiento. Para evaluar dicho mantenimiento es necesario obtener el Índice de regularidad internacional; y si se ve la posibilidad de mantenimiento quiere decir que disminuyo el nivel de servicio de la vía. De ahí la pregunta cuál es la relación entre regularidad superficial con la velocidad de operación y el nivel de servicio de dichas vías.

Para la determinación del Índice de rugosidad internacional se tiene como antecedente la investigación de Pablo Del Águila Rodríguez titulada “Metodología para la determinación de la rugosidad de los pavimentos con equipo de bajo costo y gran precisión” en el cual detalla el método con el equipo MERLIN, basado en la evaluación de 3000 km de carreteras en el Perú.

Como antecedente y guía para el Nivel de Servicio de una carretera, tuvimos al Manual de Capacidad de carreteras – Reporte especial 209 (Transportation Research Board, 1998) el cual describe la metodología para calcular el nivel de servicio para diferentes tipos de carreteras y otras condiciones.

La presente investigación pretende determinar la relación entre el Índice de Rugosidad Internacional con el nivel de servicio, el costo y velocidad de operación en la vía Chupuro – Lapa, para lo cual se desarrollaron los siguientes capítulos:

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA; se describe y formula el problema, para luego plantear los objetivos y posteriormente las hipótesis.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO; se describe la metodología de cálculo de: Índice de Rugosidad Internacional con el equipo MERLIN, Costos de operación, velocidad de operación y nivel de servicio.

CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN; en este capítulo se plantea el diseño de investigación, se señala el tipo y nivel de investigación, la operacionalización de variables y las técnicas e instrumentos para el correcto desarrollo de la investigación.

CAPITULO IV: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS; en este capítulo se presentan los cálculos del índice de Rugosidad Internacional, la velocidad de operación, costos de operación y el nivel de servicio; así como los análisis respectivos.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES en este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas de los cálculos y algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

El autor

CAPITULO I:
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

La presente investigación está delimitada a vías a nivel de afirmado, en la vía de Chupuro - Lapa Km 0+000 al Km 10+000, ubicado en el departamento de Junín, provincia de Huancayo, distrito de Chupuro en el año 2016.

De acuerdo con el informe estadístico del Ministerio de transporte y comunicaciones del 31 de Diciembre del 2015, un 85.63% de la red vial en el Perú, aproximadamente 141,603 kilómetros, no se encuentran pavimentadas, de las cuales el 35.13% corresponde a vías en nivel de afirmado, que son 49,746.9 kilómetros. También, 30,767.2 kilómetros sin afirmar y 61,088.6 kilómetros a nivel de trocha., las carreteras vecinales pavimentadas apenas alcanzan los 1,890.1 kilómetros, de un total de 114,648.5 kilómetros. Esto equivale a solo 1,65%. Estas carreteras a nivel de afirmado, destacables por su longitud y cobertura, permiten la integración de todas las poblaciones de las regiones del país; y es uno de los factores que ha propiciado su desarrollo socio-económico. Por lo cual es materia de estudio, el estado y el mantenimiento de dichas vías.

La rugosidad es la desviación de una determinada superficie de pavimento respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo y la calidad al manejar (American Society for Testing and Materials, 1995). En vista de tal definición, la medición de la rugosidad de una vía, ha de ser un parámetro importante, porque afectan la dinámica del vehículo y la calidad al manejar. Es así que en 1986 el Banco Mundial propone el Índice de rugosidad internacional (IRI) como un estándar estadístico de la rugosidad que sirve como parámetro de referencia en la medición de rodadura de un camino.

El nivel de servicio en carreteras es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación del flujo vehicular y de su percepción por los motoristas y/o pasajeros. Estas condiciones se describen en términos de factores tales como la velocidad y el tiempo de recorrido, la libertad de maniobras, la comodidad, la conveniencia y la seguridad vial. (Reyes Spíndola & Cárdenas Grisales, 1994). En vías afirmadas que corresponden a caminos vecinales estas condiciones suelen no ser las más óptimas. Por lo cual presentan

un bajo nivel de servicio. Generalmente el mantenimiento y conservación de dichas vías a nivel de afirmado no es el adecuado, ya que se pueden ver muchas vías en mal estado a lo largo y ancho de todo el Perú, lo cual causa que el costo de operación vehicular se incremente y afecte a los usuarios de dichas vías, a parte de la incomodidad en el viaje. El costo de operación vehicular y el costo de mantenimiento dependen del tiempo y del estado de la carretera. Por lo que se requiere un análisis de lo mencionado anteriormente, para una adecuada gestión del mantenimiento de carreteras.

Contar con mecanismos que contribuyan a una adecuada toma de decisiones en temas como planificación, diseño, construcción y conservación de vías ha representado un permanente desafío para las entidades encargadas. Por lo tanto, contar con herramientas capaces de evaluar y pronosticar adecuadamente el comportamiento de vías durante su ciclo de vida, es cada vez imprescindible, para hacer posible contribuir a una mejor elección del pavimento más conveniente acorde a las necesidades y la forma como técnica y económicamente se gestionaran y programaran los recursos disponibles para su conservación y mantenimiento.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

¿De qué forma influye la regularidad superficial en el bajo nivel de servicio en vías afirmadas y en el mantenimiento adecuado?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cómo influye la regularidad superficial en la velocidad de los vehículos en la carretera Chupuro - Lapa?
- ¿EL costo de operación vehicular en la carretera Chupuro – Lapa se ve afectado por el estado de la rugosidad superficial de dicha vía?
- ¿Cómo afecta la evaluación de la regularidad superficial en la gestión del mantenimiento adecuado de vías?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia de la regularidad superficial en el nivel de servicio en vías afirmadas.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular la influencia de la regularidad superficial en la velocidad de los vehículos en la carretera Chupuro – Lapa
- Conocer cómo afecta el estado de la rugosidad superficial en vías afirmadas en el costo de operación vehicular.
- Realizar un análisis de la gestión del mantenimiento para minimizar los costos por dicho proceso, mediante la evaluación de la regularidad superficial.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Teórica:

La presente investigación se justifica debido a las entidades encargadas de gestionar las vías de acceso locales, no cuentan en la actualidad con herramientas efectivas que les permitan una adecuada toma de decisiones respecto a la conservación de sus vías.

1.4.2. Practica:

La presente investigación se justifica en necesidad de dar solución, a los bajos niveles de gestión que presentan las entidades responsables velar por el buen estado de las vías, utilizando el ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL IRI, extraído de la vía en estudio, a fin de que se pueda determinar cuál sería la medida de rehabilitación más adecuada en base a un valor técnico cara a mejorar el nivel de servicio de la vía.

1.4.3. Metodológica:

A través de la evaluación en campo, realizando mediciones de rugosidad con el equipo de merlín se determinara los tramos representativos el valor de IRI, velocidad promedio de vehículos se determinara el nivel de servicio actual.

1.5. HIPÓTESIS

1.5.1. HIPÓTESIS GENERAL

La regularidad superficial (IRI) afecta significativamente en el nivel de servicio y en el mantenimiento adecuado de la carretera Chupuro - Lapa

1.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA

- La regularidad Superficial (IRI) influye en la velocidad de los vehículos en la carretera Chupuro – Lapa.
- La Regularidad Superficial (IRI) afecta en el costo de operación vehicular en la carretera Chupuro – Lapa.
- La Regularidad Superficial (IRI) es influyente en la gestión de mantenimiento de vías afirmadas.

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

- La presente investigación se realizó en la carretera de Chupuro – Lapa, y se tomó en cuenta las condiciones de dicho tramo de carretera, como el conteo de tráfico, la medición de la rugosidad con el equipo de MERLIN. Dichos parámetros solo serán aplicables para este este tramo de carretera.
- Estas datos obtenidos de los estudios mencionados anteriormente, están limitados temporalmente, ya que se realizaron en el presente año 2016.
- Por consecuencia los resultados obtenidos también se limitaran a la zona de estudio y al estado de la carretera en el presente año, ya que el deterioro varía con el tiempo.

1.7. VIABILIDAD DEL ESTUDIO

Para la recolección de información del estudio, así como de la metodología será necesario invertir tiempo y recursos económicos para los libros y elementos necesarios, dichos recursos serán asumidos por mi persona.

Para la investigación será necesario realizar el ensayo de rugosidad para lo cual se alquilara el equipo de MERLIN de una entidad, dicha entidad proporcionara de un personal operador del equipo. Se contactó con la empresa CEDECONSULT la cual se hará cargo de estas condiciones.

También será necesario realizar el conteo de tráfico, para lo cual se dispondrá de un periodo de tiempo específico, con dos horarios de conteo.

CAPITULO II:
MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN

(Arriaga Patiño, Garnica Anguas, & Rico Rodríguez, 1998) En nombre del Instituto Mexicano del Transporte realizan la investigación titulada “Índice Internacional de Rugosidad en la red carretera de México” para describir el concepto del IRI, los procedimientos para el cálculo del mismo y su correlación con los equipos de medición de rugosidad. La mayor contribución a la actividad de México es el transporte por carretera, por lo que es necesario que el transporte opera con base a parámetros de eficiencia. Se determinó algunas características del índice de rugosidad internacional y su necesidad de determinar el IRI para la conservación de la red nacional de México. Una de las conclusiones más resaltantes es que es necesario implementar el IRI para una mejor evaluación del estado superficial de los pavimentos. Se relaciona con la presente investigación al mencionar los costos de operación que genera el deterioro de una vía, al usuario.

(Pradena Miquel, 2006) Realiza un artículo de investigación titulado “Análisis de Regularidad Superficial en Caminos Pavimentados” debido a que las mediciones de regularidad en un pavimento son muy utilizadas en la actualidad por las agencias viales, ya que, son muy sensibles a la percepción de los usuarios, lo cual está acorde con la actual visión de la Ingeniería Vial de considerar a estos como clientes. Este artículo trata sobre la revisión del concepto, su importancia y terminología adecuada, la forma de medición y cálculo de la rugosidad, su consideración en el comportamiento de caminos pavimentados y en la forma de decisiones para una adecuada gestión vial. Determina que, un pavimento con menor IRI inicial implica mayor vida útil y necesidad de menor intervención, lo cual es muy relevante ya que, en la práctica muchas veces los caminos

pavimentados no son conservados oportunamente con lo que su deterioro se acelera y no prestan un nivel de servicio adecuado para el usuario. Esta investigación se relaciona con la presente investigación, por tratar sobre la rugosidad y el índice de rugosidad internacional.

(Del Aguila Rodríguez) Hace una investigación que tiene como título “Metodología para la determinación de la rugosidad de los pavimentos con equipo de bajo costo y gran precisión”, como su nombre indica se buscó determinar la rugosidad en las carreteras de Perú con un equipo de bajo costo, en específico con el equipo de MERLIN. Para tal motivo se realiza una descripción del equipo de MERLIN, la ejecución de ensayos y los cálculos correspondientes para determinar la rugosidad en la escala de IRI. Se relaciona con la presente investigación por la descripción del equipo y el desarrollo de los cálculos, ya que se utilizará el mismo equipo y una metodología similar.

(Onofre Calderón, Sánchez Pérez, & Santiago Viana, 2008) realizaron la tesis titulada “Determinación del Índice de Rugosidad Internacional de pavimentos usando el Perfilómetro Romdas z – 250” debido a la necesidad del uso de tecnología adecuada que permita dar soluciones eficientes en el mejoramiento de carreteras, ya que estas permiten el crecimiento económico. Para lo cual se describe los conceptos relacionados al Índice de Rugosidad Internacional así como los equipos usados para evaluar la rugosidad, dando énfasis en el Perfilómetro Romdas z – 250.

(CHOQUE SÁNCHEZ, 2012) Realiza la investigación titulada “Evaluación de aditivos químicos en la eficiencia de la conservación de superficies de rodadura en carreteras no pavimentadas” debido a que el deterioro de las carreteras no pavimentadas es más rápido con respecto a una vía pavimentada. Las partículas finas al aglutinarse con los agregados gruesos expuestos al medio ambiente pierden humedad; y con la acción física externa del tránsito vehicular genera disgregamiento superficial, convirtiéndose así en polvo particulado y posteriormente aparecen fallas superficiales como baches, ondulaciones, ahuellamientos, etc.; propuso aplicar aditivos químicos como alternativa de solución al deterioro acelerado, para lo cual se construyeron sectores de prueba que estuvieron sujetos a las mismas condiciones climáticas, mismas condiciones

geométricas de tráfico vehicular y del mismo tipo de suelo; para finalmente comparar y ver su desempeño en el tiempo por medio de dos indicadores: el índice de rugosidad internacional y el índice de condición en vía no pavimentada. Se relaciona con la presente investigación por el análisis para carreteras no pavimentadas.

(Montoya Goicochea, 2013) en su tesis de postgrado titulada “Análisis del IRI para un proyecto de carretera sinuosa concesionada en el Perú” menciona que la ecuación matemática del cálculo del IRI se desarrolló considerando las desviaciones con respecto a una superficie plana teórica (llana y no sinuosa), en la cual un vehículo podría transitar a 80 km/h. En tal sentido, considerando el fuerte trazo sinuoso y los fuertes cambios en la pendiente longitudinal necesarios para poder atravesar las cadenas montañosas que caracterizan la geografía peruana, es notorio indicar que existe una influencia, la cual dificulta que los procesos constructivos aseguren que los valores de rugosidad estén por debajo de los umbrales admisibles. También describe el control de la rugosidad que realizan las concesiones de las carreteras en el Perú. Concluye que para las vías de penetración de nuestro país, el parámetro que influye más en el valor del IRI es la curvatura horizontal; debido a que en esta hay cuatro cambios de pendiente claramente identificables a comparación de la curva vertical, en la que hay solamente 3 cambios. Asimismo, la cantidad de curvas horizontales, las cuales están en mucha mayor frecuencia que las curvas verticales. Se relaciona con la presente investigación, ya que la vía analizada no es una superficie plana.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. CARACTERÍSTICAS DE LA RED NACIONAL DE CARRETERAS

Nuestra red vial está clasificada en tres categorías: carreteras nacionales, departamentales y vecinales. Cuenta con un aproximado de 165,372.0 kilómetros de extensión, de los cuales 23,769.2 kilómetros se encuentran pavimentados (14.4% de la red total existente). La red nacional incluye 26,436.1 kilómetros (15.99%), la departamental 24,287.4 kilómetros (14.69%) y las vecinales 114,648.5 kilómetros (69.33%).

La red vial nacional está conformada por tres grandes ejes longitudinales y diecinueve corredores transversales, tienen como misión vincular a las capitales de departamento, los principales centros productivos con las ciudades como centros de consumo y puertos marítimos como nodos del comercio exterior; constituyendo la base de todo el sistema de carreteras del país. El estado de situación de las vías nacionales nos indica que el 69.7% (18,420.1 Km.) se encuentran pavimentadas, el 20.7% se encuentra a nivel afirmado, el 3.88% sin afirmar y el 5.75% trocha.

La red vial Departamental (24,287.4 Km. aproximadamente), comprende las rutas de importancia regional que articulan las capitales de departamento con las principales ciudades al interior de Región; sólo el 14.24% se encuentran pavimentadas, el 65.14% es afirmada, el 10.5% sin afirmar y el 10.12% en condición de trocha.

La Red Vial Vecinal (114,648.5 Km. aproximadamente) está conformada por las vías que enlazan a las capitales distritales y centros poblados importantes con la capital de la provincial; sólo el 1.65% de esta vías están pavimentadas, el 24.82% están afirmadas, el 23.7% sin afirmar y el 49.82% en condición de trocha.

RED VIAL DEL SINAC (N° Rutas)	EXISTENTE POR TIPO DE RODADURA				SUB TOTAL	PROYECTADA	TOTAL
	PAVIMENTADA	NO PAVIMENTADA					
		Afirmada	Sin Afirmar	Trocha			
TOTAL	23769.2	49746.9	30767.2	61088.6	165372.0	6567.6	171939.6
	14.4%	30.1%	18.6%	36.9%	96.2%	3.8%	100.0%
NACIONAL (141)	18420.1	5471.0	1026.1	1518.8	26436.1	1636.9	28072.9
DEPARTAMENTAL (396)	3459.0	15821.6	2549.2	2457.6	24287.4	4266.6	28554.0
VECINAL (15906)	1890.1	28454.2	27191.9	57112.2	114648.5	111.2	114759.7

Tabla 1: Situación de las carreteras en el Perú al 31/12/2015.

Fuente: Elaborado a partir de datos del MTC, informe estadístico 2015.

2.2.2. CARRETERAS PAVIMENTADAS Y NO PAVIMENTADAS

2.2.2.1. CAMINOS PAVIMENTADOS

Las carreteras con superficie de rodadura pavimentada según el (Ministerio de transportes y comunicaciones, 2013) son identificadas como sigue:

a. Pavimentos flexibles:

a.1 Compuestos por capas granulares (sub base y base drenantes) y una superficie de rodadura bituminosa en frío como: tratamiento superficial bicapa, lechada asfáltica o mortero asfáltico, micropavimento en frío, macadam asfáltico, carpetas de mezclas asfálticas en frío, etc.

a.2 Compuestos por con capas granulares (sub base y base drenantes) y una capa de rodadura bituminosa de mezcla asfáltica en caliente de espesor variable según sea necesario.

b. Pavimentos semirrígidos: conformados con capas asfálticas (base asfáltica y carpeta asfáltica en caliente); también se considera como pavimento semirrígido, la estructura compuesta por carpeta asfáltica en caliente sobre base tratada con cemento o base tratada con cal. Dentro del tipo de pavimento semirrígido, se ha incluido también los pavimentos adoquinados.

c. Pavimentos rígidos: conformado por losa de concreto de cemento hidráulico y una subbase granular para uniformizar las características de cimentación de la losa.

2.2.2.2. CAMINOS NO PAVIMENTADOS

Aquellas que tienen una superficie de rodadura de tierra, grava y carreteras afirmadas con material granular y/o estabilizados, con trabajos previos de alineación, con apropiada sección transversal y longitudinal, y adecuado drenaje; que son construidos por la necesidad de acceder a lugares remotos. Según (Ministerio de transportes y comunicaciones, 2013) tenemos:

a) Caminos de tierra, constituido por suelo natural y mejorado con grava seleccionada por zarandeo.

b) Caminos de grava (lastrados), constituidos por una capa de revestimiento con material natural pétreo, seleccionado manualmente o por zarandeo, de tamaño máximo de 75mm.

c) Caminos afirmados, constituidos por una capa de revestimiento con materiales de cantera, dosificados naturalmente o por medios mecánicos (zarandeo), con una dosificación especificada, compuesta por una combinación apropiada de tres tipos de material: piedra, arena y finos o arcilla, siendo el tamaño máximo deseable del material 25 mm.

Los caminos afirmados comprenden los siguientes tipos:

c.1 Afirmados con gravas naturales o zarandeadas

c.2 Afirmados con gravas homogenizadas mediante chancado

d) Caminos afirmados con superficie de rodadura estabilizada con materiales industriales:

d.1 Afirmados con grava tratada con materiales como: asfalto, cemento, cal, aditivos químicos y otros

d.2 Suelos naturales estabilizados con: material granular y finos ligantes, asfalto, cemento, cal, aditivos químicos y otros.

Es importante indicar que los criterios más importantes a fin de seleccionar la superficie de rodadura para una carretera afirmada, establecen que a mayor tránsito pesado, medido en ejes equivalentes destructivos, se justificará utilizar afirmados de mayor rendimiento y que el alto costo de la construcción debe impulsar el uso de materiales locales para abaratar la obra, lo que en muchos casos podrá justificar el uso de afirmados estabilizados. También es importante establecer que la presión de las llantas de los vehículos, deben mantenerse bajo las 80 (psi) libras por pulg² de presión para evitar daños graves a la estructura de los afirmados.

2.2.2.3. COMPORTAMIENTO DE CAMINOS PAVIMENTADOS Y NO PAVIMENTADOS

Este se mide por la calidad del servicio funcional y estructural que brinda durante un tiempo establecido. Generalmente nosotros los usuarios calificamos la calidad funcional, interesándonos principalmente la suavidad de la superficie, la seguridad y el aspecto general de la obra. Pero debemos agregar el comportamiento estructural, que es la capacidad del pavimento para soportar las cargas que impone el tránsito y ser capaz de resistir a los efectos del ambiente.

Las carreteras que se deterioran relativamente rápido necesitan mayor inversión, por lo que, con el desarrollo de carreteras pavimentadas y no pavimentadas. Las entidades responsables, como el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, deberán plantearse cuando intervenir y como medir el nivel de deterioro. Uno de los indicadores más conocidos que permite establecer la calidad del servicio de una carretera, es la serviciabilidad. La serviciabilidad fue definida como la capacidad de un pavimento para servir al tránsito para el cual fue diseñado (Pradena Miquel, 2006).

2.2.2.4. DETERIORO EN CARRETERAS SIN PAVIMENTAR

a. Descripción del mecanismo de deterioro

El mecanismo de deterioro de un camino sin pavimentar a diferencia de las carreteras pavimentadas consiste en un proceso progresivo más acelerado. Los finos al mezclarse con la humedad aglutinan a las fracciones más gruesas, y bajo la acción abrasiva de los neumáticos (acción del tráfico) llegan a pulverizarse en condiciones secas. Estos finos pulverizados aparecen como material particulado en suspensión (polvo) y por la constante pérdida de éstos es que los agregados gruesos están de manera suelta ante la acción del tráfico, y es así que la superficie de rodadura comienza a desgastarse de manera progresiva dando lugar a la formación de las depresiones, baches, y ondulaciones.

Estos problemas estructurales y superficiales se presentan debido a la acción del tráfico y a las condiciones climáticas (lluvias, presencia de hielo, efecto del deshielo). El deterioro ocurre en varias etapas, desde un deterioro lento que no

se percibe hasta un deterioro crítico donde se evidencia en una descomposición total del camino que involucra una nueva conformación o rehabilitación de la vía.

b. Defectos comunes en vías sin pavimentar

La condición de las carreteras sin pavimentar (afirmadas) se califica por sus deterioros o fallas siendo las más comunes:

- **Deformación:** El ahuellamiento debido a la deformación de la capa de grava y/o de la subrasante en las huellas del tráfico. El ahuellamiento debido al desgaste superficial en las huellas del tráfico. Los hundimientos localizados relacionados con la pérdida de capacidad de soporte de la subrasante. No se consideran en este rubro los surcos erosivos. Las posibles causas para esta falla pueden ser la insuficiencia estructural acentuada por un volumen de tráfico excesivo, geometría de la carretera (curvas agudas aumentan el desgaste superficial) o el clima y drenaje (un contenido de agua excesivo conlleva una reducción de la capacidad de soporte de la capa granular y de la subrasante).



Figura 1: Deformación

Fuente: Manual de carreteras Conservación Vial

- **Erosión:** Este rubro incluye los surcos erosivos creados por los escurrimientos de agua aproximadamente paralelos al eje de la carretera. Su gravedad resulta de la intensidad de los escurrimientos y del tipo del

suelo (índice de plasticidad y granulometría). Puede provenir de las siguientes causas, topografía accidentada (fuertes pendientes y curvas aumentan la intensidad de los escurrimientos) o Clima y drenaje (un drenaje deficiente favorece los escurrimientos sobre la superficie de la carretera)



Figura 2: Erosión en vías afirmadas.

Fuente: Manual de carreteras Conservación Vial

- Baches (Huecos): Resultan de aguas estancadas en la superficie de la carretera. El tráfico favorece su desarrollo. Generalmente, estorban a los vehículos cuando su tamaño alcanza el orden de 0.20m. Su calificación estará de acuerdo con el tipo de medidas correctivas requeridas (mantenimiento rutinario, recapeo no reconstrucción). Las posibles causas son el mal drenaje de la superficie de la carretera o el clima.



Figura 3: Baches o huecos en vías afirmadas.

Fuente: Manual de carreteras Conservación Vial

- Encalaminado: se trata de ondulaciones de la superficie. Resultan de la acción de las vibraciones transmitidas por los vehículos.



Figura 4: Encalaminado en vías sin afirmar.

Fuente: Manual de carreteras Conservación Vial

- Lodazal y cruce de agua: Un lodazal es una sección de suelo fino que se caracteriza por su transitabilidad baja o intransitabilidad durante las épocas de lluvia. En épocas secas, si no se realizan las tareas de mantenimiento requeridas, los vehículos tienen dificultades debidas a las deformaciones del material. Las posible causa y más frecuente es un drenaje deficiente.



Figura 5: Lodazal y cruce de agua.

Fuente: Manual de carreteras Conservación Vial

2.2.2.5. CONSERVACIÓN VIAL

Conjunto de operaciones necesarias para la preservación y mantenimiento de una carretera y de cada uno de sus elementos componentes y complementarios en las buenas condiciones para el tráfico compatibles con las características geométricas, capa de rodadura que tuvo cuando fue construida, o al estado último a que ha llegado después de las posibles mejoras que haya recibido a lo largo del tiempo.

a. Enfoque actual

Se trata de un cambio en la concepción tradicional de trabajo de actuar para reparar lo dañado, adoptándose una política de carácter preventivo para la conservación vial. Esto garantiza que los caminos nacionales y vecinales tengan los niveles necesarios para una adecuada circulación vial en todas las épocas del año.

b. Importancia en la conservación vial

Es importante mantener los caminos porque permite:

- Garantizar un confort adecuado y seguridad al usuario.
- Ahorro en los costos de operación de vehículos.
- Disminuye el tiempo perdido en el viaje.
- Mantiene la inversión en las etapas de construcción, reconstrucción o rehabilitación.

c. Ciclo de vida de un camino

Los deterioros de un camino, como ya se ha mencionado, se deben en principio al efecto del agua y del tráfico. Estos influyen en el progreso de desgaste y en la transitabilidad. Por eso el mantenimiento debe hacerse sostenidamente en el tiempo de manera preventiva, para así poder extender el tiempo de vida útil y reducir las inversiones en mantenimientos periódicos y no llegar a la reconstrucción. El ciclo de deterioro de un camino consta de cuatro fases:

- Fase 1: Construcción.

En esta fase el camino se encuentra en excelentes condiciones para la satisfacción de los conductores. Ver punto A de la figura 8.

- Fase 2: Deterioro lento y poco visible.

El camino presenta desgaste después de un tiempo, donde se evidencia de manera significativa el deterioro de la superficie de rodadura. Durante esta fase el camino se encuentra en buen estado.

- Fase 3: Deterioro acelerado.

Aquí la carretera presenta mayor desgaste en la superficie de rodadura y en los demás elementos de la carretera. Se evidencia el deterioro acelerado y cada vez resiste menos al tránsito vehicular. Los daños comienzan a hacerse puntuales y en el tiempo se van extendiendo hasta afectar al camino. Tiene corta duración y es el comienzo de la aceleración del deterioro superficial.

- Fase 4: Descomposición Total

En esta fase los vehículos elevan sus costos de operación y tienen dificultades para circular. La capacidad del camino se ve reducida afectando así a los vehículos en los neumáticos, ejes, amortiguadores y el chasis.

d. Mantenimiento vial y su relación con la rugosidad

Las características funcionales de una vía tienen gran incidencia en las condiciones de seguridad y comodidad, lo que afecta económicamente a los costos de operación y mantenimiento. Las irregularidades que presenten las vías tienen relación directa con los costos de operación de los vehículos, por consiguiente afecta la velocidad, el desgaste de las llantas y el consumo de combustible. Estas irregularidades aparte de ocasionar desgastes en los vehículos modifican el estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura de la vía. La calidad de un pavimento se puede entender como la capacidad estructural que soporta a diferentes solicitaciones, asimismo como la comodidad que siente el usuario al transitar sobre el pavimento.

Se cuantifica ésta capacidad efectuándose métodos debidamente normados tales como: la extracción de testigos, ensayos de calidad de agregados, ensayo

de abrasión, etc. y la comodidad del usuario se cuantifica en forma relativa de acuerdo a su percepción, la cual tiene relación directa con las irregularidades superficiales del pavimento.

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI), fue aceptado como estándar de medida de la regularidad superficial de un camino por el Banco Mundial en el año 1986, siendo obtenida por medio de una correlación con cualquier equipo de medición de rugosidad. El IRI puede ser entendido como una especificación de construcción o el estado del pavimento, está orientado al mantenimiento cuya incidencia se centra en funciones de aspectos económicos (IRI vs costos de usuarios), sociales (opinión de los usuarios) y técnicos (gestión de carreteras, costos de conservación vs costo Unitario).

e. Comportamiento típico de la condición superficial en función del IRI

Los factores que afectan la condición superficial (de manera principal el tráfico de vehículos y las precipitaciones pluviales) ocasionan una disminución no lineal en la calidad superficial en función de la rugosidad dividiéndose en tres etapas, donde la primera tiene un deterioro poco significativo en los primeros años; la segunda presenta desgaste más acusado y la tercera significa una etapa de deterioro acelerado, en pocos años el nivel de servicio cae de forma importante, por esta razón va a llegar a un costo significativo de mantenimiento del camino y como límite puede ser necesaria una reconstrucción total del mismo.

f. Evaluación de las condiciones de la vía

La condición de la superficie de la vía está relacionada con varios factores como: Integridad estructural, capacidad estructural, fallas o defectos y su nivel de deterioro.

La evaluación cualitativa y/o cuantitativa de algunos factores puede exigir uso de equipos costosos. Pero estos factores pueden evaluarse en forma empírica mediante la observación, para esto se debe tener en cuenta la experiencia de campo del profesional encargado.

Estas observaciones pueden plasmarse en el Índice de la condición de la vía no pavimentada (ICVNP): basado en una escala que va desde 0 hasta 100. Con esto se indica la integridad de la vía y sus condiciones de operación, se determina a través de la medición de los defectos de la superficie de la vía.

g. Niveles de intervención

Son las actividades que se realizan en la vía con la finalidad de evitar el deterioro de la infraestructura del camino, tiene diversos niveles que van desde una intervención sencilla hasta una más costosa.

- Obras de conservación rutinaria: actividades de carácter preventivo que se ejecutan para conservar la calzada, el sistema de drenaje, la señalización y obras de arte. En general se realizan durante todo el año para evitar el deterioro de la vía y garantizar la transitabilidad.
- Obras de conservación periódica: acciones que se realizan para reconfigurar y restablecer las características en la superficie de rodadura. Generalmente se repiten en periodos de más de un año de acuerdo a la influencia del tráfico.
- Obras de conservación puntual: son trabajos aislados que corrigen un defecto funcional o estructural. Del mismo modo también sirve para eliminar un riesgo que se pueda prevenir.
- Trabajos de emergencia: conjunto de actividades que se realizan para devolver la transitabilidad en una vía donde ha sido afectada por eventos extraordinarios o fuerza mayor.

2.2.3. ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL

2.2.3.1. ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD

AASHTO (American Association of State Highways and Transportation Officials), fue la primera institución en sistematizar un procedimiento objetivo para establecer el nivel de deterioro de los pavimentos, procurando relacionar la condición funcional con la estructural. Los pavimentos fueron calificados con notas cuyos valores extremos variaban desde 0, para un camino intransitable, hasta 5 para una superficie en perfectas condiciones (situación ideal)

Índice de Serviciabilidad	Calidad
5	
4	Muy Buena
3	Buena
2	Regular
1	Mala
0	Pesima

Tabla 2: Escala de Índice de Serviciabilidad.

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

La calificación del estado de un pavimento a través del PSI o el Índice de Serviciabilidad es el resultado de una apreciación visual de la condición superficial de un pavimento.

La Serviciabilidad Inicial (P_i) es la condición de una vía recientemente construida.

La Serviciabilidad Terminal (P_t) es la condición de una vía que ha alcanzado la necesidad de algún tipo de rehabilitación o reconstrucción.

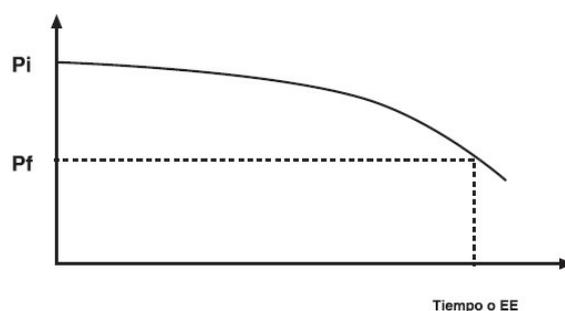


Figura 6: Curva del comportamiento de un pavimento.

Fuente: (Pradena Miquel, 2006)

La AASHTO desarrolló una prueba en 1959 en la que estableció la serviciabilidad a partir del promedio de las evaluaciones de todos los usuarios, este promedio da origen al Present serviciability rating. Para disminuir el carácter subjetivo de este índice, se relacionaron estas evaluaciones con ciertas características físicas del pavimento que pueden medirse objetivamente.

De esta manera se obtiene el denominado Present Serviciability Index, PSI (Índice de Serviciabilidad Presente). En definitiva es posible reemplazar la

calificación subjetiva de serviciabilidad por un índice numérico calculado a partir de variables física medibles (deterioros).

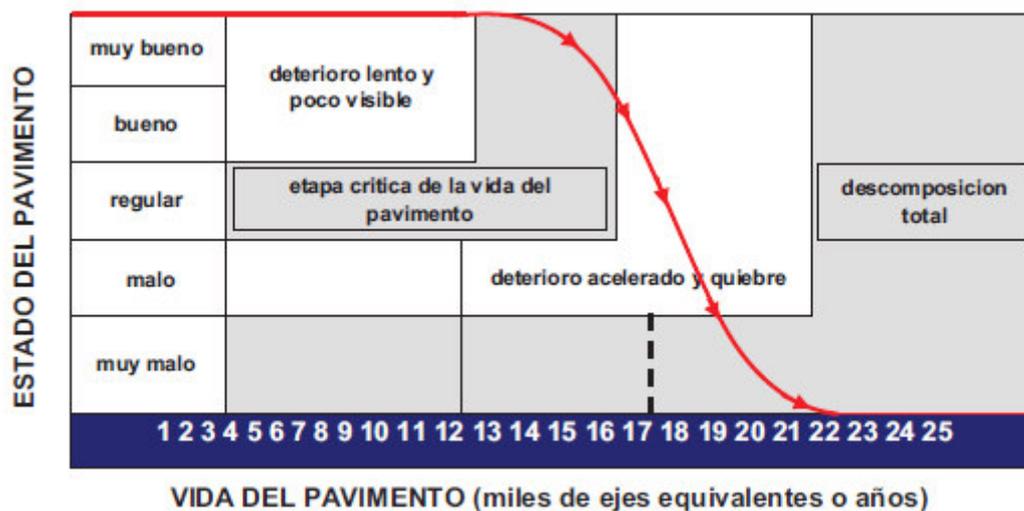


Figura 7: Estado del pavimento vs vida del pavimento.

Fuente:(Ministerio de tranportes y comunicaciones, 2013)

Como el comportamiento de un camino se puede asociar a valores del índice de serviciabilidad en distintos momentos del mismo, entonces es posible definir ciertos valores del indicador para la toma de decisiones. La Tabla siguiente muestra algunos valores de referencia para pavimentos nuevos y nivel de restauración para el Índice de Serviabilidad (p) tal como lo define AASHTO.

CONDICIÓN	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD (p)
Pavimento Asfáltico Nuevo	4.2
Pavimento Hormigón Nuevo	2.5
Nivel de Restauración más Exigente	2.5
Nivel de Restauración Adoptado en Chile	2.0

Figura 8: Índices de serviciabilidad de referencia.

Fuente: AASHTO

En las ecuaciones para determinar el Índice de Serviabilidad Presente (PSI), se incluyen, dependiendo del tipo de pavimento, mediciones de ahuellamiento,

agrietamiento, baches e irregularidades del pavimento; siendo esta última la que domina los valores estimados de serviciabilidad.

Esto significa que las irregularidades del pavimento tienen el mayor efecto en la evaluación de los usuarios que califican la calidad de rodado. De acuerdo a lo anterior es que muchas agencias viales relacionan el Índice de Serviciabilidad con mediciones de la regularidad del pavimento.

Entonces, como es posible representar el comportamiento de un pavimento en el tiempo a partir de valores del índice de serviciabilidad, en la práctica también se puede representar dicho comportamiento a través de la rugosidad del pavimento.

2.2.3.2. RUGOSIDAD

Rugosidad es la desviación de una determinada superficie de pavimento respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo y la calidad al manejar (American Society for Testing and Materials, 1995).

Son alteraciones de perfil longitudinal de una vía, que provocan vibraciones en los vehículos que lo recorren. Es la desviación de la superficie respecto a una superficie plana, con dimensiones características que afectan la dinámica del vehículo y la calidad al andar (Instituto Nacional de Vías. Norma I.N.V.E. - 790 - 07, 2007).

La rugosidad se determina en base al concepto de usar la distribución de las desviaciones de la superficie respecto a una cuerda promedio. Esta se diferencia de otras medidas de las características geométricas de la superficie como la macrotextura y microtextura, debido a las longitudes de onda y amplitudes de las irregularidades en el sentido longitudinal de la carretera, como se indica en la siguiente tabla propuesta en el XVIII Congreso Mundial de Carreteras (Bruselas, 1987) por el Comité técnico de características superficiales de la Asociación Mundial de Carreteras.

DOMINIO		RANGO DE DIMENSIONES (APROX.)	
		LONGITUDES DE ONDA (horizontal)	AMPLITUD (vertical)
Microtextura		0 - 0,5 mm	0 - 0,2 mm
Macrotextura		0,5 - 50 mm	0,2 - 10 mm
Megatextura		50 - 500 mm	1 - 50 mm
Regularidad Superficial	Ondas cortas	0,5 - 5 m	1 - 20 mm
	Ondas medias	5 - 15 m	5 - 50 mm
	Ondas largas	15 - 50 m	10 - 200 mm

Tabla 3: Clasificación de las características geométricas de la superficie de los pavimentos.

Fuente: (Pradena Miquel, 2006)

Las texturas dependen básicamente de los materiales utilizados (textura superficial, granulometría y tamaño máximo) y la matriz (mezclas bituminosas o concreto) y los defectos de irregularidad superficial, que se manifiestan mediante unas ondas de mayor longitud, son debidas a la puesta en obra (extensión, compactación) a deformaciones de la estructura por el tráfico o a deformaciones de la capa de rodadura.

Además su influencia en los fenómenos de interacción ente neumático y pavimento son distintas. Mientras las texturas se asocian a resistencia al deslizamiento, la regularidad superficial (rugosidad) se asocia a la calidad y comodidad de la rodadura de los vehículos.

Uno de los problemas que se tenía a la hora de evaluar la calidad y comodidad de la rodadura de los vehículos y comparar experiencias entre países, era la gran diversidad de técnicas, equipos e indicadores existentes en cada uno de ellos.

Por tal motivo se planteó a nivel internacional desarrollar un índice único y común al que referirse, que fuera independiente del equipo o técnica de obtención de la geometría del perfil y que además representara significativamente el conjunto de las percepciones de los usuarios circulando en un vehículo medio a una velocidad media.

El índice internacional de rugosidad, mejor conocido como IRI (International Roughness Index), fue propuesto por el Banco Mundial en 1986 como un estándar estadístico de la rugosidad y sirve como parámetro de referencia en la medición de rodadura de un camino.

En el ámbito internacional existe disparidad en la utilización del término, mientras algunos utilizan la palabra rugosidad (Índice de Rugosidad Internacional) otros

se refieren a Regularidad (Índice de Regularidad Internacional), para la presente investigación se utilizará el termino rugosidad.

La medida se realiza en la superficie a través del perfil longitudinal, aunque se debe clarificar que no necesariamente los orígenes de las deformaciones están en la superficie sino que se pueden producir en toda la estructura del pavimento o afirmado. Independientemente del origen de la deformación, el IRI, por definición considera las irregularidades de la superficie.

2.2.3.3. ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL

a. Modelo del cuarto de carro

Llamado también Golden car, simula que al avanzar este modelo a una velocidad determinada (80 km/h) e ir siguiendo las irregularidades del camino, las masas se mueven en vertical (simulando el asiento del conductor).

Por lo tanto se define como el “Movimiento vertical (desplazamiento) de las diferencias acumuladas de las masas superior e inferior divididos por el incremento de longitud del camino recorrido”.

En la Figura siguiente se observa una llanta representada con un resorte vertical, la masa del eje sostenida por la llanta, el resorte de suspensión y el amortiguador, y la masa de la carrocería del vehículo sostenida por la suspensión de esa llanta. (Ventura, J.; Alvarenga, E.; Unidad de Investigación y Desarrollo Vial. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano. República del Salvador, 2005)

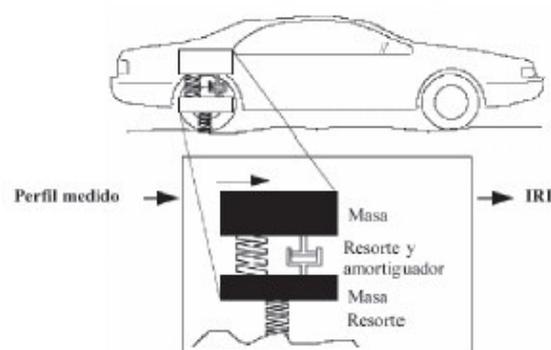


Figura 9: Modelo cuarto de carro o Golden car.

Fuente: Análisis de regularidad superficial en caminos pavimentados. Mauricio Pradena Miquel

El IRI representa el efecto sobre el vehículo del usuario del camino que tienen las desviaciones de la superficie del pavimento (causa) respecto a una superficie plana teórica con dimensiones suficientes para afectar la dinámica del vehículo y la calidad al manejar.

De lo anterior se deduce que no todas las dimensiones de irregularidades superficiales afectan la dinámica del vehículo y la calidad al manejar. En efecto, las distintas características superficiales de los pavimentos tienen diferentes influencias en los fenómenos de interacción entre vehículo y pavimento.

b. Consideraciones e implicaciones de la medición del índice de rugosidad

El IRI se determina mediante cálculo matemático realizado con las ordenadas o cotas de una línea longitudinal cuyo resultado es independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil.

Es importante considerar la representatividad de las ordenadas que se introducen, es decir, la confiabilidad de la técnica o equipo con el que se obtiene el perfil o la frecuencia del muestreo utilizado.

c. Métodos y equipos de evaluación

Actualmente en el mundo existe una diversidad de equipos de medición de la rugosidad, de diversos costos, rendimientos y sistemas de adquisición de datos, cada uno con una escala de medición propia; por ello, con la correlación de todos estos equipos al Índice Internacional de Rugosidad, es posible obtener un solo parámetro de medición para conocer el estado actual de la superficie de rodadura. Los métodos de medición se pueden agrupar en cuatro clases:

a. Métodos clase 1

Son los métodos más exactos que existen para la determinación del IRI. Establecen la rugosidad a través de la determinación muy exacta del perfil longitudinal de un pavimento, con medidas no mayores de 0.25m y cotas con una precisión de 0.5 mm. A esta clase pertenecen los métodos basados en la medición del perfil del pavimento con el perfilómetro TRRI Beam, y con mira y nivel de precisión.

b. Métodos clase 2

Esta clase incluye todos los otros métodos en los cuales la rugosidad se determina sobre la base de la medición del perfil longitudinal, pero con una exactitud menor que los de la clase 1. Medidas entre 25 mm hasta 150 mm. Entre los perfilómetros de alta velocidad se tienen, el APL Trailer y GMR – type Inertial Profilometer.

Tanto los métodos Clase 1, como los Clase 2, establecen la rugosidad en unidades IRI haciendo uso de programas de cómputo, los cuales se basan en algoritmos matemáticos que simulan la respuesta dinámica que experimenta el sistema de suspensión de un vehículo modelo, al “transitar” por el perfil medido. Dicha respuesta se sintetiza finalmente en la cantidad de movimiento relativo vertical acumulado por unidad de longitud, expresado en m/km y que recibe el nombre de IRI.

c. Métodos clase 3

En esta clase están los métodos que recurren al uso de una ecuación de correlación para la estimación del IRI. Estos métodos, también denominados “tipo respuesta” (Response-Type Road Roughness Measuring System, o simplemente, RTRRMS), establecen la rugosidad basados en la detección del movimiento relativo que experimenta el sistema de suspensión de un vehículo de pasajeros o de un tráiler remolcado, al transitar sobre el pavimento.

Las mediciones efectuadas mediante los métodos Clase 3 dependen de las características dinámicas de un vehículo, para proporcionar parámetros de rugosidad que puedan correlacionarse con el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). Sin embargo, las propiedades dinámicas de cada vehículo son particulares y cambian con el tiempo, por lo que las mediciones directas deben ser correlacionadas con el IRI mediante una ecuación de calibración, que debe ser obtenida experimentalmente y específicamente para el vehículo empleado.

Esta clase también incluye métodos que emplean otros tipos de instrumentos para medir la rugosidad, diferentes a un RTRRMS, que sean capaces de generar parámetros razonablemente correlacionados con la escala del IRI. Entonces, un método para medir rugosidad califica como Clase 3 si emplea algún tipo de

ecuación de correlación, indistintamente del tipo de instrumentación o vehículo que se utilice para la obtención de la medida de rugosidad básica.

Los métodos Clase 3 emplean diversos tipos de equipos, tales como el Mays Meter (Norteamericano), Bump Integrator (Inglés), NAASRA Meter (Australiano), etc., todos ellos producidos comercialmente.

d. Método clase 4

Hay situaciones en las que se requieren datos de rugosidad sin necesidad de una gran precisión o simplemente no es posible obtener datos precisos; Sin embargo se hace deseable relacionar las medidas a la escala del IRI. En tales casos se puede recurrir a una evaluación subjetiva, ya sea mediante experiencia previa recorriendo caminos o basándose en una inspección visual. Otra posibilidad es utilizar las medidas obtenidas con un equipo sin calibrar, tal como un RTRRMS. De hecho un equipo tipo respuesta que no está calibrado cae dentro la categoría de Clase 4.

d. Determinación de IRI

El IRI se determina mediante un cálculo matemático realizado con las ordenadas o cotas de una línea del perfil longitudinal, obtenidas por cualquier técnica o equipo de medida del perfil longitudinal.

La determinación de IRI no considera el perfil transversal, y si considera cualquier tipo de deterioro o singularidad (algún tipo de escalonamiento, baches, gran densidad de grietas y/o pérdida de materiales, entre otros) que afecten la medida del perfil longitudinal en las longitudes de onda entre 0.5 m y 50 m.

El IRI es calculado a partir de un solo perfil, y en este el movimiento de la suspensión simulada es acumulada y dividida por el largo del perfil para así obtener el valor de IRI; es de esta forma que el IRI es expresado generalmente en unidades m/km o in/mi.

2.2.3.4. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD

Para determinar la rugosidad en la presente investigación se utilizara el método con el equipo de MERLIN (acrónimo de la terminología inglesa Machine for Evaluating Roughness using low-cost Instrumentation) el cual fue desarrollado en el Laboratorio Británico de Investigación de Transportes y Caminos (TRRL), basándose en el principio del perfilómetro estático, con el objetivo de obtener un equipo de bajo costo, fácil manejo y un método de análisis simple con resultados confiables.

A pesar de la gran exactitud de los resultados que proporciona el MERLIN, sólo superada por la exactitud que proporciona el método topográfico, la desventaja del equipo es su bajo rendimiento si se compara con los rugosímetros dinámicos automatizados, tales como: el Bump Integrator, Mays Meter, Perfilómetro Laser, etc.

La gran cantidad de tiempo consumido en la toma de datos y cálculo del IRI, utilizando el método gráfico original establecido por el TRRL, se hace más notoria cuando se trata de evaluar la rugosidad de vías de gran longitud (100 km o más) y se dispone de muy poco tiempo para ello.

Debido a que en los países latinoamericanos la oportunidad de empleo de los rugosímetros aún sigue siendo esporádica, lo que no justifica muchas veces la manutención de vehículos ad hoc destinados a la operación de equipos dinámicos y los costos de calibración relativamente altos, o a que las redes a ser evaluadas no son de gran extensión, el MERLIN constituye una buena alternativa, siempre y cuando sea resuelto el problema del bajo rendimiento (uso de métodos adecuados para medición y cálculo), más aun, cuando los resultados que proporciona son más exactos que los de cualquier equipo automatizado (Del Aguila Rodríguez).

a. Fundamentos teóricos

La determinación de la rugosidad de un pavimento se basa en el concepto de usar la distribución de las desviaciones de la superficie respecto de una cuerda promedio. La Figura 5 ilustra como el MERLIN mide el desplazamiento vertical entre la superficie del camino y el punto medio de una línea imaginaria de

longitud constante. El desplazamiento es conocido como “la desviación respecto a la cuerda promedio”.

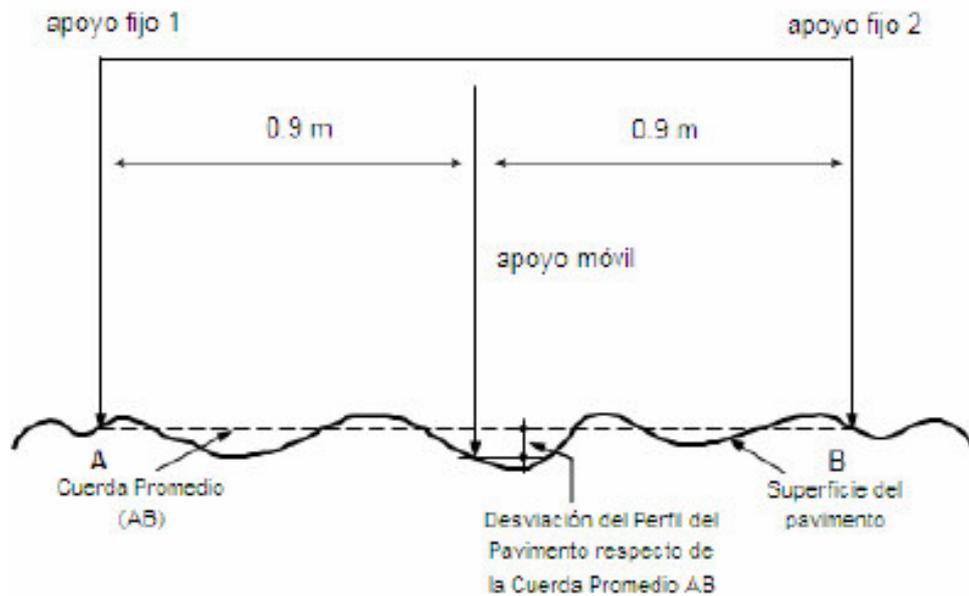


Figura 10: Medición de las desviaciones de la superficie del pavimento respecto a la cuerda promedio.

Fuente:(Del Aguila Rodríguez)

La longitud de la cuerda promedio es 1.80m, por ser la distancia que proporciona los mejores resultados en las correlaciones. Asimismo, se ha definido que es necesario medir 200 desviaciones respecto de la cuerda promedio, en forma consecutiva a lo largo de la vía y considerar un intervalo constante entre cada medición. Para dichas condiciones se tiene que, a mayor rugosidad de la superficie mayor es la variabilidad de los desplazamientos. Si se define el histograma de la distribución de frecuencias de las 200 mediciones, es posible medir la dispersión de las desviaciones y correlacionarla con la escala estándar de la rugosidad (Ver Figura 6). El parámetro estadístico que establece la magnitud de la dispersión es el Rango de la muestra (D), determinado luego de efectuar una depuración del 10% de observaciones (10 datos en cada cola del histograma). El valor D es la rugosidad del pavimento en “unidades MERLIN”.

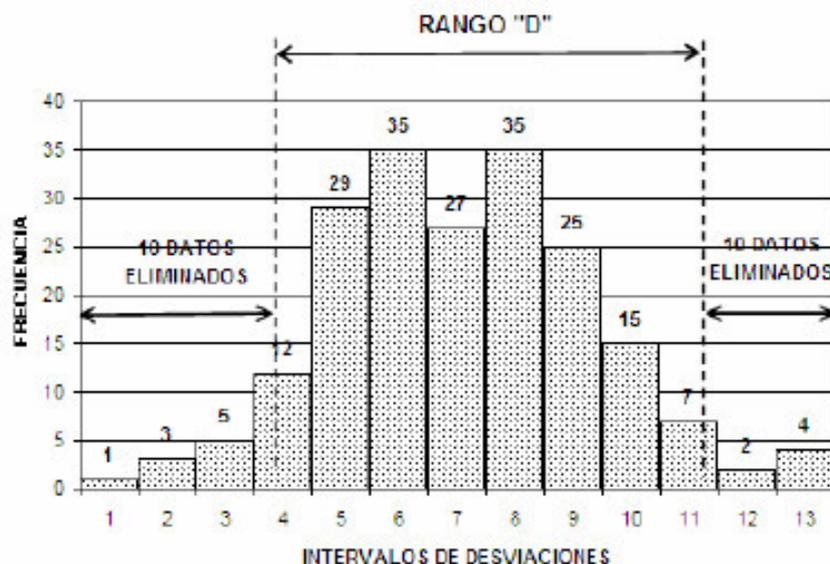


Figura 11: Histograma de la distribución de frecuencias de una muestra de 200 desviaciones medidas en forma consecutiva.

Fuente:(Del Aguila Rodríguez)

b. Correlaciones D vs IRI

Para relacionar la rugosidad determinada con el MERLIN con el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), que es el parámetro utilizado para uniformizar los resultados provenientes de la gran diversidad de equipos que existen en la actualidad, se utilizan las siguientes expresiones:

- a. Cuando $2.4 < IRI < 15.9$, entonces $IRI = 0.593 + 0.0471 D$
- b. Cuando $IRI < 2.4$, entonces $IRI = 0.0485 D$

La expresión **a.** es la ecuación original establecida por el TRRL mediante simulaciones computarizadas, utilizando una base de datos proveniente del Ensayo Internacional sobre Rugosidad realizado en Brasil en 1982. La ecuación de correlación establecida es empleada para la evaluación de pavimentos en servicio, con superficie de rodadura asfáltica, granular o de tierra, siempre y cuando su rugosidad se encuentre comprendida en el intervalo indicado.

La expresión **b.** es la ecuación de correlación establecida de acuerdo a la experiencia peruana y luego de comprobarse, después de ser evaluados más de 3000 Km de pavimentos, que la ecuación original del TRRL no era aplicable para el caso de pavimentos asfálticos nuevos o poco deformados. Se desarrolló

entonces, siguiendo la misma metodología que la utilizada por el laboratorio británico, una ecuación que se emplea para el control de calidad de pavimentos recién construidos.

Existen otras expresiones que han sido estudiadas para el caso de superficies que presentan cierto patrón de deformación que incide, de una manera particular, en las medidas que proporciona en MERLIN. M.A. Cundill del TRRL (7) estableció en 1996, para el caso de superficies con macadam de penetración de extendido manual, la siguiente expresión:

$$IRI = 1.913 + 0.049D$$

c. Método de medición

Equipo de MERLIN

El rugosímetro MERLIN, es un instrumento versátil, sencillo y económico, pensado especialmente para uso en países en vías de desarrollo. Fue introducido en el Perú por iniciativa personal de Pablo del Águila, existiendo en Junio 1999 más de 15 unidades pertenecientes a otras tantas empresas constructoras y consultoras.

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.

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. La correlación de los resultados obtenidos con el MERLIN, con la escala del IRI, tiene un coeficiente de determinación prácticamente igual a la unidad ($R^2=0.98$). Por su gran exactitud, sólo superado por el método topográfico (mira y nivel), algunos

fabricantes de equipos tipo respuesta (Bump Integrator, Mays Meter, etc.) lo recomiendan para la calibración de sus rugosímetros (Del Aguila Rodríguez).

El MERLIN es un equipo de diseño simple. La Figura 7 presenta un esquema ilustrativo del instrumento. Consta de un marco formado por dos elementos verticales y uno horizontal. Para facilidad de desplazamiento y operación el elemento vertical delantero es una rueda, mientras que el trasero tiene adosados lateralmente dos soportes inclinados, uno en el lado derecho para fijar el equipo sobre el suelo durante los ensayos y otro en el lado izquierdo para descansar el equipo. El elemento horizontal se proyecta, hacia la parte trasera, con 2 manijas que permiten levantar y movilizar el equipo, haciéndolo rodar sobre la rueda en forma similar a una carretilla.

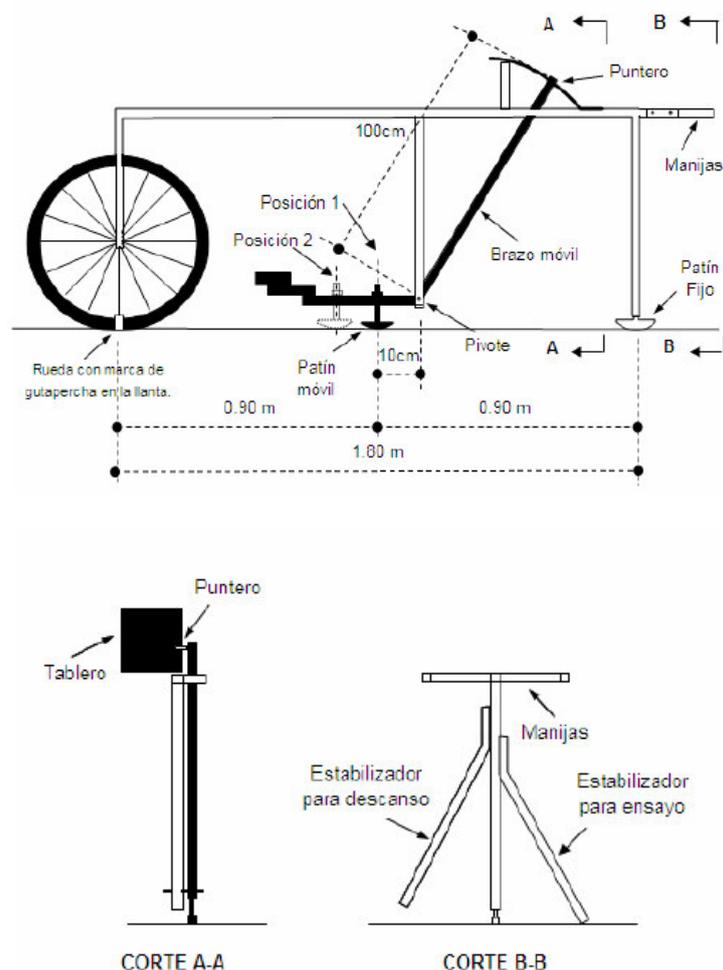


Figura 12: Equipo MERLIN.

Fuente: (Del Aguila Rodríguez)

Aproximadamente en la parte central del elemento horizontal, se proyecta hacia abajo una barra vertical que no llega al piso, en cuyo extremo inferior pivotea un brazo móvil.

El extremo inferior del brazo móvil está en contacto directo con el piso, mediante un patín empernado y ajustable, el cual se adecua a las imperfecciones del terreno, mientras que el extremo superior termina en un puntero o indicador que se desliza sobre el borde de un tablero, de acuerdo a la posición que adopta el extremo inferior del patín móvil al entrar en contacto con el pavimento.

La relación de brazos entre los segmentos extremo inferior del patín móvil-pivote y pivote-puntero es 1 a 10, de manera tal que un movimiento vertical de 1 mm, en el extremo inferior del patín móvil, produce un desplazamiento de 1 cm del puntero. Para registrar los movimientos del puntero, se utiliza una escala gráfica con 50 divisiones, de 5 mm de espesor cada una, que va adherida en el borde del tablero sobre el cuál se desliza el puntero (Ver Figura 8).

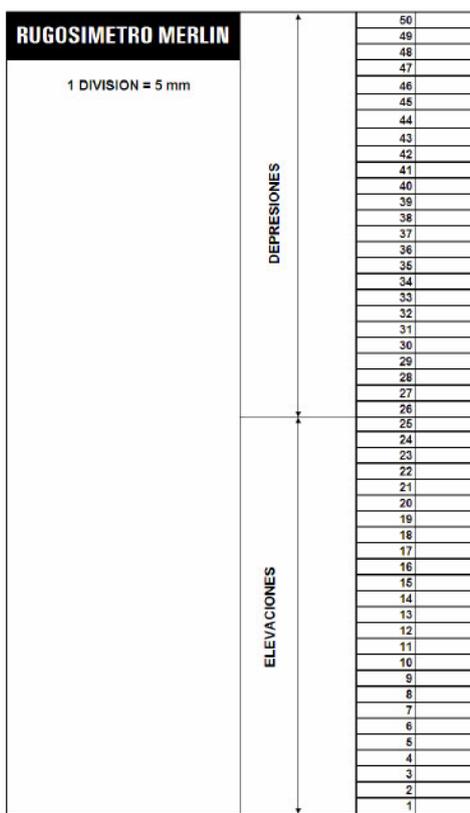


Figura 13: Hoja de escala adherida al equipo para determinar la dispersión de las desviaciones de la superficie respecto del nivel de referencia.

Fuente: (Del Aguila Rodríguez)

Ejecución de ensayos

Para la ejecución de los ensayos se requiere de dos personas que trabajan conjuntamente, un operador que conduce el equipo y realiza las lecturas y un auxiliar que las anota. Asimismo, debe seleccionarse un trecho de aproximadamente 400 m de longitud, sobre un determinado carril de una vía. Las mediciones se efectúan siguiendo la huella exterior del tráfico.

Para determinar un valor de rugosidad se deben efectuar 200 observaciones de las “irregularidades que presenta el pavimento” (desviaciones relativas a la cuerda promedio), cada una de las cuáles son detectadas por el patín móvil del MERLIN, y que a su vez son indicadas por la posición que adopta el puntero sobre la escala graduada del tablero, generándose de esa manera las lecturas. Las observaciones deben realizarse estacionando el equipo a intervalos regulares, generalmente cada 2m de distancia; en la práctica esto se resuelve tomando como referencia la circunferencia de la rueda del MERLIN, que es aproximadamente esa dimensión, es decir, cada ensayo se realiza al cabo de una vuelta de la rueda.

En cada observación el instrumento debe descansar sobre el camino apoyado en tres puntos fijos e invariables: la rueda, el apoyo fijo trasero y el estabilizador para ensayo (Figura 7, Corte B-B). La posición que adopta el puntero corresponderá a una lectura entre 1 y 50, la que se anotará en un formato de campo, tal como el mostrado en el Figura 9. El formato consta de una cuadrícula compuesta por 20 filas y 10 columnas; empezando por el casillero (1,1), los datos se llenan de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha.

El proceso de medición es continuo y se realiza a una velocidad promedio de 2 km/h. La prueba empieza estacionando el equipo al inicio del trecho de ensayo, el operador espera que el puntero se estabilice y observa la posición que adopta respecto de la escala colocada sobre el tablero, realizando así la lectura que es anotada por el auxiliar.

Paso seguido, el operador toma el instrumento por las manijas, elevándolo y desplazándolo la distancia constante seleccionada para usarse entre un ensayo y otro (una vuelta de la rueda). En la nueva ubicación se repite la operación explicada y así sucesivamente hasta completar las 200 lecturas. El espaciado

entre los ensayos no es un factor crítico, pero es recomendable que las lecturas se realicen siempre estacionando la rueda en una misma posición, para lo cual se pone una señal o marca llamativa sobre la llanta (con gutapercha fosforescente, por ejemplo), la que debe quedar siempre en contacto con el piso. Ello facilita la labor del operador quién, una vez hecha la lectura, levanta el equipo y controla que la llanta gire una vuelta haciendo coincidir nuevamente la marca sobre el piso.

d. Método para el caculo de la rugosidad

Factor de corrección para el ajuste D

Como se ha explicado, para la generación de los 200 datos que se requieren para determinar un valor de rugosidad, se emplea una escala arbitraria de 50 unidades colocada sobre el tablero del rugosímetro, la que sirve para registrar las doscientas posiciones que adopta el puntero del brazo móvil. La división N° 25 debe ser tal que corresponda a la posición central del puntero sobre el tablero cuando el perfil del terreno coincide con la línea o cuerda promedio. En la medida que las diversas posiciones que adopte el puntero coincidan con la división 25 o con alguna cercana (dispersión baja), el ensayo demostrará que el pavimento tiene un perfil igual o cercano a una línea recta (baja rugosidad). Por el contrario, si el puntero adopta repetitivamente posiciones alejadas a la división N°25 (dispersión alta), se demostrará que el pavimento tiene un perfil con múltiples inflexiones (rugosidad elevada).

**ENSAYOS PARA MEDICION DE LA RUGOSIDAD CON MERLIN
(HOJA DE CAMPO)**

PROYECTO : _____ OPERADOR : _____
 SECTOR : _____ SUPERVISOR : _____
 TRAMO : _____ FECHA : _____
 CARRIL : _____

ENSAYON° KM + HORA :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1											TIPO DE PAVIMENTO :
2											AFIRMADO <input type="checkbox"/>
3											BASE GRANULAR <input type="checkbox"/>
4											BASE IMPRIMADA <input type="checkbox"/>
5											TRAT. BICAPA <input type="checkbox"/>
6											CARPETA EN FRO <input type="checkbox"/>
7											CARP. EN CALIENTE <input type="checkbox"/>
8											RECAPED ASFALTICO <input type="checkbox"/>
9											BELLO <input type="checkbox"/>
10											OTROS <input type="checkbox"/>
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

OBSERVACIONES : _____

Figura 14: Formato para la recolección de datos de campo.

Fuente: (Del Aguila Rodríguez)

La dispersión de los datos obtenidos con el MERLIN se analiza calculando la distribución de frecuencias de las lecturas o posiciones adoptadas por el puntero, la cual puede expresarse, para fines didácticos, en forma de histograma (Figura 6). Posteriormente se establece el Rango de los valores agrupados en intervalos de frecuencia (D), luego de descartarse el 10% de datos que correspondan a posiciones del puntero poco representativas o erráticas. En la práctica se elimina 5% (10 datos) del extremo inferior del histograma y 5% (10 datos) del extremo superior.

Efectuado el descarte de datos, se calcula el “ancho del histograma” en unidades de la escala, considerando las fracciones que pudiesen resultar como consecuencia de la eliminación de los datos. En la Figura 6, por ejemplo, en el extremo inferior del histograma, se tiene que por efecto del descarte de los 10 datos se eliminan los intervalos 1, 2 y 3, y un dato de los doce que pertenecen al intervalo 4, en consecuencia resulta una unidad fraccionada igual a $11/12=0.92$.

Caso similar sucede en el extremo superior del histograma, en donde resulta una unidad fraccionada igual a $3/7=0.43$. Se tiene en consecuencia un Rango igual a $0.92+6+0.43=7.35$ unidades.

El Rango D determinado se debe expresar en milímetros, para lo cual se multiplica el número de unidades calculado por el valor que tiene cada unidad en milímetros ($7.35 \times 5\text{mm}=36.75\text{mm}$).

Las ecuaciones 1 y 2 representan correlaciones entre el valor D y la rugosidad en unidades IRI, las cuales han sido desarrolladas para una condición de relación de brazos del rugosímetro de 1 a 10 (Ver Figura 9). Esta relación en la práctica suele variar, y depende del desgaste que experimenta el patín del brazo móvil del instrumento. En consecuencia, para corregir los resultados se verifica la relación de brazos actual del instrumento, y, se determina un factor de corrección que permita llevar los valores a condiciones estándar.

Para determinar el factor de corrección se hace uso de un disco circular de bronce de aproximadamente 5 cm de diámetro y 6 mm de espesor, y se procede de la siguiente manera:

- Se determina el espesor de la pastilla, en milímetros, utilizando un calibrador que permita una aproximación al décimo de milímetro. El espesor se calculará como el valor promedio considerando 4 medidas diametralmente opuestas. Por ejemplo: el espesor medido es 6.2mm
- Se coloca el rugosímetro sobre una superficie plana (un piso de terrazo, por ejemplo) y se efectúa la lectura que corresponde a la posición que adopta el puntero cuando el patín móvil se encuentra sobre el piso (por ejemplo, lectura=25). Se levanta el patín y se coloca la pastilla de calibración debajo de él, apoyándola sobre el piso.

Esta acción hará que el puntero sobre el tablero se desplace, asumiendo una relación de brazos estándar de 1 a 10, una distancia igual al espesor de la pastilla multiplicado por 10 (es decir: $6.2 \times 10 = 62$ mm), lo que significa, considerando que cada casillero mide 5 mm, que el puntero se ubicará aproximadamente en el casillero 12, siempre y cuando la relación de brazos actual del equipo sea igual

a la asumida. Si no sucede eso, se deberá encontrar un factor de corrección (F.C.) usando la siguiente expresión:

$$F.C. = \frac{EP \times 10}{[(LI - LF) \times 5]}$$

Donde,

EP: Espesor de la pastilla

LI: Posición inicial del puntero

LF: Posición final del puntero

Por ejemplo:

Si la posición inicial del puntero fue 25 y la final fue 10, entonces el Factor de Corrección será:

$$FC = (6.2 \times 10) / [(25 - 10) \times 5] = 0.82666$$

Variación de relación de brazos

Para facilidad del trabajo, el rugosímetro admite dos posiciones para el patín del brazo pivotante (Ver Figura 7):

- Una posición ubicada a 10 cm del punto de pivote, posición standard que se utiliza en el caso de pavimentos nuevos o superficies muy lisas (baja rugosidad). En ese caso la relación de brazos utilizada será 1 a 10.
- Una posición ubicada a 20 cm del punto de pivote, posición alterna que se utiliza en el caso de pavimentos afirmados muy deformados o pavimentos muy deteriorados. En ese caso la relación de brazos será 1 a 5. De usar esta posición, el valor D determinado deberá multiplicarse por un factor de 2.

Calculo del rango D corregido

El valor D calculado en la sección 2.4.1, deberá modificarse considerando el Factor de Corrección (FC=0.82666) definido en la sección 2.4.2 y la Relación de Brazos empleada en los ensayos (RB=1). El valor D corregido será $36.75 \text{ mm} \times 0.82666 \times 1 = 30.38 \text{ mm}$. Este valor llevado a condiciones estándar es la rugosidad en "unidades MERLIN".

Determinación de la rugosidad en la escala IRI

Para transformar la rugosidad de unidades MERLIN a la escala del IRI, se usa las expresiones (1) y (2). Aplicando la expresión para el caso de $IRI < 2.5$, se obtiene finalmente, para el ejemplo seguido, una rugosidad igual a 1.47 m/km.

2.2.3.5. LÍMITES DE LA RUGOSIDAD PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE PAVIMENTOS

Para el caso de carreteras en nivel de afirmado, la rugosidad o regularidad superficial se deberá controlar calculando el parámetro denominado IRI Característico, el cuál es definido por la siguiente expresión:

$$IRI_c = IRI_p + 0.524\sigma$$

Donde,

IRI_c : IRI característico

IRI_p : IRI promedio

σ : Desviación Estándar

El límite para la conservación de vías afirmadas durante el periodo de servicio es de 8. Según el capítulo 3 del volumen N° 1 del Manual de carreteras – Conservación vial

2.2.4. VELOCIDAD DE OPERACIÓN

La velocidad de operación es la velocidad media estimada para cada tipo de vehículo en un camino particular, una vez que se realicen ajustes para la congestión y otras características de la carretera. La velocidad de funcionamiento difiere sustancialmente de la velocidad indicada, que se define como el máximo 'letrero' velocidad que los vehículos pueden viajar legalmente. (Queensland Government, 2011)

Para hallar la velocidad de operación según la metodología del gobierno de Queensland, necesitamos hallar la relación volumen-capacidad.

2.2.4.1. RELACIÓN DE LA CAPACIDAD DE VOLUMEN

Esta sección de la guía técnica describe las ecuaciones usadas en la derivación del VCR y los cálculos de volumen de tráfico y capacidad de la carretera.

El VCR es un cálculo importante en CBA6 ya que es fundamental para el cálculo de velocidad y muchos de los ajustes de la congestión en los algoritmos VOC velocidad de operación.

a. VOLUMEN DE TRÁFICO

AADT y entradas de alineación vertical a CBA6 se utilizan para calcular el volumen de tráfico en la carretera con vehículos de pasajeros equivalentes (PCE). El valor de la AADT se convierte en PCEs para medir el volumen de tráfico.¹

Factores PCE para cada tipo de vehículo se muestran en tabla 1 por ejemplo, que un doble B en un tramo de carretera con un grado entero del 4% equivale en volumen a turismos, 8,1.

Tabla 1: Factores equivalentes de automóviles de pasajeros

Vehicle type	Flat	Grade 4%	Grade 6%	Grade 8%	Grade 10%
Cars- private	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Cars - commercial	1.0667	1.1667	1.3333	1.6667	2.0000
Non-Articulated	1.4000	2.1000	2.8000	4.2000	5.2222
Buses	1.7000	3.0000	4.0000	6.0000	7.0000
Articulated	2.4000	4.8000	7.2000	9.6000	12.0000
B-double	4.1000	8.1000	12.2000	16.2000	20.3000
Road train 1	4.9500	9.8500	14.8500	19.7500	24.7000
Road train 2	8.8000	17.6000	26.5000	35.3000	44.1000

Fuente: adaptado from Austroads (2005) page 20.

La fórmula para calcular el volumen de tráfico se muestra en la ecuación 1.

Ecuación 1: Volumen de tráfico

$$Volume = \sum_i AADT_i \times PCE_i$$

Donde:

¹ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.2 pag. 4.8

- AADTi = conteo de tráfico medio diario anual
- PCEi = Equivalente de vehículo de pasajeros para el tipo de vehículo i

Ejemplo: Volumen de tráfico

En una carretera plana (100% plana) con AADT de 1000, de 616 automóviles privados, 264 coches comerciales, 50 vehículos rígidos, 10 autobuses, semifinales de 50 y 10 B-dobles, el volumen de tráfico correspondiente viene dado por:

$$Volume = (616 \times 1) + (264 \times 1.0667) + (50 \times 1.4) + (10 \times 1.7) + (50 \times 2.4) + (10 \times 4.1)$$

$$Volume = 1146$$

Por lo tanto el volumen de tráfico de la carretera en PCE es 1146. Esto es notablemente diferente de la AADT de 1000

b. TASA DE CRECIMIENTO DE TRÁFICO

CBA6 utiliza la tasa de crecimiento de tráfico para calcular el VCR en futuro años. CBA6 ofrece dos opciones de crecimiento cuando la predicción de los volúmenes de tráfico futuro, crecimiento lineal y crecimiento compuesto.²

Crecimiento de tráfico lineal

La fórmula para calcular la AADT cuando la tasa de crecimiento del tráfico es lineal se da en la ecuación 2.

Ecuación 2: El crecimiento del tráfico lineal

$$AADT_x = AADT_{y1} + (x - y1) \times \left(\left(AADT_{y1} \times (1 + GR) \right) - AADT_{y1} \right)$$

Donde:

- AADTy1 = AADT en el primer año de evaluación
- AADTx = AADT en el año x
- GR = tasa de crecimiento
- y1 = primer año (1)

² (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.2 pag. 4.9

•• x = año de cálculo

Ejemplo: Crecimiento de tráfico lineal

AADT para un camino dado es 1000 y la tasa de crecimiento lineal se asume que 3% p.a. AADT en el año 5 es dado por:

$$AADT_5 = 1000 + (5 - 1) \times ((1000 \times (1 + 0.03)) - 1000)$$

$$AADT_5 = 1120$$

Nota: Cuando utilice el crecimiento lineal, las tendencias futuras se basan exclusivamente en la AADT en el año seleccionado por extrapolación.

Crecimiento compuesto del tráfico

Se muestra la fórmula para el crecimiento compuesto del tráfico por la ecuación 3.

Ecuación 3: crecimiento compuesto del tráfico.

$$AADT_x = AADT_{y1} \times (1 + GR)^{(x-y1)}$$

Una tasa de crecimiento compuesto es una tasa de crecimiento que se agrava cada año, mientras que una tasa de crecimiento lineal resulta en un aumento constante del tráfico cada año.

Ejemplo: crecimiento compuesto del tráfico

La AADT calculado usando un AADT de 1000, compuesto anualmente en 4% durante 5 años, se expone a continuación:

$$AADT_5 = 1000 \times (1 + 0.04)^4$$

$$AADT_5 = 1169.86$$

Como se muestra en este ejemplo, AADT puede variar sustancialmente dependiendo del tipo de tasa de crecimiento aplicada. Crecimiento compuesto de AADT se basa en un porcentaje constante aumento en el número de vehículos por año, mientras que el crecimiento lineal en AADT se basa en un constante aumento en el número de vehículos por año.

c. ROAD CAPACITY

Capacidad vial depende de ambos la capacidad por hora, medida en PCEs y un factor de capacidad de hora pico por estado de camino modelo (MRS).³

La Tabla 2 enumera las capacidades horarias en PCE para cada MRS. La capacidad horaria depende del tipo de sello (no dividido o dividido) y del ancho del sello.

Tabla 2: Capacidad de PCE por hora

MRS	Road width description	Hourly capacity (PCE/hr)
1	Unsealed natural surface	400
2	Unsealed formed road	400
3	Paved < 4.5 m	500
4	Paved ≥ 4.5 m	700
5	Narrow seal ≤ 4.5 m	1 500
6	Narrow seal 4.6 m–5.2 m	2 000
7	2 lane seal 5.3 m–5.8 m	2 300
8	2 lane seal 5.9 m–6.4 m	2 350
9	2 lane seal 6.5 m–7.0 m	2 450
10	2 lane seal 7.1 m–7.6 m	2 500
11	2 lane plus shoulder seal 7.7 m–8.2 m	2 525
12	2 lane plus shoulder seal 8.3 m–9.0 m	2 550
13	2 lane plus shoulder seal 9.1 m–9.4 m	2 550
14	2 lane plus shoulder seal 9.5 m–10 m	2 565
15	2 lane plus shoulder seal 10.1 m–11.6 m	2 575
16	3 lane for overtaking	4 000
17	4 lane undivided sealed	7 120
18	6 lane undivided sealed	12 000
19	4 lane divided sealed	8 000
20	6 lane divided sealed	12 000
21	4 lane divided (limited access)	8 000
22	6 lane divided (limited access)	12 000
23	8 lane divided (limited access)	16 000

Fuente: adaptado from Austroads (2005) page 22.

Nota: MRS se deriva de la clasificación MRS Australia Occidental: Austroads (AP-R264 / 05).

³ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.2 pag. 4.11

Porcentajes de capacidad de hora pico por defecto se muestran en la Tabla 3. Estos datos predeterminados se utilizan para evaluar el porcentaje de AADT que viajan durante las horas pico.

Tabla 3: El tipo de carretera y el factor de capacidad de hora pico

Road type	Capacity factor
National highway	10
Urban single carriageway	10
Urban dual carriageway	12.5
Rural single carriageway	8.33
Rural dual carriageway	10

Fuente: TMR.

TMR asume que el 10% de la IMD en una carretera nacional viaja durante los períodos pico. Del mismo modo, el 12,5% del tráfico diario viaja en horas pico en autovías urbanas.⁴

La ecuación 4 se utiliza para calcular la capacidad de un camino dado.

Ecuación 4: Capacidad de carretera

$$\text{Capacity} = \frac{\text{Hourly Capacity}}{\text{Capacity Factor \%}}$$

Donde:

- Hourly Capacity = capacidad horaria de PCE / h por MRS
- Capacity Factor% = proporción de tráfico diario en los períodos pico

La tasa de capacidad horaria es fijada por el MRS correspondiente y es una función de la anchura del sello. En CBA6, carreteras con anchuras más grandes de sellado se asumen para dar cabida a más vehículos por hora.

Ejemplo: Capacidad vial

⁴ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.2 pag. 4.12

Una carretera nacional con un modelo de estado de carreteras 10 tendría una capacidad horaria de 2500, véase la Tabla 2, y un pico horas factor de capacidad del 10%, véase la Tabla 3. En este ejemplo, la capacidad de las carreteras es la siguiente:

$$Capacity = \frac{2500}{10\%}$$

$$Capacity = 25,000$$

Nota: periodo de pico (1 hora) se determina en CBA6 basado en la selección del usuario del sistema Descripción de carreteras y MRS.

El factor de capacidad de este modo se utiliza para determinar la capacidad de la vía que a su vez influye en el VCR. Esta forma de modelado se conoce como flujo libre.

d. RELACIÓN DE VOLUMEN CAPACIDAD

VCR se calcula utilizando los cálculos de volumen que se muestran en la Sección a. y los cálculos de capacidad que se muestran en la Sección c.⁵

Ecuación 5: Relación de capacidad de volumen

$$VCR = \frac{Volume}{Capacity}$$

Donde:

- Para más información sobre VCR, consulte la Sección 2.1

El VCR es una medida del nivel de congestión en un camino dado el volumen de tráfico y capacidad de las carreteras. Cuando el VCR llega a 1, esto indica que el camino está operando a 100% de la capacidad.

Nota: La VCR máxima en CBA6 es de 1,25.

Ejemplo: relación de capacidad de volumen

⁵ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.2 pag. 4.13

Utilizando los ejemplos proporcionados en las secciones 2.1 y 2.3, el vídeo correspondiente es:

$$VCR = \frac{1145}{25,000}$$

$$VCR = 0.046$$

Este ejemplo ilustra que el volumen actual carretera es de aproximadamente 4,6% de la capacidad total de carreteras.

2.2.4.2. Velocidad libre

Velocidad libre es la velocidad media de un vehículo no sujeto rugosidad, congestión o señales limitantes de velocidad. La velocidad libre se relaciona con el tipo de vehículo, MRS y la alineación vertical y horizontal según la Tabla siguiente.⁶

Tabla 4: Velocidad libre

Vehicle type	Road type	Straight grad 0-2%	Straight grad 4%	Straight grad 6%	Straight grad 8%	Straight grad 10%	Curvy grad 0-2%	Curvy grad 4%	Curvy grad 6%	Curvy grad 8%	Curvy grad 10%	Vicinity grad 0-2%	Vicinity grad 4%	Vicinity grad 6%	Vicinity grad 8%	Vicinity grad 10%
Cars - private	≤ 4.5 m	83	82	76	66	56	77	76	72	64	55	69	68	66	60	53
Cars - commercial	≤ 4.5 m	82	79.3	72	61.7	52	75	73	68	59.7	51	67	65.3	62.3	56.3	49.3
Non-Articulated	≤ 4.5 m	82.4	68.8	55.6	44.6	36	73	63.4	53.2	43.4	35.8	64.2	57.6	49.8	42.2	35.6
Buses	≤ 4.5 m	86	72	57	45	37	77	67	55	45	37	67	61	53	44	36
Articulated	≤ 4.5 m	86	49	39	32	24	71	45	38	32	24	59	41	36	31	24
B-double	≤ 4.5 m	88	38	27	20	16	72	35	27	19	16	59	32	26	19	16
Road train 1	≤ 4.5 m	88	38	27	20	16	72	35	27	19	16	59	32	26	19	16
Road train 2	≤ 4.5 m	88	38	27	20	16	72	35	27	19	16	59	32	26	19	16
Cars - private	> 4.5 m	105	102	88	72	59	90	89	81	68	57	75	74	71	63	55
Cars - commercial	> 4.5 m	99.7	95	81.3	66.3	54.3	85.7	83.3	75	63	52.7	72	70.3	66.3	58.7	51
Non-Articulated	> 4.5 m	93.8	74.2	58	45.4	36.2	79.8	67.2	55	44.2	36	67.2	60.2	51.4	42.8	35.8
Buses	> 4.5 m	100	78	59	46	37	85	71	57	45	37	70	63	54	44	36
Articulated	> 4.5 m	100	52	40	32	24	75	47	39	32	24	60	42	36	31	24
B-double	> 4.5 m	100	40	28	20	16	75	36	27	19	16	60	33	26	19	16
Road train 1	> 4.5 m	100	40	28	20	16	75	36	27	19	16	60	33	26	19	16
Road train 2	> 4.5 m	100	40	28	20	16	75	36	27	19	16	60	33	26	19	16
Cars - private	Freeway	110	106	90	72	59	93	90	82	69	58	76	75	71	63	55
Cars - commercial	Freeway	105	99.3	83.3	66.3	54.3	88.7	84.7	76	63.7	53.3	73	71.3	66.7	58.7	51
Non-Articulated	Freeway	99	77.2	58.8	45.4	36.2	82	68.4	55.6	44.2	36	68.6	60.8	51.6	42.8	35.8
Buses	Freeway	110	82	60	46	37	89	73	58	46	37	72	64	54	44	37
Articulated	Freeway	106	53	40	32	24	77	47	39	32	24	60	42	36	31	24
B-double	Freeway	105	41	28	20	16	76	36	27	19	16	60	33	26	19	16
Road train 1	Freeway	105	41	28	20	16	76	36	27	19	16	60	33	26	19	16
Road train 2	Freeway	105	41	28	20	16	76	36	27	19	16	60	33	26	19	16

Fuente: Adaptado de Austroads (2005) paginas 13-16.

⁶ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.3 pag. 4.16

Una corrección de rugosidad se aplica a la velocidad de conexión cuando el recuento de rugosidad del camino es mayor que 60 NRM. Por último, la velocidad libre se ajusta para la congestión, de acuerdo con la grabadora de vídeo, para dar la velocidad de funcionamiento para cada tipo de vehículo.

El Cost-benefit Analysis Manual (CBA6) ofrece la opción de introducir un valor predeterminado o un valor especificado por el usuario para el perfil del terreno. La velocidad libre se calcula utilizando un promedio ponderado de los valores relativos al grado seleccionado. El porcentaje de cada pendiente para cada perfil de terreno por defecto se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5: Porcentaje por pendiente de terreno

General terrain description	Percentage of each grade				
	Grade factor 1 ≤2%	Grade factor 2 ≤4%	Grade factor 3 ≤6%	Grade factor 4 ≤8%	Grade factor 5 ≤10%
Level or flat terrain	90	10	0	0	0
Rolling or undulating	50	30	20	0	0
Mountainous terrain	30	30	20	20	0

Fuente: TMR.

La fórmula de velocidad libre utilizada en CBA6 se deriva como un promedio ponderado de tiempo recorrido sobre una sección de carretera en lugar de un promedio ponderado de la longitud de sección de la carretera. Para más detalles, véase ARRB informe de investigación ARR 279.

$$Free\ speed\ (VT) = 1 / \sum_i (Grade\%_i / Free\ Speed\ Array\ (VT, Grade_i, HorizAlign, MRS))$$

Donde:

- Free speed (VT) = velocidad libre por tipo de vehículo.
- Grade% = factores de alineación vertical de carretera.
- Free speed array = Velocidad libre correspondiente por tipo de vehículo para alineación horizontal y MRS

La fórmula incorpora la alineación horizontal, alineación vertical y MRS de la carretera para determinar la velocidad libre de cada tipo de vehículo.

2.2.4.3. Ajuste por rugosidad

Los valores dados por las tablas para cada tipo de vehículo dependen de la anchura (<4,5m y > 4,5m), de la curvatura y del gradiente de la carretera, Similar al cálculo de velocidad libre. El ajuste de la rugosidad del camino es ponderado en la distancia en vez del tiempo.⁷

Para analizar esta sección tendremos en cuenta la relación entre la escala NRM y la escala IRI para la rugosidad; y esta viene dada por la siguiente ecuación:

$$IRI = (NRM + 1.27)/26.49$$

De donde se puede obtener:

$$NRM = 26.49 \times IRI - 1.27$$

Tabla 6: FSRG1 Factor de condición de velocidad de pavimento a 110 NRM

Vehicle type	Road type	Road conditions														
		Straight flat	Straight grad 4%	Straight grad 6%	Straight grad 8%	Straight grad 10%	Curvy flat	Curvy grad 4%	Curvy grad 6%	Curvy grad 8%	Curvy grad 10%	V/curvy flat	V/curvy grad 4%	V/curvy grad 6%	V/curvy grad 8%	V/curvy grad 10%
		Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1	Fsrg1
Cars – private	< 4.5 m	0.98	0.98	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1
Cars – commercial	< 4.5 m	0.97	0.98	0.99	1	1	0.98	0.99	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1
Non-Articulated	< 4.5 m	0.95	0.97	0.98	0.99	1	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.98	0.98	0.99	0.99	1
Buses	< 4.5 m	0.97	0.98	0.99	1	1	0.98	0.99	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1
Articulated	< 4.5 m	0.95	0.97	0.99	0.99	1	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1
B-double	< 4.5 m	0.94	0.97	0.99	0.99	1	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1
Road train 1	< 4.5 m	0.94	0.97	0.99	0.99	1	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1
Road train 2	< 4.5 m	0.94	0.97	0.99	0.99	1	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1
Cars – private	> 4.5 m	0.96	0.96	0.98	0.99	1	0.97	0.98	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1
Cars – commercial	> 4.5 m	0.96	0.96	0.98	0.99	1	0.97	0.98	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1
Non-Articulated	> 4.5 m	0.93	0.96	0.98	0.99	1	0.96	0.97	0.98	0.99	1	0.97	0.98	0.99	0.99	1
Buses	> 4.5 m	0.95	0.98	0.99	1	1	0.97	0.98	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1
Articulated	> 4.5 m	0.91	0.96	0.99	0.99	1	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1
B-double	> 4.5 m	0.91	0.96	0.99	0.99	1	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1
Road train 1	> 4.5 m	0.91	0.96	0.99	0.99	1	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1
Road train 2	> 4.5 m	0.91	0.96	0.99	0.99	1	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1

Fuente: derivado por TMR de Austroads (2005) pagina 18.

⁷ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.2 pag. 4.18

Tabla 7:FSRG2 Factor de velocidad para la condición del pavimento a 250 NRM

Vehicle type	Road type	Road condition															
		Straight flat	Straight grad 4%	Straight grad 6%	Straight grad 8%	Straight grad 10%	Curvy flat	Curvy grad 4%	Curvy grad 6%	Curvy grad 8%	Curvy grad 10%	V/curvy flat	V/curvy grad 4%	V/curvy grad 6%	V/curvy grad 8%	V/curvy grad 10%	
		F _{srg2}															
Cars – private	< 4.5 m	0.76	0.77	0.8	0.87	0.92	0.79	0.8	0.83	0.88	0.92	0.84	0.85	0.87	0.9	0.94	
Cars – commercial	< 4.5 m	0.75	0.77	0.81	0.88	0.93	0.79	0.8	0.83	0.89	0.93	0.84	0.85	0.87	0.9	0.94	
Non-Articulated	< 4.5 m	0.68	0.76	0.84	0.91	0.95	0.74	0.79	0.86	0.91	0.95	0.79	0.83	0.87	0.92	0.95	
Buses	< 4.5 m	0.74	0.81	0.89	0.95	0.97	0.79	0.84	0.9	0.95	0.97	0.85	0.87	0.91	0.95	0.97	
Articulated	< 4.5 m	0.61	0.78	0.87	0.93	0.97	0.71	0.82	0.89	0.94	0.97	0.81	0.87	0.91	0.94	0.97	
B-double	< 4.5 m	0.6	0.79	0.88	0.94	0.97	0.71	0.83	0.89	0.94	0.97	0.81	0.88	0.91	0.95	0.97	
Road train 1	< 4.5 m	0.6	0.79	0.88	0.94	0.97	0.71	0.83	0.89	0.94	0.97	0.81	0.88	0.91	0.95	0.97	
Road train 2	< 4.5 m	0.6	0.79	0.88	0.94	0.97	0.71	0.83	0.89	0.94	0.97	0.81	0.88	0.91	0.95	0.97	
Cars – private	> 4.5 m	0.63	0.65	0.73	0.83	0.9	0.71	0.72	0.77	0.85	0.91	0.81	0.81	0.84	0.88	0.93	
Cars – commercial	> 4.5 m	0.64	0.67	0.75	0.85	0.91	0.72	0.74	0.79	0.86	0.92	0.81	0.82	0.85	0.89	0.93	
Non-Articulated	> 4.5 m	0.62	0.71	0.83	0.9	0.95	0.7	0.77	0.85	0.91	0.95	0.77	0.82	0.87	0.92	0.95	
Buses	> 4.5 m	0.65	0.76	0.88	0.94	0.97	0.75	0.81	0.89	0.95	0.97	0.83	0.86	0.91	0.95	0.97	
Articulated	> 4.5 m	0.53	0.74	0.86	0.93	0.97	0.68	0.81	0.88	0.94	0.97	0.8	0.86	0.91	0.94	0.97	
B-double	> 4.5 m	0.54	0.75	0.87	0.94	0.97	0.68	0.82	0.89	0.94	0.97	0.8	0.87	0.91	0.95	0.97	
Road train 1	> 4.5 m	0.54	0.75	0.87	0.94	0.97	0.68	0.82	0.89	0.94	0.97	0.8	0.87	0.91	0.95	0.97	

Fuente: derivado por TMR from Austroads (2005) pagina 18.

El cálculo del factor de velocidad de la condición del pavimento se muestra mediante la ecuación siguiente. El cálculo de la matriz de rugosidad se realiza a los 110 y 250 NRM.

Ecuación 7: Matriz de rugosidad de velocidad libre.

$$FSRG_i = \sum_i \text{Roughness Array} (VT, \text{Grade}_i, \text{HorizAlign}, \text{MRS}) \times \text{Grade}\%$$

Donde:

- FSRG_i = Factor de velocidad de la condición del pavimento a 110 NRM o 250 NRM

Cuando la rugosidad de la corriente (CNRM) es menor o igual a 110, el factor de velocidad de la condición del pavimento (pcspdf) se deriva de la fórmula dada como Ecuación 8.

Ecuación 8: Factor de velocidad de la condición de pavimento < 110NRM

$$PCSpdF = \begin{cases} CNRM \leq 60 = 1 \\ CNRM \leq 110 = 1 - (1 - FSRG1) \times \frac{(CNRM - PAVC)}{(NRMA1 - PAVC)} \end{cases}$$

Donde:

- PCSpdF = Condición de pavimento factor de velocidad
- CNRM = Rugosidad actual de la carretera en NRM por kilómetro
- FSRG1 = Factor de velocidad de la condición del pavimento a 110 NRM
- PAVC = Mínima rugosidad después de la reconstrucción (parámetro del modelo = 60)
- NRMA1 = Valor de rugosidad que termina el primer segmento lineal de la relación bilineal (parámetro del modelo = 110)

Nota: La corrección de rugosidad sólo debe aplicarse para CNRM > 60, por lo tanto, pcspdf debe ser igual a 1 para CNRM 60. Cuando CNRM es mayor que 110 NRM, el factor de velocidad de condición de pavimento se calcula usando la Ecuación 9.⁸

Ecuación 9: Factor de velocidad de la condición del pavimento mayor que 110NRM

$$PCSpdF = \text{Max} \begin{cases} FSRG1 - (FSRG1 - FSRG2) \times \frac{(CNRM - NRMA1)}{(NRMA - NRMA1)} \\ FSRG2 \end{cases}$$

Dónde:

- PCSpdF = factor de velocidad de la condición del pavimento
- Máx = indica que se debe seleccionar el mayor de los dos factores calculados
- FSRG1 = factor de velocidad de la condición del pavimento a 110 NRM

⁸ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.3 pag. 4.20

- FSRG2 = factor de velocidad de la condición del pavimento a 250 NRM
- CNRM = rugosidad actual de la carretera en los recuentos de NRM por kilómetro
- NRMA = coeficiente de la relación PSR a NRM (parámetro del modelo = 250)
- NRMA1 = valor de rugosidad que termina el primer segmento lineal de la relación bilineal (parámetro del modelo = 110)

La velocidad libre corregida es una función del factor de condición de velocidad del pavimento mostrado por las ecuaciones 8 y 9 y el cálculo de la matriz de velocidad libre mostrado por la Ecuación 6. La ecuación de velocidad libre corregida para cada tipo de vehículo se muestra por la Ecuación 10.

Ecuación 10: Velocidad libre corregida

$$\text{Corr Free Speed}(VT) = \text{PCSpdF} \times \text{Free Speed}(VT)$$

Dónde:

- CorrFreeSpeed (VT) = velocidad libre corregida para la rugosidad
- PCSpdF = factor de velocidad de la condición del pavimento
- FreeSpeed (VT) = velocidad libre por tipo de vehículo ajustado para la alineación horizontal y vertical y MRS

2.2.4.4. Ajuste por congestión

Una vez que la velocidad de funcionamiento ha sido ajustada para la rugosidad, entonces se ajusta para la congestión. Esta función ajusta la velocidad de la flota de acuerdo con el nivel de congestión en la carretera, que es descrito por el VCR. La velocidad de funcionamiento se representa como una función de VCR como se muestra en la Figura 2.⁹

⁹ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.3 pag. 4.22

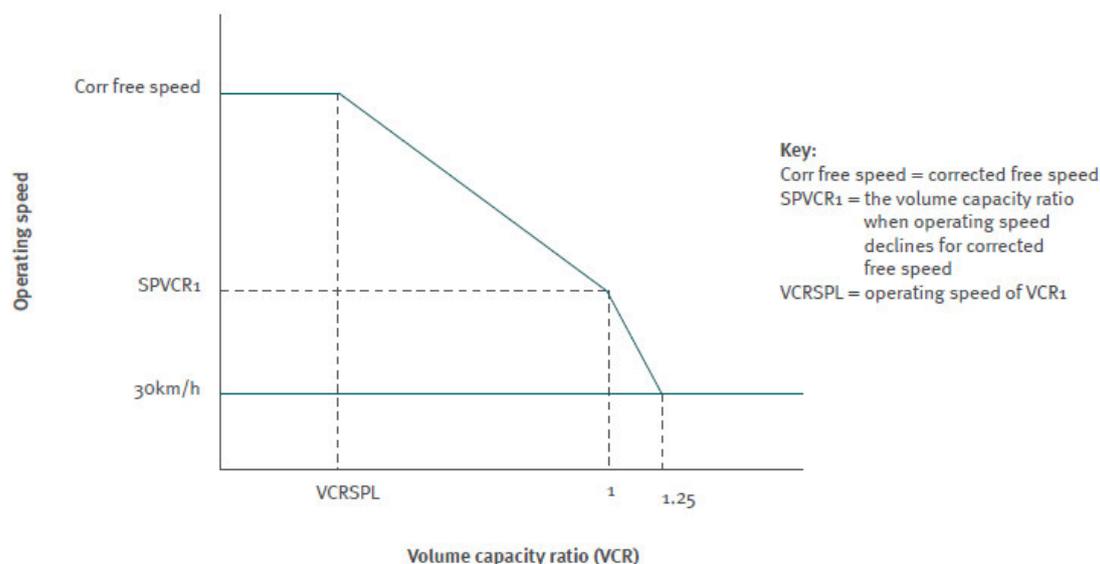


Figura 15: Velocidad de funcionamiento y VCR de los vehículos privados.

Fuente: *Cost-benefit Analysis Manual*

El eje vertical mostrado por la figura 19 representa la velocidad de funcionamiento mientras que el eje horizontal representa el VCR. La intercepción en Y es la velocidad libre corregida que se calcula usando la ecuación 10. Cuando el VCR alcanza un valor de VCRSPL, la velocidad de funcionamiento de la flota empieza a disminuir para ajustarse a la creciente congestión. El VCRSPL es un valor de parámetro que se utiliza para representar el nivel de VCR cuando el volumen de tráfico comienza a tener un efecto sobre la velocidad libre corregida y disminuye la velocidad del vehículo. A medida que el VCR aumenta a 1 (el camino alcanza su capacidad teórica), la velocidad decae al valor correspondiente SPVCR1. El SPVCR1 representa la velocidad a la que la flota puede viajar con seguridad cuando se alcanza la capacidad. Como el VCR aumenta a 1.25, la velocidad baja a la velocidad de cola de 30km / h. Los valores de VCRSPL y SPVCR1 para cada MRS se muestran en la Tabla 8.

Los valores de VCRSPL y SPVCR1 son mayores para carreteras con grandes anchos de sellado y más carriles, que las carreteras estrechas con menos carriles. A medida que el MRS aumenta, el camino está menos sujeto a congestión y velocidad.¹⁰

¹⁰ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.3 pag. 4.22

Tabla 8: Parámetros de velocidad de operación final.

MRS	Road width description	VCRSPL	SPWCR ₁
1	Unsealed natural surface	0.1	40
2	Unsealed formed road	0.1	40
3	Paved < 4.5 m	0.1	40
4	Paved ≥ 4.5 m	0.1	40
5	Narrow seal ≤ 4.5 m	0.05	40
6	Narrow seal 4.6 m–5.2 m	0.05	50
7	2 lane seal 5.3 m–5.8 m	0.05	65
8	2 lane seal 5.9 m–6.4 m	0.08	65
9	2 lane seal 6.5 m–7.0 m	0.11	65
10	2 lane seal 7.1 m–7.6 m	0.12	65
11	2 lane plus shoulder seal 7.7 m–8.2 m	0.12	65
12	2 lane plus shoulder seal 8.3 m–9.0 m	0.12	65
13	2 lane plus shoulder seal 9.1 m–9.4 m	0.12	65
14	2 lane plus shoulder seal 9.5 m–10 m	0.12	65
15	2 lane plus shoulder seal 10.1 m–11.6 m	0.2	65
16	3 lane for overtaking	0.2	65
17	4 lane undivided sealed	0.3	70
18	6 lane undivided sealed	0.3	70
19	4 lane divided sealed	0.3	70
20	6 lane divided sealed	0.3	70
21	4 lane divided (limited access)	0.4	70
22	6 lane divided (limited access)	0.4	70
23	8 lane divided (limited access)	0.4	70

Fuente: Austroads (2005) pagina 22.

La velocidad de operación para los vehículos particulares calculada por CBA6 se ilustra mediante las Ecuaciones 11 a 14. La velocidad de operación de los vehículos comerciales depende de la velocidad de funcionamiento de los vehículos privados y de la velocidad libre corregida, como se ilustra en la Ecuación 15.¹¹

Cuando $VCR < VCRSPL$, la velocidad de funcionamiento está dada por la Ecuación 11.

Ecuación 11: Velocidad de funcionamiento cuando $VCR < VCRS$

$$OS(VT) = Corr Free Speed (VT)$$

¹¹ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.3 pág. 4.23

Dónde:

- OS (VT) = velocidad de funcionamiento para cada tipo de vehículo

La ecuación 11 muestra que la congestión no tiene ningún efecto sobre la velocidad de operación de la flota y el tráfico viaja a la velocidad libre corregida. La congestión sólo comienza a afectar la velocidad de funcionamiento de un automóvil privado cuando el VCR alcanza el VCRSPL. La velocidad de funcionamiento dada por la Ecuación 12 se aplica cuando el VCR es menor que 1 pero mayor que VCRSPL.¹²

Ecuación 12: Velocidad de funcionamiento cuando $VCR_{SPL} < VCR < 1$

$$OS(VT) = SPVCR1 + (CorrFreeSpeed(VT) - SPVCR1) \times \left(\frac{(1 - VCR)}{(1 - VCRSPL)} \right)$$

Dónde:

- SPVCR1 = velocidad de funcionamiento en el VCR de 1
- VCRSPL = el VCR cuando la velocidad de funcionamiento disminuye de CorrFreeSpeed

La ecuación 12 muestra que a medida que aumentan los niveles de congestión (VCR se aproxima a 1), la velocidad de funcionamiento disminuye al valor de velocidad de funcionamiento SPVCR1. Cuando el VCR excede este punto (1 VCR 1.25), la velocidad de funcionamiento viene dada por la Ecuación 13.¹³

Ecuación 13: Velocidad de funcionamiento cuando $1 < VCR < 1.25$

$$OS(VT) = 30 \text{ km/h} + (SPVCR1 - 30 \text{ km/h}) \times \frac{(1.25 - VCR)}{(1.25 - 1)}$$

En la Ecuación 13, la nueva velocidad de funcionamiento se determina en función del SPVCR1 menos una velocidad de cola de 30 km / h.

Cuando el VCR alcanza un máximo de 1.25, la velocidad de funcionamiento es 30km / h.

¹² (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.3 pág. 4.23

¹³ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.3 pág. 4.24

Nota: Los costos de congestión por vehículo en CBA6 no aumentan una vez que el VCR alcanza 1,25. Cuando el VCR es 1,25, la velocidad de funcionamiento se calcula mediante la fórmula dada por la Ecuación 14.

Ecuación 14: Velocidad de funcionamiento cuando VCR 1.25

$$OS(VT) = 30 \text{ km/h}$$

Las ecuaciones 11 a 14 se utilizan para calcular la velocidad de funcionamiento de un vehículo privado. La velocidad de funcionamiento para un vehículo comercial se calcula mediante la ecuación 15.

Ecuación 15: Velocidad de funcionamiento comercial

$$OS(\text{Commercial } VT) = \text{MIN}(OS(\text{PrivateCar}), \text{Corr Free Speed}(VT))$$

Dónde:

- MIN = función mínima de la ecuación
- OS (PrivateCar) = velocidad de funcionamiento de un vehículo privado
- Corr Free Speed (VT) = velocidad libre corregida del vehículo comercial

La ecuación 15 se basa en la suposición de que los vehículos comerciales no deben poder viajar más rápido que los vehículos privados.

2.2.5. COSTOS DE OPERACIÓN DE LOS VEHÍCULOS

Los costos de operación vehicular por definición los costos asociados con la operación del motor de un vehículo. (Queensland Government, 2011)

Los costos durante toda la vida útil de una carretera pueden ser: costos iniciales de construcción, que implican la realización del proyecto, costos de conservación y mantenimiento, que son los necesarios para mantener las carreteras en condiciones transitables y los costos de operación, que se dan diariamente por la circulación de vehículos sobre la vía.

Los costos de operación vehicular (COV) requieren una atención especial ya que superan a los otros dos, ya que este costo se da por el paso del tráfico de

vehículos a lo largo de la carretera y tienen que ser pagados por los usuarios. Los principales costos de operación son los siguientes:

- a) Combustible.
- b) Lubricantes.
- c) Llantas.
- d) Reparación y refacciones.
- e) Operador.
- f) Depreciación y reposición de vehículos.
- g) Intereses.
- h) Seguros.
- i) Tiempo de traslado de las mercancías.

La magnitud de las irregularidades superficiales tiene incidencia en los costos de operación, puesto que afectan la velocidad de circulación y producen un mayor desgaste de las llantas y componentes mecánicos de los vehículos, así como también mayor consumo de combustibles y aceites.

El cálculo de cada componente de COV se basa en una metodología detallada. El cálculo de la COV se ve afectado por un número de entradas y se realizan ajustes en consecuencia.

Tabla 9 se muestran las entradas y los factores que afectan el cálculo de la COV en CBA6.

Tabla 9: Factores que afectan la VOC

Vehicle operating costs	Operating speed	Vehicle characteristics			Road infrastructure		Traffic volume (pce)
		Type and specs	Fuel type	Gradient	Curvature	Surface type and condition	
Fuel	T	T	T	T	T	T	T
Oil	T	T	T				
Tyres	T	T		T	T	T	T
Repairs and maintenance		T				T	
Depreciation and interest	T	T				T	

Fuente: adaptado de Austroads (2005)

La mayoría de estos algoritmos y valores de unidad se deriva de Austroads Informe ap-r264/05 'armonización del usuario de la vía no urbana modelos de costos'

2.2.5.1. Combustible

Coste de combustible del vehículo se calcula basándose en el consumo de combustible de cada vehículo. Velocidad de funcionamiento del vehículo predominante influye en la tasa de consumo de combustible. Otros ajustes a la tasa de consumo de combustible se realizan para tener en cuenta para obtener información específica como pendiente, curvatura, congestión y aspereza.¹⁴

a. Consumo básico de combustible

Consumo básico (bfc) y costo del combustible básico (fuelcf) se calculan utilizando los parámetros dados en la tabla 10. CBA6 se aplica un costo unitario de combustible gasolina de 82,49 centavos de dólar por litro y 81,57 centavos por litro para el combustible diésel.

Tabla 10: Costos de combustible y factores de consumo

Vehicle type	Square Factor 3	Reciprocal Factor 2	Const. Factor 1	Fcavf State of tune factor	Pdies Proportion of diesel vehicles	Petrol Petrol price (c/litre)	Diesel Diesel fuel price (c/ litre)	Fcong Fuel cons incr factor- VCR=1
Cars – private	0.0054	1526.2	37.3	1.071	0	82.49	81.57	0.4
Cars – commercial	0.0114	1883	38.9	1.071	0	82.49	81.57	0.4
Non-Articulated	0.0168	3485.1	49	1.1	0.5	82.49	81.57	0.3
Buses	0.0131	5451.1	69.4	1.1	0.7	82.49	81.57	0.3
Articulated	0.0158	9621.1	118.6	1.1	0.9	82.49	81.57	0.3
B-double	0.016	14720.4	172.7	1.1	1	0	81.57	0.3
Road train 1	0.0148	17201.8	223.6	1.1	1	0	81.57	0.3
Road train 2	0.015	26646.9	312.1	1.1	1	0	81.57	0.3

Fuentes: Austroads informe 264/5, Austroads informe de IR-R156 / 08, CBA4 Manual técnico (1999).

El consume básico de combustible en litros por 1000 km es calculado usando la ecuación 16. El consumo básico de combustible está basado en la eficiencia del combustible de cada tipo de vehículo y la velocidad de operación.

¹⁴ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.29

$$BFC(VT) = Square(VT) \times OS^2(VT) + \frac{Reciprocal(VT)}{OS(VT)} + Constant(VT)$$

Donde:

- BFC (VT) = Consumo básico de combustible para cada tipo de vehículo.
- Square (VT) = parámetros del modelo
- OS (VT) = Velocidad de operación para cada tipo de vehículo
- Reciprocal (VT) = parámetros del modelo
- Constant (VT) = parámetros del modelo

El consumo básico de combustible es una función de los parámetros por defecto del modelo mostrados en la tabla 10. Para una representación gráfica de la relación entre las variables, consulte la figura 12. En esta etapa temprana en el cálculo de consumo de combustible, estos valores no varían por la ubicación del proyecto.

El cálculo de consumo de combustible básico excluye otros factores específicos del proyecto que afectan el consumo de combustible del vehículo. Este cálculo sólo ajusta el nivel de base de la cual se puede determinar la tasa de consumo de combustible real. El consumo real en litros por 1000 km se calcula aplicando una serie de ajustes para el gradiente, la curvatura, la congestión y la aspereza.

b. Factores de corrección del consumo de combustible por pendiente

El ajuste por pendiente es calculado usando los valores de los factores de corrección de rugosidad y pendiente mostrados en la tabla 11. El ajuste se realiza para reflejar el incremento el consumo de combustible debido a un cambio en la pendiente.¹⁵

Como aumentan las pendientes, el factor de ajuste también aumenta, lo que indica una relación directa. Por ejemplo, el ajuste de pendiente de un vehículo privado en un 10% que viaja a 40km/h es 0.30. Esto indica que el consumo de combustible es 30% más que el consumo de combustible en una carretera plana con un grado menor que 4%

¹⁵ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.3 pág. 4.30

Tabla 11: Ajuste por pendiente del consumo de combustible.

Vehicle type	Gradient	Speed description												
		Spd_01	Spd_02	Spd_03	Spd_04	Spd_05	Spd_06	Spd_07	Spd_08	Spd_09	Spd_10	Spd_11	Spd_12	Spd_13
		8-15km/h	16-23km/h	24-31km/h	32-39km/h	40-47km/h	48-55km/h	56-63km/h	64-71km/h	72-79km/h	80-87km/h	88-95km/h	96-103km/h	104-112km/h
Cars – private	<4%	0.03	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.08	0.05	0.04	0.04	0.03
Cars – commercial	<4%	0.02	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
Non-Articulated	<4%	0.06	0.09	0.08	0.08	0.11	0.16	0.25	0.22	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17
Buses	<4%	0.08	0.11	0.10	0.13	0.20	0.26	0.39	0.52	0.42	0.29	0.19	0.10	0.00
Articulated	<4%	0.06	0.14	0.13	0.19	0.28	0.37	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
B-double	<4%	0.06	0.15	0.15	0.22	0.31	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
Road train 1	<4%	0.07	0.16	0.15	0.19	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
Road train 2	<4%	0.16	0.17	0.13	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Cars – private	<6%	0.04	0.11	0.10	0.11	0.12	0.14	0.17	0.19	0.16	0.12	0.11	0.10	0.08
Cars – commercial	<6%	0.04	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.11	0.09	0.08	0.08	0.07
Non-Articulated	<6%	0.10	0.18	0.22	0.28	0.34	0.43	0.52	0.47	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
Buses	<6%	0.15	0.24	0.32	0.42	0.54	0.65	0.83	0.98	0.84	0.70	0.57	0.45	0.32
Articulated	<6%	0.18	0.29	0.40	0.52	0.66	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
B-double	<6%	0.10	0.30	0.42	0.54	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
Road train 1	<6%	0.11	0.29	0.39	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
Road train 2	<6%	0.39	0.29	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
Cars – private	<8%	0.05	0.19	0.17	0.17	0.18	0.21	0.26	0.30	0.25	0.21	0.18	0.15	0.12
Cars – commercial	<8%	0.05	0.17	0.16	0.16	0.17	0.18	0.19	0.22	0.18	0.15	0.13	0.12	0.10
Non-Articulated	<8%	0.19	0.39	0.47	0.55	0.62	0.68	0.70	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Buses	<8%	0.26	0.50	0.62	0.76	0.91	1.05	1.25	1.42	1.25	1.08	0.92	0.78	0.62
Articulated	<8%	0.33	0.60	0.75	0.90	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
B-double	<8%	0.18	0.62	0.76	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Road train 1	<8%	0.21	0.61	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Road train 2	<8%	0.60	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
Cars – private	<10%	0.06	0.28	0.27	0.28	0.30	0.35	0.42	0.47	0.42	0.34	0.28	0.25	0.21
Cars – commercial	<10%	0.07	0.27	0.27	0.28	0.30	0.32	0.35	0.39	0.35	0.30	0.26	0.24	0.21
Non-Articulated	<10%	0.30	0.61	0.72	0.83	0.89	0.93	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Buses	<10%	0.39	0.76	0.93	1.11	1.28	1.45	1.69	1.90	1.69	1.49	1.31	1.13	0.95
Articulated	<10%	0.47	0.90	1.08	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
B-double	<10%	0.27	0.93	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
Road train 1	<10%	0.30	0.91	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Road train 2	<10%	0.75	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96

Fuente: Adaptación de Austroads (2005) páginas 28–29.

El factor de ajuste es calculado usando la ecuación 17. Este factor de ajuste varía por el tipo de vehículo, la velocidad de operación y la media ponderada de la pendiente del camino.

Ecuación 17: Ajuste de pendiente para consumo de combustible.

$$Grad\ Adjust = \sum_i Gradient\ Adj\ Array(VT, Grade_i, OS) \times Grade\%$$

Donde:

- GradAdjust = factor de ajuste de consumo de combustible basado en la velocidad y la pendiente
- GradientAdjArray = datos de la tabla 12
- VT = tipo de vehículo
- OS = velocidad de operación (km/h)
- Grade% = pendiente del gradiente por proporción ponderada de carretera

c. Ajuste por curvatura

La alineación horizontal de la carretera también puede afectar el consumo de combustible de los vehículos. Se supone que los vehículos consumen más combustible en carreteras con curvas alineaciones que en alineaciones rectas. El ajuste de curvatura se calcula utilizando los valores obtenidos de la tabla 12.¹⁶

Tabla 12: Ajuste por curvatura para el consumo de combustible.

Vehicle type	Curve categories		
	Very curvy	Curvy	Straight
Cars – private	0.2	0.1	0
Cars – commercial	0.2	0.1	0
Non-Articulated	0.2	0.1	0
Buses	0.2	0.1	0
Articulated	0.2	0.1	0
B-double	0.1	0.1	0
Road train 1	0.1	0.1	0
Road train 2	0.1	0.1	0

Fuente: adaptado de Austroads (2005) página 32.

¹⁶ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.3 pág. 4.32

Nota: Los valores en estas columnas se aplican a las categorías de curvatura predeterminada CBA, ver tabla 17.

El ajuste por curvatura para el consumo de combustible es mostrado por la ecuación 18.

Ecuación 18: Ajuste por curvatura para consumo de combustible.

$$Curve\ adjust = \sum_i CurveAdjArray(VT, CurveCategory)$$

Donde:

- CurveAdjust = factor de ajuste para el consumo de combustible basado en la curvatura.
- CurveAdjArray = ver tabla 12 para información.
- CurveCategory = muy curvas, curvas y rectas

d. Ajuste por congestión

El ajuste por congestión es calculado usando valores obtenidos de los parámetros de consumo de combustible (fcong) en la tabla 10. La congestión es afectada por la tasa de consumo de combustible de todos los vehículos, aumentando a medida que los vehículos permanecen en tráfico congestionado.¹⁷

El ajuste de congestión se calcula multiplicando el VCR por el factor de consumo de combustible por tipo de vehículo. La implicación de la fórmula es que algunos tipos de vehículo consumen más combustible en la congestión que otros. Los valores en la tabla 10 indican que los vehículos comerciales pesados, que son predominantemente diesel, utilizan menos combustible extra en tráfico congestionado. El ajuste de la congestión calculado se utiliza en CBA6, si el valor calculado es menor que 1. Si el ajuste de congestión calculado es mayor que 1, se utiliza un valor máximo predeterminado de 1 en CBA6.

La ecuación 19 muestra el ajuste por congestión para el consumo de combustible.

Ecuación 19: Ajuste por congestión para el consumo de combustible

¹⁷ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.33

$$\text{Congestion adjustment} = \text{MIN} (1, \text{VCR} \times \text{FCONGF})$$

Donde:

- Min = valor mínimo
- VCR = relación de capacidad de volumen
- FCONGF = parámetro de ajuste consumo de combustible

e. Ajuste por rugosidad

Ajustes por el efecto de la condición de superficie de carretera en consumo de combustible se basan en la rugosidad de la carretera, el tipo de vehículo y la velocidad de funcionamiento. El primer ajuste es el pavimento condición factor de costo (GCGFAC), que ajusta el consumo de combustible para los efectos de la rugosidad de la carretera. Esto se demuestra por la ecuación 20.¹⁸

Ecuación 20: Factor de costo de condición de pavimento para combustible consumo

$$\text{GCGFAC} = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \text{CFSMAX} \\ \text{CSENSP} \times \frac{(\text{CNRM} - \text{PAVC})}{(\text{NRMA} - \text{PAVC})} \end{array} \right.$$

Donde:

- GCGFAC = Factor de costo para la condición del pavimento
- CFSMAX = factor de coste máximo para carreteras asfaltadas y es igual a 1.75
- CSENSP = sensibilidad del costo de carreteras asfaltadas y es igual a 4
- CNRM = rugosidad actual de la carretera
- PAVC = mínima rugosidad del camino después de (re) construcción (igual a 60)
- NRMA = coeficiente de PSR a NRM relación de conversión (igual a 250)

El factor de costo de condición de pavimento de rugosidad se ajusta para que tipo de vehículo y la velocidad determinar el factor de regulación de la rugosidad. Se calcula el factor de regulación de la rugosidad (FCGRVF) de los factores de corrección de rugosidad que se muestra en tabla 13.

¹⁸ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.34

El factor de costo condición del pavimento rugosidad se ajusta por tipo de vehículo y la velocidad para determinar el factor de ajuste de la rugosidad. El factor de ajuste de la rugosidad (FCGRVF) se calcula a partir de los factores de corrección de rugosidad que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13: FCGRVF ajuste de rugosidad para consumo de combustible

Vehicle type	Speed description fcgrvf												
	8-15 km/h	16-23 km/h	24-31 km/h	32-39 km/h	40-47 km/h	48-55 km/h	56-63 km/h	64-71 km/h	72-79 km/h	80-87 km/h	88-95 km/h	96-103 km/h	104-112 km/h
Cars - private	0.023	0.060	0.067	0.070	0.077	0.087	0.100	0.103	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090
Cars - commercial	0.026	0.060	0.068	0.073	0.078	0.084	0.090	0.092	0.083	0.080	0.080	0.077	0.073
Non-Articulated	0.044	0.083	0.093	0.103	0.111	0.123	0.127	0.110	0.104	0.097	0.091	0.076	0.071
Buses	0.050	0.080	0.090	0.100	0.110	0.120	0.140	0.150	0.130	0.120	0.120	0.110	0.100
Articulated	0.033	0.097	0.113	0.127	0.143	0.160	0.177	0.193	0.187	0.170	0.160	0.147	0.133
B-double	0.050	0.100	0.120	0.140	0.160	0.170	0.190	0.200	0.200	0.220	0.190	0.180	0.170
Road train 1	0.060	0.110	0.130	0.150	0.170	0.190	0.210	0.220	0.240	0.240	0.200	0.200	0.200
Road train 2	0.060	0.120	0.140	0.150	0.170	0.200	0.230	0.270	0.220	0.260	0.230	0.230	0.210

Fuente: adaptado de Austroads (2005) pág. 31.

B-doble viajando a una velocidad de 64,4 km/h, está sujeto a una FCGRVF de 0.2. La regulación de la rugosidad consiste en la FCGRVF y los factores GCGFAC. A continuación se muestra la ecuación de regulación de la rugosidad de la ecuación 21.

Ecuación 21: Ajuste de rugosidad de consumo de combustible

$$Rough Adj(VT) = FCGRVF(VT) = FCGRVF(VT) \times GCGFAC$$

Donde:

- RoughAdj (VT) = factor de ajuste de rugosidad de consumo de combustible
- FCGRVF (VT) = factor de corrección de rugosidad

f. Costo por consumo de combustible

Utilizando datos de la tabla 10, el costo de la gasolina en centavos de dólar por litro se muestra en la ecuación 22. Esta fórmula incorpora la media ponderada de los vehículos según su tipo de combustible. Por ejemplo, un vehículo rígido (no articulado) puede utilizar combustible ya sea gasolina o diesel.¹⁹

Ecuación 22: Costo de consumo de combustible.

$$Fuelc(VT) = Petrol(VT) \times (1 - PDies(VT)) + Diesel(VT) \times PDies(VT)$$

Donde:

- Fuelcf (VT) = costo en centavos por litro del combustible
- Petrol (VT) = costo de la gasolina en centavos de dólar por litro
- PDIES (VT) = proporción de diesel en vehículo
- DIESEL (VT) = costo en centavos de dólar por litro de diesel

Una vez que se ha calculado el costo de consumo de combustible, puede ser incorporado en la fórmula de coste del combustible total. Costo del combustible total se ajusta entonces para consumos básicos, eficiencia de combustible, pendiente, curvatura, congestión y rugosidad. El coste de combustible total está dada por la ecuación 23.

Ecuación 23: Costo de combustible total

$$Fuel Cost(VT) = Fuelcf(VT) \times BFC(VT) \times (1 + FCAVF + Grad Adj + Curv Adj + CongAdj + Rough Adj)VT$$

Donde:

- Fuelcf (VT) = costo en centavos por litro del combustible
- BFC (VT) = consumo básico de combustible
- FCAVF = eficiencia del combustible o estado de factor de afinado
- Grad Adj = ajuste por pendiente de carretera
- Curve Adj = ajuste por curvatura de carretera
- Cong Adj = ajuste por congestión

¹⁹ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.36

- Rough Adj = ajuste por la rugosidad de la carretera

2.2.5.2. Costos de aceites

Los costos de aceite generalmente son un componente pequeño del total VOC. El consumo de aceites se calcula usando los datos en la tabla 14.

Tabla 14: Costos de aceites y factores de consumo

Vehicle type	Oil consumption factors (oilcons)													Oil costs	Pdies
	Operating speed													Oils (c/l)	
	8-15km/h	16-23km/h	24-31km/h	32-39km/h	40-47km/h	48-55km/h	56-63km/h	64-71km/h	72-79km/h	80-87km/h	88-95km/h	96-103km/h	104-112km/h		
Cars – private	0.75	0.57	0.53	0.55	0.57	0.60	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.77	522.00	0.00
Cars – commercial	0.75	0.57	0.53	0.55	0.57	0.60	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.77	511.00	0.00
Non-Articulated	1.26	0.99	0.97	0.95	0.96	0.97	0.99	1.01	1.04	1.07	1.13	1.22	1.31	488.00	0.50
Buses	1.26	0.99	0.97	0.95	0.96	0.97	0.99	1.01	1.04	1.07	1.13	1.22	1.31	488.00	0.70
Articulated	1.88	1.37	1.36	1.34	1.36	1.37	1.44	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.63	488.00	0.90
B-double	2.59	2.02	1.99	1.98	1.99	2.02	2.07	2.12	2.18	2.23	2.26	2.28	2.34	488.00	1.00
Road train 1	2.59	2.02	1.99	1.98	1.99	2.02	2.07	2.12	2.18	2.23	2.26	2.28	2.34	488.00	1.00
Road train 2	2.59	2.02	1.99	1.98	1.99	2.02	2.07	2.12	2.18	2.23	2.26	2.28	2.34	488.00	1.00

Fuente: adaptado de Austroads p.35 (2005), p.16 (2008) Austroads y pdies

a. Consumo de aceite

El consumo de aceite promedio por vehículo en litros por 1000 km está dada por la ecuación 24.

Ecuación 24: Promedio de consumo de aceite

$$Oil(VT) = \left(dtopcf \times Pdies(VT) + (1 - Pdies(VT)) \right) \times Oilcons(VT, OS) \times gear$$

Donde:

- Oil (VT) = un promedio de consumo de diésel y gasolina (litros/1000 km)
- dtopcf = relación de conversión de petróleo a diésel para vehículo (model variable = 1.5)
- Pdies = proporción de vehículos que son motor diesel

- Oilcons (VT, OS) = relación básica velocidad de consumo de aceite de motor por vehículo
- Gear = factor que relaciona el consumo de aceite total al uso del aceite del motor (modelo variable = 1.1)

b. Costo de aceite

El factor de consumo se utiliza para determinar el costo total del petróleo para cada vehículo, dada por la ecuación 25. El costo unitario de aceite se enumera en la tabla 14 para cada tipo de vehículo.²⁰

Ecuación 25: Aceite Total costo

$$OilCost(VT) = Oil(VT) \times Oils(VT) / 1000$$

Donde:

- OilCost (VT) = el costo del aceite de motor (c/km)
- Oils (VT) = precio de aceite de motor (c/litro)

2.2.5.3. Llantas

Los costos de los neumáticos en CBA6 se calculan utilizando los datos que se muestran en la Tabla 15. El costo de desgaste de la banda en centavos por 0,001 mm de espesor de banda de rodadura (cost tread) se calcula en primer lugar, seguido por el desgaste básico de neumático que se calcula como 0,001 mm de desgaste por cada 1000 kilómetros. Los ajustes se hacen entonces para el gradiente, la curvatura, la rugosidad y la congestión.

²⁰ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.38

Tabla 15: Desgaste de llantas y parámetros de costos.

Vehicle type	No.tyre Number of tyres (excl. Spares)	Ctyre# Costs of new tyres (\$)	Cretr# Cost of retreads (\$)	Retn Average number of retreads per tyre	Treadn Thickness of tread for new tyre	Treadr Thickness of tread for retreaded tyre	Tyre wc1 Formula factor 1	Tyre wc2 Formula factor 2	Tyre k State of tune factor	Tcong^ Factor for tyre wear increase at VCR=1
Cars – private	4	121	66	0	6.71	5.87	0.00000	0.42780	201.9	1.7
Cars – commercial	4	136.33	84.67	0	7.22	6.32	0.00000	0.42780	201.9	1.7
Non-Articulated	7	309.8	141.2	1.4	9.27	8.58	0.00652	0.08556	305.54	1
Buses	8	309.8	141.2	1.75	9.53	8.92	0.00815	0.00000	331.45	1
Articulated	20	338.33	118.67	2.5	10.67	9.75	0.00210	0.00000	100.23	1
B-double	30	331	125	2.5	10.67	9.75	0.00230	0.00000	106.3	1
Road train 1	44	331	130	2.5	10.67	9.75	0.00230	0.00000	106.3	1
Road train 2	62	327	134	2.5	10.67	9.75	0.00230	0.00000	106.3	1

Fuente: adaptado de p.39 Austroads (2005), cálculos de TMR y Austroads (2008) pág. 16.

2.2.5.4. Costo de la banda de rodadura

El cálculo del costo de la pisada (VT) por 0,001 mm de espesor está dada por la ecuación 26. El costo de la banda de rodadura es una función del costo de los neumáticos nuevos y el costo del número y espesor de neumáticos recauchutados. Vehículos privados y comerciales no utilice neumáticos recauchutados, a diferencia de los carros que se supone utilizar neumáticos nuevos y recauchutados.²¹

Ecuación 26: Costo de la banda de rodadura

$$TreadCost = NoTyre \times \frac{(CTYRE + CRETR + RETN) \times 100}{TREADN + TREADR \times RETN} \times 1000$$

Donde:

- CTYRE = costo de neumáticos nuevos (\$)
- CRETR = costo de los neumáticos recauchutados (\$)
- RETN = promedio del número de recauchutadas por llanta
- TREADN = espesor de la huella para neumáticos nuevos
- TREADR = espesor de la huella para neumáticos recauchutados

²¹ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.41

a. Desgaste de llantas

La fórmula de desgaste del neumático ilustra la relación de desgaste de neumático velocidad básica dada por la ecuación 27. Esta ecuación incorpora el efecto de velocidad funcionamiento, basado en el supuesto de que mayores velocidades de operación aumentan el desgaste de los neumáticos. Muestra en el ejemplo que hay una relación directa entre el desgaste del neumático y velocidad para los vehículos privados y comerciales mientras el desgaste de los neumáticos de funcionamiento y velocidad de otros vehículos de funcionamiento presentan una relación no lineal directa.²²

Ecuación 27: Desgaste básico de neumáticos

$$\begin{aligned} \text{Tyre wear} = & \text{TyreK}(VT) + (OS(VT))^2 \times \text{TyreWC1}(VT) + OS(VT) \\ & \times \text{TyreWC2}(VT) \end{aligned}$$

Donde:

- Tyrek = state of tune factor
- OS = vehicle operating speed
- TyreWC1 = formula factor 1
- TyreWC2 = formula factor 2

b. Ajuste por congestión

Desgaste de los neumáticos se ajusta para los niveles de congestión en la carretera para calcular el factor de ajuste de congestión de desgaste de neumáticos para cada tipo de vehículo (TCONG). El ajuste de la congestión es dada por la ecuación 28. El factor TCONG es originario de tabla 15.²³

Ecuación 28: Ajuste de congestión

$$\text{Cong}(VT) = \text{TCONG}(VT) \times \text{VCR}$$

$$\text{Cong}(VT) = \text{TCONG}(VT) \times \text{VCR}$$

Donde:

²² (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.41

²³ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.42

- Cong (VT) = ajuste por congestión por tipo de vehículo.
- TCONG (VT) = factor para aumentar el desgaste de los neumáticos donde VCR = 1 por tipo de vehículo

c. Ajuste de pendiente y curvatura

Curvatura y ajustes de gradiente se calculan por la proporción de tramos, que se clasifican en cada curvatura y categoría de degradado. Estos valores de los parámetros se muestran en tabla 16.²⁴

Tabla 16: Ajuste de costo de llanta por pendiente y curvatura

Vehicle type	Gradient					Curve design speed (km/h)			
	<2%	<4%	<6%	<8%	<10%	30	50	65	80
Cars – private	0	0.1	0.2	0.4	0.6	10	15	20	15
Cars – commercial	0	0.14	0.27	0.54	0.81	10	15	20	15
Non-Articulated	0	0.14	0.27	0.54	0.81	10	15	20	15
Buses	0	0.15	0.3	0.6	0.9	10	15	20	15
Articulated	0	0.15	0.3	0.6	0.9	10	15	20	15
B-double	0	0.15	0.3	0.6	0.9	10	15	20	15
Road train 1	0	0.15	0.3	0.6	0.9	10	15	20	15
Road train 2	0	0.15	0.3	0.6	0.9	10	15	20	15

Fuente: Cálculos de TMR y adaptado de Austroads (2005) p.41

Nota: Para velocidades de diseño mayores que los especificados en la tabla 16, CBA6 asume que se utiliza el factor de ajuste de 0.

Ajustes de la pendiente y curvatura en CBA6 se ponderan a la proporción de carretera que está clasificado en cada categoría.

Gradient and curvature proportions used in CBA6 are shown by Table 17.

Tabla 17: Proporciones de pendiente y curvatura preestablecidas

Preset	Gradient proportion				
	< 2%	< 4%	< 6%	< 8%	< 10%
Level/flat	90%	10%	0%	0%	0%
Rolling/undulating	50%	30%	20%	0%	0%
Mountainous	30%	30%	20%	20%	0%

Preset	Curvature proportion				
	30km/h	50km/h	65km/h	80km/h	No curve
Straight	0%	0%	0%	10%	90%
Curvy	0%	0%	10%	30%	60%
Very curvy	0%	0%	60%	20%	20%

Fuente: Cálculos de la TMR

²⁴ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.42

d. Ajuste por pendiente

Ajuste del gradiente se calcula utilizando los datos de la tabla 16 y se muestra en la ecuación 29. La proporción de la sección del camino que se clasifica por la categoría de gradiente se ilustra en la tabla 17. Posteriormente, estos valores se multiplican para obtener los factores de ajuste por pendiente desglosados.²⁵

Ecuación 29: Factor de ajuste por pendiente para llantas

$$Grad(VT) = \sum Gradient\ Adj\ Array(VT, Grade_i) \times Grade\%_i$$

Donde:

- Grad (VT) = factor de ajuste por pendiente para neumático (vehicle type)
- Gradient Adj Array = valores de ajuste por pendiente.
- Grade% = porcentaje de carretera que cae en cada categoría de pendiente.

e. Ajuste por curvatura

El ajuste de curvatura se calcula en CBA6 utilizando los datos de la tabla 16 y está dada por la ecuación 30.²⁶

Ecuación 30: Factor de ajuste para neumático por curvatura

$$Curv(VT) = \sum Curvature\ Adj\ Array(VT, Design\ Speed_i) \times Curvature\%_i$$

Donde:

- Curv (VT) = factor de ajuste por curvatura para desgaste de neumático
- Curvature Adj Array = valores de los parámetros de curvatura
- Curvature%i = porcentaje de carretera que cae en cada categoría de curvatura

f. Ajuste por rugosidad

La regulación de la rugosidad para el desgaste de los neumáticos depende de la velocidad de funcionamiento y se muestra en la tabla 18.²⁷

²⁵ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.43

²⁶ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.44

²⁷ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.45

Tabla 18: Matriz de ajuste por rugosidad para neumático

Vehicle type	Operating speed (km/h)										
	8-16	16-24	24-32	40-48	48-56	56-64	64-72	72-80	80-88	88-96	96-104
Cars – private	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
Cars – commercial	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
Non-Articulated	0.32	0.32	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.30	0.30
Buses	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
Articulated	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
B-double	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Road train 1	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Road train 2	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

Fuente: adaptado de Austroads p.40 (2005)

Se selecciona el valor de regulación de la rugosidad de la matriz de ajuste de rugosidad neumático basada en la velocidad de funcionamiento actual del vehículo.

g. Costo total por neumático

El costo unitario total representa el total del costo por uso de neumático para las características de la carretera, como se muestra en la ecuación 31.²⁸

Ecuación 31: Costo neumático

$$Tyres(VT) = TreadCost \times btw(VT) \times (1 + Cong(VT) + Curve(VT) + Rough(VT) + Grad(VT))$$

Donde:

- Tyres (VT) = costo de neumático
- btw (VT) = desgaste básico de neumático

2.2.5.5. Reparación y mantenimiento

Los costos de mantenimiento y reparaciones son calculadas usando la aspereza del camino y reparaciones básicas y servicios los costos como se muestra en la tabla 19. Esta tabla muestra las reparaciones básicas y servicios costos para todo tipo de vehículo por kilómetro recorrido. A diferencia de otros componentes de costos operativos, velocidad, alineación de vial y la congestión del tráfico no afectan directamente los costos de mantenimiento y reparaciones de vehículos.²⁹

²⁸ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.45

²⁹ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.47

Tabla 19: Costo de reparación y mantenimiento (RMUC)

Vehicle type	RMUC
	Basic repairs and servicing cost (cents/km)
Cars – private	4.5
Cars – commercial	4.6
Non-Articulated	8.6
Buses	8.6
Articulated	16.6
B-double	20.6
Road train 1	22.0
Road train 2	28.2

Fuente: adaptado de Austroads (2008) pág. 16.

Los costes básicos de mantenimiento y reparaciones se ajustan para la condición del pavimento mediante el índice de condición de pavimento (pavind), en la tabla 20.

Tabla 20: Índice de condición de pavimento

Surface type	Pavind (NRM)				
	50	100	150	200	250
Earth/formed	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Gravel	1.5	1.57	1.65	2	2.5
Sealed/concrete	1	1.15	1.3	1.45	1.6

Fuente: adaptado de Austroads (2005) página 47.

Valores de los parámetros se dan para 50, 100, 150, 200 y 250 MRN. Estos valores de condición de pavimento deben ser interpolados para obtener un parámetro de rugosidad actual (CNRM).

Nota: La rugosidad actual ha de estar entre 30 y 250 MRN. Cuando la rugosidad actual es menos de 50 MRN, el factor de valor o rscmr_f de ajuste será igual a 1 como se muestra en la ecuación 32.

Ecuación 32: Factor de ajuste por reparación y mantenimiento

$$rscmr_f(VT) \begin{cases} 30 \leq CNRM < 50 = 1 \\ 50 \leq CNRM < 100 = 1 + (PAVIND(ST, 100) - PAVIND(ST, 50)) \frac{CNRM - 50}{100 - 50} \\ 100 \leq CNRM < 150 = PAVIND(ST, 100) + (PAVIND(ST, 150) - PAVIND(ST, 100)) \frac{CNRM - 100}{150 - 100} \\ 150 \leq CNRM < 200 = PAVIND(ST, 150) + (PAVIND(ST, 200) - PAVIND(ST, 150)) \frac{CNRM - 150}{200 - 150} \\ 200 \leq CNRM < 250 = PAVIND(ST, 200) + (PAVIND(ST, 250) - PAVIND(ST, 200)) \frac{CNRM - 200}{250 - 200} \end{cases}$$

Donde:

- CNRM = rugosidad actual en NRM
- PAVIND (PT) = valor de índice de pavimento en el tipo de superficie actual (ST)

a. Costo total unitario por reparación y mantenimiento

La costo unitario reparaciones y de mantenimiento de este componente VOC es la suma de las reparaciones básicas y costo de mantenimiento por tipo de vehículo y el factor de ajuste de rugosidad de la ecuación 33.³⁰

Ecuación 33: Repairs and maintenance cost

$$REPMCS(VT) = RMUC(VT) \times rscmr f(VT)$$

Donde:

- REPMCS (VT) = costo por reparación y mantenimiento por tipo de vehículo
- RMUC (VT) = costo básico de reparación y mantenimiento por tipo de vehículo
- rscmr f (VT) = factor de ajuste por reparación y mantenimiento por tipo de vehículo

2.2.5.6. Costos de depreciación e interés

Los costos de depreciación y el interés para todo tipo de vehículo son calculados usando los datos mostrados por la tabla 21.

Tabla 21: Factores de tiempo y depreciación

Vehicle type	Tax	Vehicles	Ddpr	Tdi	Fleet	Ahour
	Effective sales tax % on new vehicles	New vehicle price (\$)	Basic distance depreciation rate	Basic time depreciation	Proportion of VT susceptible to fleet reduction	No. Of hours/ year vehicle is available on the road
Cars – private	10%	24,410	0.22	9.50	0.00	1000
Cars – commercial	10%	29,890	0.25	9.20	0.27	1200
Non-Articulated	10%	101,450	0.28	7.40	0.80	1760
Buses	10%	101,450	0.15	7.00	0.80	2000
Articulated	10%	245,917	0.15	5.50	0.65	2833
B-double	10%	357,110	0.14	5.50	0.60	3000
Road train 1	10%	395,720	0.14	5.50	0.60	3000
Road train 2	10%	495,950	0.14	5.50	0.60	3000

Fuente: adaptado de Austroads (2008) página 16 y Austroads (2005) página 51.

³⁰ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.48

Los valores de la tabla 22 se utilizan para calcular los costos netos de la depreciación y el interés. Estos valores describen la relación entre distancia amortización y tipo de superficie de carretera.

Tabla 22: Factor por tipo de superficie.

Surface type	Depsrf
Factor relating distance depreciation to road surface type	
Unsurfaced	2.5
Primerseal	1.5
Sealed	1
Concrete	1

Fuente: TMR.

La distancia y tiempo de depreciación por tipo de vehículo se deriva para calcular los costos netos de la depreciación y el interés. El costo económico de un nuevo vehículo se calcula y luego es ajustado para tener en cuenta distancia y tiempo.

a. Costo económico de un vehículo nuevo

Un componente de los cálculos de depreciación y el interés es el costo económico de un nuevo vehículo. Se define como el precio del vehículo menos el costo de todos los neumáticos suministrado con el vehículo, incluyendo cualquier repuestos. El costo económico de un nuevo vehículo se muestra en la ecuación 34, donde cálculos de precio son netos de impuestos de ventas.³¹

Ecuación 34: Costo económico de un nuevo vehículo.

$$ECV(VT) = VEHICLES(VT) \times \left(\frac{100}{100 + TAX(VT)} \right) - CTYRE(VT) \times (NOTYRE(VT) + 1)$$

Donde:

- ECV (VT) = costo económico del vehículo
- VEHICLES (VT) = nuevo precio de vehículo por tipo de vehículo (\$)
- TAX = impuesto efectivo sobre las ventas de vehículos nuevos
- NOTYRE (VT) = número de neumáticos (incluyendo repuestos)
- CTYRE (VT) = costo de neumáticos nuevos (\$)

³¹ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.50

b. Depreciación básica por distancia

Depreciación (cents/km) de distancia básica se deriva el costo económico de un vehículo nuevo y una tasa de depreciación de distancia. Depreciación de distancia básica se muestra en la ecuación 35.³²

Ecuación 35: Depreciación de distancia básica

$$DSTEP(VT) = 0.001 \times 100 \times ECV(VT) \times \frac{DDPN(VT)}{100}$$

Donde:

- DSTDEP = depreciación de distancia básica (cents/km)
- ECV (VT) = costo económico de vehículo nuevo (\$)
- DDPN (VT) = tasa de depreciación por distancia %

c. Depreciación básica por tiempo

Depreciación de tiempo básico se deriva en función del costo económico de un nuevo vehículo, que se muestra en la ecuación 36.³³

Ecuación 36: depreciación de tiempo básico

$$TDPINT(VT) = 100 \times ECV(VT) \times \left(\frac{TDI(VT)}{100} \right) \times \frac{FLEET(VT)}{AHOOR(VT)}$$

Donde:

- TDPINT (VT) = tiempo marginal depreciación e intereses por tipo de vehículo (centavos/hora)
- ECV (VT) = costo económico de vehículo por tipo de vehículo (\$)
- TDI (VT) = tiempo básico depreciación y tasa de interés por tipo de vehículo (% / año)
- FLEET (VT) = proporción del tipo de vehículo susceptible de efectos de «reducción de la flota» debida a la reducción del tiempo de viaje por tipo de vehículo
- AHOOR (VT) = número de horas al año para que vehículo tipo está disponible 'en el camino' por tipo de vehículo

³² (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.51

³³ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.41

d. Costos netos de depreciación e intereses

Costos netos de la depreciación y el interés combinan componentes tanto tiempo y la distancia, por la ecuación 37.

Ecuación 37: Neto de depreciación y el interés

$$DPINCS(VT) = (DSTDEP(VT) \times DEPSRF + \frac{TDPINT(VT)}{OS(VT)})$$

Donde:

- DPINCS (VT) = costos de depreciación y el interés por tipo de vehículo (cents/km)
- DSTDEP (VT) = depreciación de distancia básica (VT) (cents/km)
- DEPSRF = factor de depreciación de distancia relativas al tipo de superficie de carretera (VT)
- TDPINT (VT) = tiempo marginal depreciación e intereses por tipo de vehículo (centavos/hora)
- OS (VT) = velocidad de operación

2.2.5.7. Costo total de operación del vehículo unitario

La unidad total VOC es la suma de los componentes individuales de la VOC calculado a lo largo de la sección 4. Esto incluye combustible, neumáticos, aceite, reparaciones y mantenimiento e interés y depreciación. Unidad total VOC se dan en la ecuación 38.³⁴

Ecuación 38: Unidad Total de VOC

$$UnitVOC(VT) = Fuel + Oil + Tyre + Repairs + Depreciation$$

Donde:

- UnitVOC (VT) = costo de operación unitario de vehículo (cents/km)

Luego se suma la VOC total para el año en todos los tipos de vehículo. La fórmula VOC se muestra por la ecuación 39.

Ecuación 39: Total VOC (todo tipo de vehículo)

³⁴ (Queensland Government, 2011) Capítulo 4.4 pág. 4.54

$$TotalVOC = Seclength \times days \times \sum_i AADT_i \times \frac{VOC_i}{100}$$

El cálculo de VOC se completa por cada año de la evaluación. Se cambiará el valor de VOC como condiciones de la carretera tales como aspereza y volumen varían cada año.

La derivación de VOC anual se requiere para los casos de la base y el proyecto. La diferencia entre los compuestos orgánicos Volátiles derivados para el caso base y proyecto utilizará para estimar el beneficio anual y total de VOC para el proyecto propuesto.

2.2.6. NIVEL DE SERVICIO

El nivel de servicio utiliza medidas cualitativas que caracterizan las condiciones operacionales dentro de una secuencia de tráfico y su percepción por parte de los conductores y pasajeros. Las descripciones de cada uno de los niveles de servicio caracterizan a estas condiciones en términos de factores tales como la velocidad y el tiempo de viaje, el de la libertad de maniobra, interrupciones del tráfico, y el confort y la comodidad. Seis niveles de servicio se definen para cada tipo de servicio para los procedimientos de análisis que están disponibles. Se designan mediante letras, de la A, a la F, con los a representar las mejores condiciones de funcionamiento y los F Los peores. Cada nivel de servicio representa una amplia gama de condiciones de funcionamiento. (Transportation Research Board, 1998)

El Manual de capacidad de carreteras, en su reporte especial 209. Proporciona la metodología de cálculo del nivel de servicio para diferentes condiciones en carreteras, particularmente en el capítulo 8, aborda las carreteras de dos carriles.

2.2.6.1. ANÁLISIS OPERATIVO DE SEGMENTOS DE TERRENO EN GENERAL

El objetivo en el análisis operacional es determinar el nivel de servicio para un determinado segmento o segmentos de carretera para un conocido conjunto de condiciones existentes, o para un futuro conjunto de condiciones que son

hipótesis y/o previsión. El enfoque general será calcular flujo de servicio para cada nivel de servicio y comparar estos valores con el flujo existente en la planta. Esto se hace usando el EQ. 8-1:

$$SF_i = 2,800 \times (v/c)_i \times f_d \times f_w \times f_{HV}$$

Donde todos los términos son previamente definidas. Un flujo de servicio para cada uno de los se calcula porque el vehículo pesado factor varía con los, y una solución directa de la ecuación para el coeficiente v/c sería iterativo. Los usuarios prefieren resolver para v/c puede hacerlo, pero debe iterar hasta el supuesto de los utilizados en el cálculo del factor de vehículos pesados es el mismo que el indicado por el cociente v/c encontrado. En general, los siguientes pasos se usan computacional. Los cálculos pueden ser convenientemente realizados en una hoja de cálculo.

1. Resumir todos los datos de entrada sobre el tráfico y las condiciones viales, incluyendo:
 - Previsión existente o volumen, en hora punta del VPH.
 - Hora pico, factor de PHF, a partir de datos locales o valor predeterminado seleccionado de la Tabla 8-3.
 - Composición (% de tráfico de camiones, % de RV, % de autobuses).
 - Distribución del tráfico direccional.
 - El tipo de terreno.
 - Carril y ancho de berma utilizados, en Ft.
 - Diseño, velocidad en mph.

2. Seleccione los valores apropiados de los siguientes factores para cada uno de los de las tablas indicadas:
 - La relación de v/c de la Tabla 23.

Tabla 23: Nivel de servicio en un segmento de terreno general.

LOS	PERCENT TIME DELAY	v/c RATIO ^a																							
		LEVEL TERRAIN						ROLLING TERRAIN						MOUNTAINOUS TERRAIN											
		AVG ^b SPEED	PERCENT NO PASSING ZONES						AVG ^b SPEED	PERCENT NO PASSING ZONES						AVG ^b SPEED	PERCENT NO PASSING ZONES								
	0	20	40	60	80	100		0	20	40	60	80	100		0	20	40	60	80	100					
A	≤ 30	≥ 58	0.15	0.12	0.09	0.07	0.05	0.04	≥ 57	0.15	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03	≥ 56	0.14	0.09	0.07	0.04	0.02	0.01			
B	≤ 45	≥ 55	0.27	0.24	0.21	0.19	0.17	0.16	≥ 54	0.26	0.23	0.19	0.17	0.15	0.13	≥ 54	0.25	0.20	0.16	0.13	0.12	0.10			
C	≤ 60	≥ 52	0.43	0.39	0.36	0.34	0.33	0.32	≥ 51	0.42	0.39	0.35	0.32	0.30	0.28	≥ 49	0.39	0.33	0.28	0.23	0.20	0.16			
D	≤ 75	≥ 50	0.64	0.62	0.60	0.59	0.58	0.57	≥ 49	0.62	0.57	0.52	0.48	0.46	0.43	≥ 45	0.58	0.50	0.45	0.40	0.37	0.33			
E	> 75	≥ 45	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	≥ 40	0.97	0.94	0.92	0.91	0.90	0.90	≥ 35	0.91	0.87	0.84	0.82	0.80	0.78			
F	100	< 45	—	—	—	—	—	—	< 40	—	—	—	—	—	—	< 35	—	—	—	—	—	—			

Fuente: Highway capacity Manual

- El factor de distribución direccional, f_d de la Tabla 24.
- La anchura de carril y la anchura de las bermas, f_w , factor de la Tabla 25.

Tabla 24: Factor de ajuste para distribución dirección en segmento de terreno general

Directional Distribution	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50
Adjustment Factor, f_d	0.71	0.75	0.83	0.89	0.94	1.00

Fuente: Highway capacity Manual

Tabla 25: Factores de ajuste para el efecto combinado de ancho de carril y ancho de berma.

USABLE ^a SHOULDER WIDTH (FT)	12-FT LANES ^b		11-FT LANES ^b		10-FT LANES ^b		9-FT LANES ^b	
	LOS A-D	LOS E	LOS A-D	LOS E	LOS A-D	LOS E	LOS A-D	LOS E
≥ 6	1.00	1.00	0.93	0.94	0.84	0.87	0.70	0.76
4	0.92	0.97	0.85	0.92	0.77	0.85	0.65	0.74
2	0.81	0.93	0.75	0.88	0.68	0.81	0.57	0.70
0	0.70	0.88	0.65	0.82	0.58	0.75	0.49	0.66

- Los promedios equivalentes, a vehículos de pasajeros, ET, ER, y EB, camiones, RV's, y buses, desde la Tabla 26.

Tabla 26: Promedio equivalente a vehiculo de pasajeros para camiones, RV y buses.

VEHICLE TYPE	LEVEL OF SERVICE	TYPE OF TERRAIN		
		LEVEL	ROLLING	MOUNTAINOUS
Trucks, E_T	A	2.0	4.0	7.0
	B and C	2.2	5.0	10.0
	D and E	2.0	5.0	12.0
RV's, E_R	A	2.2	3.2	5.0
	B and C	2.5	3.9	5.2
	D and E	1.6	3.3	5.2
Buses, E_B	A	1.8	3.0	5.7
	B and C	2.0	3.4	6.0
	D and E	1.6	2.9	6.5

Fuente: Highway capacity Manual

3. Calcular el factor de vehículos pesados, F_{HV} , para cada uno de los de:

$$FHV = 1/[1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1) + P_B(E_B - 1)]$$

4. Calcular el flujo de servicio, SF , para cada uno de los de:

$$SF_i = 2,800 \times (v/c)_i \times f_d \times f_w \times f_{HV}$$

5. Convertir el volumen existente o previste en una tasa de flujo equivalente, como sigue: $v = V/PHF$.
6. Compare el flujo real de paso 5 con el servicio del flujo del paso 4 para determinar el nivel de servicio.

2.2.6.2. ANÁLISIS OPERATIVO DE PENDIENTES ESPECÍFICAS

El análisis operativo de grados específicos es similar al procedimiento general de segmentos del terreno. El nivel de servicio para la actualización de la dirección buscada, y se determina comparando un verdadero flujo de dos vías para el servicio de flujo es para los distintos niveles de servicio. Como se señaló en el "Methodology" Sección, sin embargo, la determinación de la capacidad para grados específicos requiere el trazado de un servicio de flujo-curva de velocidad, y una curva que representa la relación de velocidad con capacidad de flujo a su capacidad.

1. Resumir todos los datos de entrada requeridos sobre el tráfico y las condiciones viales, incluyendo:
 - Previsión existente o volumen, en hora punta del VPH.
Hora pico, factor de PHF, a partir de datos locales o el valor predeterminado de la Tabla 27.

Tabla 27: Tabla de factores de hora pico.

A. LEVEL-OF-SERVICE DETERMINATIONS			
TOTAL 2-WAY HOURLY VOLUME (VPH)	PEAK HOUR FACTOR (PHF)	TOTAL 2-WAY HOURLY VOLUME (VPH)	PEAK HOUR FACTOR (PHF)
100	0.83	1,000	0.93
200	0.87	1,100	0.94
300	0.90	1,200	0.94
400	0.91	1,300	0.94
500	0.91	1,400	0.94
600	0.92	1,500	0.95
700	0.92	1,600	0.95
800	0.93	1,700	0.95
900	0.93	1,800	0.95
		≥ 1,900	0.96

B. SERVICE FLOW-RATE DETERMINATIONS					
Level of Service	A	B	C	D	E
Peak Hour Factor	0.91	0.92	0.94	0.95	1.00

Fuente: Highway capacity Manual

- Composición (% de tráfico de camiones, % RV's, % % autobuses, coches de pasajeros).
 - Distribución del tráfico direccional.
 - Calidad por ciento.
 - Por Ciento no pasa de las zonas.
 - Longitud de grado, en millas.
 - Ancho del carril y de las bermas, en Ft.
 - Diseño, velocidad en mph.
2. Seleccione los valores de los siguientes factores de las tablas indicadas para las siguientes velocidades medias: 55 mph (LOS A), 52,5 km/h, 50 mph (LOS B), C (los 45 mph (40 mph), LOS D), y 30 mph. Esta gama de velocidades permitirá el trazado de un servicio flujo vs. curva de velocidad para encontrar la capacidad y la velocidad a la capacidad.
- La relación de v/c en la Tabla 28.

Tabla 28: Valores de la relación v/c

PERCENT GRADE	AVERAGE UPGRADE SPEED (MPH)	PERCENT NO PASSING ZONES					
		0	20	40	60	80	100
3	55	0.27	0.23	0.19	0.17	0.14	0.12
	52.5	0.42	0.38	0.33	0.31	0.29	0.27
	50	0.64	0.59	0.55	0.52	0.49	0.47
	45	1.00	0.95	0.91	0.88	0.86	0.84
	42.5	1.00	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94
40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
4	55	0.25	0.21	0.18	0.16	0.13	0.11
	52.5	0.40	0.36	0.31	0.29	0.27	0.25
	50	0.61	0.56	0.52	0.49	0.47	0.45
	45	0.97	0.92	0.88	0.85	0.83	0.81
	42.5	0.99	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92
40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
5	55	0.21	0.17	0.14	0.12	0.10	0.08
	52.5	0.36	0.31	0.27	0.24	0.22	0.20
	50	0.57	0.49	0.45	0.41	0.39	0.37
	45	0.93	0.84	0.79	0.75	0.72	0.70
	42.5	0.97	0.90	0.87	0.85	0.83	0.82
40	0.98	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	
35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
6	55	0.12	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04
	52.5	0.27	0.22	0.18	0.16	0.14	0.13
	50	0.48	0.40	0.35	0.31	0.28	0.26
	45	0.85	0.76	0.68	0.63	0.59	0.55
	42.5	0.93	0.84	0.78	0.74	0.70	0.67
40	0.97	0.91	0.87	0.83	0.81	0.78	
35	1.00	0.96	0.95	0.93	0.91	0.90	
30	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	
7	55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	52.5	0.13	0.10	0.08	0.07	0.05	0.04
	50	0.34	0.27	0.22	0.18	0.15	0.12
	45	0.77	0.65	0.55	0.46	0.40	0.35
	42.5	0.86	0.75	0.67	0.60	0.54	0.48
40	0.93	0.82	0.75	0.69	0.64	0.59	
35	1.00	0.91	0.87	0.82	0.79	0.76	
30	1.00	0.95	0.92	0.90	0.88	0.86	

Fuente: Highway capacity Manual

- El factor de distribución direccional, fd de la Tabla 29.

Tabla 29: Factor de ajuste para distribución direccional.

PERCENT OF TRAFFIC ON UPGRADE	ADJUSTMENT FACTOR
100	0.58
90	0.64
80	0.70
70	0.78
60	0.87
50	1.00
40	1.20
≤ 30	1.50

Fuente: Highway capacity Manual

- Factor de ancho de carril y de bermas, fw, factor de la Tabla 25.
- T El equivalente de turismos, E para el porcentaje y la longitud del grado, de la Tabla 30.

Tabla 30: Equivalentes a vehiculo de pasajeros

GRADE (%)	LENGTH OF GRADE (MI)	AVERAGE UPGRADE SPEED (MPH)					
		55.0	52.5	50.0	45.0	40.0	30.0
0	All	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3	1.3
3	1/4	2.9	2.3	2.0	1.7	1.6	1.5
	1/2	3.7	2.9	2.4	2.0	1.8	1.7
	3/4	4.8	3.6	2.9	2.3	2.0	1.9
	1	6.5	4.6	3.5	2.6	2.3	2.1
	1 1/2	11.2	6.6	5.1	3.4	2.9	2.5
	2	19.8	9.3	6.7	4.6	3.7	2.9
	3	71.0	21.0	10.8	7.3	5.6	3.8
4	*	48.0	20.5	11.3	7.7	4.9	
4	1/4	3.2	2.5	2.2	1.8	1.7	1.6
	1/2	4.4	3.4	2.8	2.2	2.0	1.9
	3/4	6.3	4.4	3.5	2.7	2.3	2.1
	1	9.6	6.3	4.5	3.2	2.7	2.4
	1 1/2	19.5	10.3	7.4	4.7	3.8	3.1
	2	43.0	16.1	10.8	6.9	5.3	3.8
	3	*	48.0	20.0	12.5	9.0	5.5
4	*	*	51.0	22.8	13.8	7.4	
5	1/4	3.6	2.8	2.3	2.0	1.8	1.7
	1/2	5.4	3.9	3.2	2.5	2.2	2.0
	3/4	8.3	5.7	4.3	3.1	2.7	2.4
	1	14.1	8.4	5.9	4.0	3.3	2.8
	1 1/2	34.0	16.0	10.8	6.3	4.9	3.8
	2	91.0	28.3	17.4	10.2	7.5	4.8
	3	*	*	37.0	22.0	14.6	7.8
4	*	*	*	55.0	25.0	11.5	
6	1/4	4.0	3.1	2.5	2.1	1.9	1.8
	1/2	6.5	4.8	3.7	2.8	2.4	2.2
	3/4	11.0	7.2	5.2	3.7	3.1	2.7
	1	20.4	11.7	7.8	4.9	4.0	3.3
	1 1/2	60.0	25.2	16.0	8.5	6.4	4.7
	2	*	50.0	28.2	15.3	10.7	6.3
	3	*	*	70.0	38.0	23.9	11.3
4	*	*	*	90.0	45.0	18.1	
7	1/4	4.5	3.4	2.7	2.2	2.0	1.9
	1/2	7.9	5.7	4.2	3.2	2.7	2.4
	3/4	14.5	9.1	6.3	4.3	3.6	3.0
	1	31.4	16.0	10.0	6.1	4.8	3.8
	1 1/2	*	39.5	23.5	11.5	8.4	5.8
	2	*	88.0	46.0	22.8	15.4	8.2
	3	*	*	*	38.5	23.9	16.1
4	*	*	*	*	45.0	28.0	

Fuente: Highway capacity Manual

- El equivalente de automóvil de pasajeros, E_o , para un grado de 0 por ciento, de la Tabla 30.

3. Calcular el factor de calidad, f_g , como sigue:

$$f_g = 1/[1 + P_p I_p]$$

$$I_p = 0.02(E - E_o)$$

Donde todos los valores están previamente definidas.

4. Calcular el factor de vehículos pesados, f_{HV} , para cada una de las velocidades que anotó en el paso 2 de la siguiente manera:

$$f_{HV} = 1/[1 + P_{HV}(E_{HV} - 1)]$$

$$E_{HV} = 1 + (0.25 + P_{T/HV})(E - 1)$$

$$P_{T/HV} = P_T/[P_T + P_R + P_B]$$

Donde todos los valores están previamente definidas.

5. Calcular el flujo de servicio, SF, para cada una de las velocidades que anotó en el paso 2 de la siguiente manera:

$$SF_i = 2,800 \times (v/c)_i \times f_d \times f_w \times f_g \times f_{HV}$$

6. Trazar el flujo de servicio tarifas vs. velocidad resultante de los cálculos de los pasos 2-5 en la cuadrícula incluido en la hoja de cálculo de la figura 8-5. Tenga en cuenta que la curva de velocidad con capacidad vs. flujo a capacidad ya está dibujado en esta cuadrícula.
7. Encontrar la velocidad a la capacidad de servicio y la capacidad de flujo a partir de la intersección de las dos curvas en el trazado del paso 6.
8. Resumir los flujos de servicio para cada nivel de servicio en la hoja de cálculo como se indica.
9. Convertir el volumen previsto o real a una tasa de flujo, como sigue: $v = V/PHF$.
10. Compare el flujo real del paso 9 con las proporciones de flujo del paso 8 para determinar el nivel de servicio. Como en general los segmentos del terreno, una autopista de dos carriles grado mostrando inaceptables condiciones de funcionamiento sería considerado para la mejora. Si los vehículos pesados en la actualización son la principal dificultad, la adición de un camión de carril de subida debe ser considerado. En caso de problemas operacionales son más amplias, cualquiera de las técnicas de mitigación discutidas en la próxima sección podría ser considerado, así como la ampliación de la planta de cuatro carriles o más.

2.3. BASES LEGALES

Normativa de organismos internacionales para la medición de IRI

Existen varias organizaciones internacionales que se encargan de regular las mediciones de rugosidad en carreteras (IRI) entre las cuales tenemos AASHTO, ASTM, FWHA y el Banco Mundial que desarrolló métodos de medición para países en desarrollo.

Sin embargo, estas agencias solo llegaron a definir más que todos los procedimientos de medición o escalas de valores en los cuales debían compararse las mediciones en función a la clasificación de la vía o tipo de superficie. Sobre la metodología de medición, la FWHA y el Banco Mundial referencian al IRI promedio como el valor absoluto representativo de la medición en una vía determinada. Por lo indicado, hago énfasis en la falta de respaldo técnico que normalice metodologías de medición como el IRI característico o la rugosidad media móvil que actualmente viene siendo aplicada en el Perú. (Montoya Goicochea, 2013)

NORMATIVA u ORGANIZACIÓN	Requerimientos de IRI según tipo de superficie			
	Descripción	Carpeta asfáltica	Concreto hidráulico	Tratamiento superficial
ASTM E1923-98	IRI obtenido en sub-lotes de 0.1 km	Presenta dos escalas de valores de IRI con descripción verbal, una para vías pavimentadas y otra para no pavimentadas.		
AASHTO PP-37-02	No especifica	No especifica		
FWHA	Promedio de los valores de IRI determinado en cada huella cada 100 metros	No especifica		
Banco Mundial	Promedio global de toda la medición	Presenta una escala de rugosidad para diferentes tipos de vías		

Tabla 31: Normativa de organizaciones para el control de IRI.

Fuente: (Montoya Goicochea, 2013)

Normativa de otros países respecto a la metodología de control del IRI

Países como Chile, España, Estados Unidos y otros han ajustado su metodología de medición del Índice de Rugosidad Internacional y sus umbrales en función a sus propios requerimientos. Ya que cada uno de ellos cuenta con condiciones locales diferentes y de esta forma aseguran que organismos o entidades estatales respalden las buenas prácticas de los procedimientos seguidos para la medición de rugosidad durante la generación de alguna controversia.

Tabla 32: Normativa de otros países respecto de la metodología de control de IRI.

PAÍS	Requerimientos de IRI según tipo de superficie			
	Metodología	Carpeta Asfáltica	Concreto hidráulico	Tratamiento superficial
Ministerio de Obras Públicas de Chile	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos de 200 mts. De secciones homogéneas (Media Móvil)	promedio de 5 secciones ≤ 2 m/km		promedio de 5 secciones ≤ 3.0 m/km
		promedio individual ≤ 2.8 m/km		promedio individual ≤ 4.0 m/km
	Recepción de Obra Nueva			
	No se indica el intervalo de medición	IRI ≤ 1.5 m/km, en 50% de los datos	IRI ≤ 2.0 m/km, en 50% de los datos	IRI ≤ 2.4 m/km, en 50% de los datos
IRI ≤ 1.9 m/km, en 85% de los datos		IRI ≤ 2.5 m/km, en 85% de los datos	IRI ≤ 2.9 m/km, en 85% de los datos	
IRI ≤ 2.3 m/km, en 99% de los datos		IRI ≤ 2.8 m/km, en 99% de los datos	IRI ≤ 3.4 m/km, en 99% de los datos	
Ministerio de Fomento de España	IRI obtenido en tramos de 100 mts.	IRI < 1.5 m/km, en 50% de las secciones del proyecto		
		IRI < 2 m/km, en 80% de las secciones del proyecto		
		IRI < 2.5 m/km, en 100% de las secciones del proyecto		
Estados Unidos, WisDOT	IRI obtenido en tramos de 1.609 km (1 milla)	IRI (m/km)	Tiempo	
		<1.1	Pav. nuevo	
		<1.17	1 año	
		<1.29	2 años	
		<1.33	3 años	
		<1.37	4 años	
Canadá	IRI obtenido en tramos de 100 mts.	IRI < 1.2 m/km, en 70% de los datos		
		IRI < 1.4 m/km, en 100% de los datos		
Suecia	IRI obtenido en tramos de 100 mts.	IRI ≤ 1.4 m/km		
	IRI obtenido en tramos de 20 mts.	IRI ≤ 2.4 m/km		
Ministerio de Obras		IRI no mayor a 3.0 m/km		

Públicas de El Salvador	PARA CAMINOS RURALES: IRI obtenido en tramos de 100 mts.			
	PARA CAMINOS INTERESTATALES: IRI obtenido en tramos de 100 mts.	IRI no mayor a 2.0 m/km	IRI no mayor a 2.5 m/km	
SIECA 2004	IRI obtenido en tramos de 100 mts.			
CR - 2002	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con un intervalo de medición de 200 m	promedio de 5 secciones ≤ 2.0 m/km		
		promedio individual ≤ 3.0 m/km		
Eslovenia	Carretera de alto tránsito			
	IRI obtenido en tramos de 20 mts.	$2.0 \leq \text{IRI} \leq 2.6$ m/km		
	IRI obtenido en tramos de 100 mts.	$1.2 \leq \text{IRI} \leq 1.8$ m/km		
	Carretera de bajo tránsito			
	IRI obtenido en tramos de 20 mts.	$4.0 \leq \text{IRI} \leq 4.6$ m/km		
	IRI obtenido en tramos de 100 mts.	$3.0 \leq \text{IRI} \leq 3.8$ m/km		
Portugal	No se indica el intervalo de medición	IRI ≤ 1.5 m/km, en 50% de los datos	IRI ≤ 2.0 m/km, en 50% de los datos	
		IRI ≤ 2.5 m/km, en 80% de los datos	IRI ≤ 2.5 m/km, en 75% de los datos	
		IRI ≤ 3.0 m/km, en 90% de los datos	IRI ≤ 3.0 m/km, en 100% de los datos	

Fuente: (Programa de infraestructura del transporte, 2014)

2.4. DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES

2.4.1. EQUIPO MERLIN

El MERLIN es un equipo de diseño simple. La Figura 7 presenta un esquema ilustrativo del instrumento. Consta de un marco formado por dos elementos verticales y uno horizontal. Para facilidad de desplazamiento y operación el elemento vertical delantero es una rueda, mientras que el trasero tiene adosados lateralmente dos soportes inclinados, uno en el lado derecho para fijar el equipo sobre el suelo durante los ensayos y otro en el lado izquierdo para descansar el equipo. El elemento horizontal se proyecta, hacia la parte trasera, con 2 manijas

que permiten levantar y movilizar el equipo, haciéndolo rodar sobre la rueda en forma similar a una carretilla.

Aproximadamente en la parte central del elemento horizontal, se proyecta hacia abajo una barra vertical que no llega al piso, en cuyo extremo inferior pivotea un brazo móvil.

El extremo inferior del brazo móvil está en contacto directo con el piso, mediante un patín empernado y ajustable, el cual se adecua a las imperfecciones del terreno, mientras que el extremo superior termina en un puntero o indicador que se desliza sobre el borde de un tablero, de acuerdo a la posición que adopta el extremo inferior del patín móvil al entrar en contacto con el pavimento.

La relación de brazos entre los segmentos extremo inferior del patín móvil-pivote y pivote-puntero es 1 a 10, de manera tal que un movimiento vertical de 1 mm, en el extremo inferior del patín móvil, produce un desplazamiento de 1 cm del puntero. Para registrar los movimientos del puntero, se utiliza una escala gráfica con 50 divisiones, de 5 mm de espesor cada una, que va adherida en el borde del tablero sobre el cuál se desliza el puntero

2.4.2. FORMATO DE CONTEO DE TRÁFICO

Para el conteo de tráfico se utilizó el formato de conteo de tráfico, el cual está distribuido de acuerdo a los tipos de vehículos y la hora de registro de dichos vehículos.

2.5. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

RUGOSIDAD

Rugosidad es la desviación de una determinada superficie de pavimento respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo y la calidad al manejar (American Society for Testing and Materials, 1995).

Índice de rugosidad internacional

El IRI representa el efecto sobre el vehículo del usuario del camino que tienen las desviaciones de la superficie del pavimento (causa) respecto a una superficie

plana teórica con dimensiones suficientes para afectar la dinámica del vehículo y la calidad al manejar.

VELOCIDAD DE OPERACIÓN

La velocidad de operación es la velocidad media estimada para cada tipo de vehículo en un camino particular, una vez que se realicen ajustes para la congestión y otras características de la carretera. La velocidad de operación difiere sustancialmente de la velocidad indicada, que se define como el máximo 'letrero' velocidad que los vehículos pueden viajar legalmente.

COSTO DE OPERACIÓN

Son los costos que se producen cotidianamente por la circulación de los vehículos por dicho camino. Siendo los principales los costos por combustibles, lubricantes, llantas, reparación y refracciones, operador, depreciación y reposición de vehículos, intereses, seguros y tiempo de traslado de las mercancías.

NIVEL DE SERVICIO

El concepto de nivel de servicio utiliza medidas cualitativas que caracterizan las condiciones operacionales dentro de una secuencia de tráfico y su percepción por parte de los conductores y pasajeros. Las descripciones de cada uno de los niveles de servicio caracterizan a estas condiciones en términos de factores tales como la velocidad y el tiempo de viaje, el de la libertad de maniobra, interrupciones del tráfico, y el confort y la comodidad. Seis niveles de servicio se definen para cada tipo de servicio para los procedimientos de análisis que están disponibles. Se designan mediante letras, de la A, a la F, con los a representar las mejores condiciones de funcionamiento y los F Los peores. Cada nivel de servicio representa una amplia gama de condiciones de funcionamiento. (Transportation Research Board, 1998)

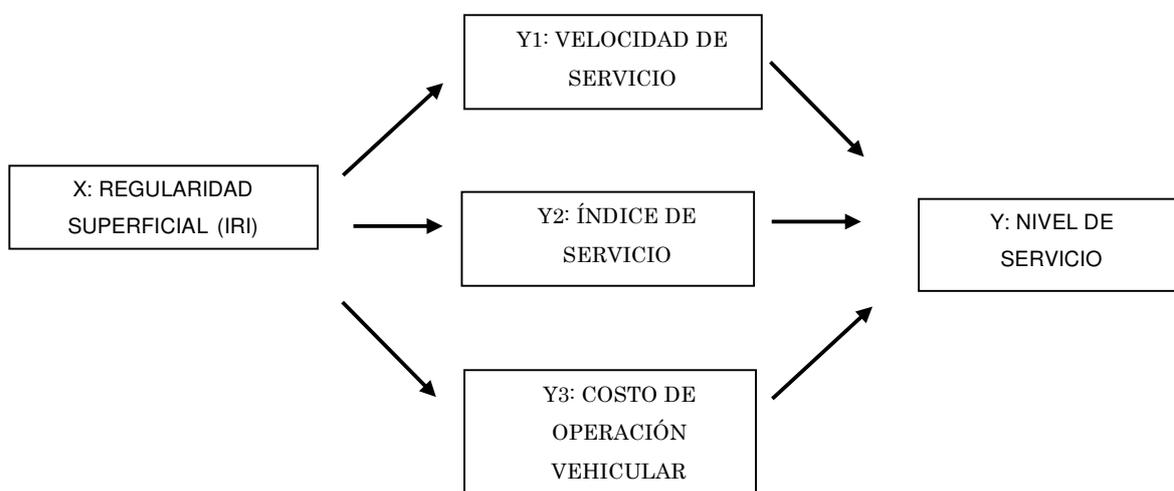
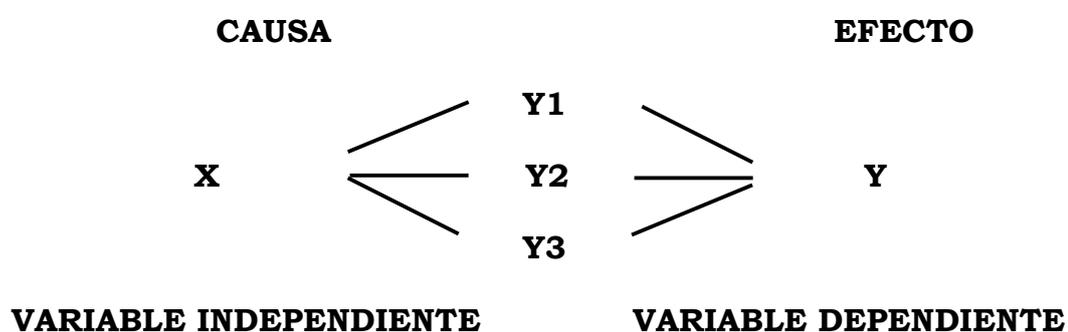
CAPITULO III:
METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Se realiza la relación entre las variables, observando el comportamiento de una para predecir el comportamiento de la otra además de lograr resultados específicos expresados de manera No Experimental - Correlacional siguiendo un enfoque Transversal de acuerdo a las características de información empleada.

EL ESQUEMA QUE CORRESPONDE A ESTE DISEÑO ES:



3.2. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación por la naturaleza del estudio es aplicada, ya que, se trata de emplear los conocimientos desarrollados por el Banco mundial, la cual propone un estándar estadístico de la rugosidad que sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino, denominado

Índice de rugosidad internacional, conocido como IRI (International Roughness Index)

El nivel de investigación es explicativo, porque trata de observar el efecto del Índice de Regularidad Internacional en el Nivel de Servicio.

3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 33: Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL		
		DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS
VI: REGULARIDAD SUPERFICIAL (IRI)	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.	Índice de Regularidad Internacional	m/km , mm/m o pul/milla	MERLIN(Equipo de medición de rugosidad)
VD: NIVEL DE SERVICIO	Medida de la calidad que ofrece la vía al usuario. Estas condiciones se describen en términos de factores tales como la velocidad y el tiempo de recorrido, la libertad de realizar maniobras, la comodidad, la conveniencia y la seguridad vial.	Nivel de Servicio Velocidad de Servicio Índice de Servicio Costos de Operación Vehicular	A, B, C, D, E, F Km/h	Formatos para el conteo de tráfico HDM (Software)

3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LOS DATOS

Se recolectó información de diversas fuentes digitales o impresas, para el desarrollo del marco teórico.

Para el cálculo de índice de rugosidad, se realizó el ensayo con el equipo MERLIN, se tomaron los datos cada 2 m, de acuerdo al procedimiento descrito en el marco teórico. Tomando el tramo de 10.46 km de la carretera Chupuro – Lapa-

También se realizó el conteo de tráfico para la vía en estudio, para lo cual se tomaron los datos durante 7 días, de acuerdo a la recomendación manual de Ministerios de Transportes, haciendo uso del formato de conteo de tráfico descrito.

3.4.1. POBLACIÓN

Para esta investigación, la población está constituida por todas las vías afirmadas de la región Junín.

3.4.2. MUESTRA

Para determinar la muestra se utilizó el muestreo No Probabilístico o Dirigido, ya que la elección de la vía depende de las características de la investigación y no de la probabilidad, utilizando como criterio, las irregularidades que presenta la vía.

3.5. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Obtenidos los datos del ensayo MERLIN, se procederá a realizar el cálculo del índice de rugosidad internación en la escala de MERLIN para lo cual nos apoyamos en el Microsoft Excel, para tramos de 200 m.

Teniendo los Índices de Rugosidad Internacional para cada tramo de carretera se calculará, el IRI promedio y el IRIc que nos indica el Manual de carreteras – Conservación vial.

Para el caculo de la velocidad de operación y los costos de operación para los cuatro tipos de vehículos que transitan dicha vía, se tomó como referencia la

metodología descrita en el Manual de Análisis de costo beneficio de carreteras, presentado por el Gobierno de Queensland y descrito en las bases teóricas.

Con respecto al nivel de servicio se optó por la metodología del Manual de capacidad de carreteras – reporte especial 209.

CAPITULO IV:
RESULTADOS

4. RESULTADOS

4.1. ÍNDICE DE RUGOSIDAD

El Índice de rugosidad como se mencionó anteriormente se determinó mediante el ensayo MERLIN, tomando tramos de 200 m para 10 km de carretera.

Obteniendo como resultados:

<i>Progresivas</i>			<i>IRI</i>
0+000	-	0+200	9.01
0+200	-	0+400	8.11
0+400	-	0+600	9.84
0+600	-	0+800	9.57
0+800	-	1+000	9.79
1+000	-	1+200	9.82
1+200	-	1+400	9.73
1+400	-	1+600	8.81
1+600	-	1+800	8.16
1+800	-	2+000	9.30
2+000	-	2+200	9.02
2+200	-	2+400	9.13
2+400	-	2+600	8.81
2+600	-	2+800	9.17
2+800	-	3+000	8.66
3+000	-	3+200	9.21
3+200	-	3+400	8.92
3+400	-	3+600	8.68
3+600	-	3+800	8.96
3+800	-	4+000	8.74
4+000	-	4+200	9.26
4+200	-	4+400	9.12
4+400	-	4+600	9.03
4+600	-	4+800	9.26
4+800	-	5+000	8.92
5+000	-	5+200	9.07
5+200	-	5+400	9.26
5+400	-	5+600	8.93
5+600	-	5+800	8.88
5+800	-	6+000	9.15
6+000	-	6+200	9.24
6+200	-	6+400	9.17
6+400	-	6+600	9.16
6+600	-	6+800	9.25
6+800	-	7+000	9.35
7+000	-	7+200	8.98
7+200	-	7+400	9.22
7+400	-	7+600	9.12

7+600	-	7+800	9.20
7+800	-	8+000	9.14
8+000	-	8+200	9.26
8+200	-	8+400	9.00
8+400	-	8+600	9.10
8+600	-	8+800	9.15
8+800	-	9+000	8.63
9+000	-	9+200	9.18
9+200	-	9+400	8.88
9+400	-	9+600	8.99
9+600	-	9+800	9.03
9+800	-	10+000	8.69
Promedio IRI			9.08

Tabla 34: Índice de rugosidad internacional por progresiva y promedio.

Fuente: Elaboración propia.

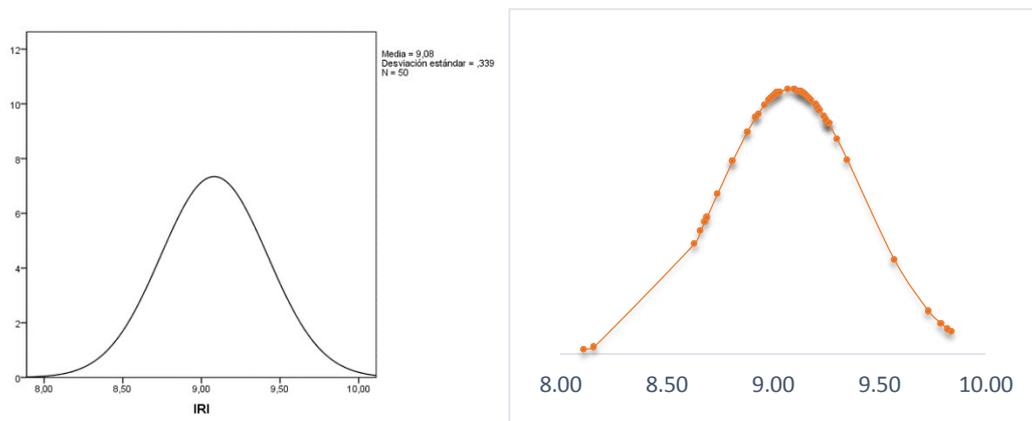


Figura 16: Distribución de los Índices de Rugosidad Internacional obtenidos con SPSS y Excel respectivamente.

Donde la desviación estándar es:

Desv. Est.	0.34
------------	------

El índice de regularidad internacional característico (IRI_c), a la confiabilidad de 70%

IRI_c	9.26
------------------------	-------------

Este índice de rugosidad característico es superior al límite que nos indica el Manual de carreteras – Conservación vial que es de 8.

4.2. VELOCIDAD DE OPERACIÓN

La velocidad de operación se calculó con la metodología Manual de Análisis de Costo Beneficio en proyectos de carretera. En donde se obtienen las velocidades para los tipos de vehículos que circulan por la carretera en estudio. Los cuales se muestran en la tabla siguiente, considerando la transformación a mph, ya que se usaran estas velocidades para determinar el nivel de servicio.

En las siguientes hojas de cálculo se presenta la metodología descrita en la sección 2.2.4 para la velocidad de operación de vehículos privados.

	2%	<4%	<6%	<8%	<10%
Porcentaje de pendiente	4.8	6.4	13.4	5.6	0.0
Factor	77	76	72	64	55

$$Free\ speed\ (VT) = 1 / \sum_i (Grade\%_i / Free\ Speed\ Array\ (VT, Grade_i, HorizAlign, MRS))$$

Free speed (VT) = 2.38

	2%	<4%	<6%	<8%	<10%
Porcentaje de pendiente	4.8	6.4	13.4	5.6	0.0
Factor	0.99	0.99	0.99	1	1

$$FSRG_i = \sum_j Roughness\ Array\ (VT, Grade_i, HorizAlign, MRS) \times Grade\%$$

FSRG1 = 29.95

	2%	<4%	<6%	<8%	<10%
Porcentaje de pendiente	4.8	6.4	13.4	5.6	0.0
Factor	0.79	0.8	0.83	0.88	0.92

FSRG2 = 24.96

$NRM = 26.49 \times IRI - 1.27$ **CNRM = 244** 244.002828 9.26

NRMA = 250.00

NRMA1 = 110.00

$$PCSpdF = \max \left\{ \begin{array}{l} FSRG1 - (FSRG1 - FSRG2) \times \frac{(CNRM - NRMA1)}{(NRMA - NRMA1)} \\ FSRG2 \end{array} \right.$$

PCSpdF = 25.18

Vehicle type	Road type	Straight grad 0-2%	Straight grad 4%	Straight grad 6%	Straight grad 8%	Straight grad 10%	Curvy grad 0-2%	Curvy grad 4%	Curvy grad 6%	Curvy grad 8%	Curvy grad 10%	V/curvy grad 0-2%	V/curvy grad 4%	V/curvy grad 6%	V/curvy grad 8%	V/curvy grad 10%
Cars - private	≤ 4.5 m	83	82	76	66	56	77	76	72	64	55	69	68	66	60	53
Cars - commercial	≤ 4.5 m	82	79.3	72	61.7	52	75	73	68	59.7	51	67	65.3	62.3	56.3	49.3
Non-Articulated	≤ 4.5 m	82.4	68.8	55.6	44.6	36	73	63.4	53.2	43.4	35.8	64.2	57.6	49.8	42.2	35.6
Buses	≤ 4.5 m	86	72	57	45	37	77	67	55	45	37	67	61	53	44	36
Articulated	≤ 4.5 m	86	49	39	32	24	71	45	38	32	24	59	41	36	31	24
B-double	≤ 4.5 m	88	38	27	20	16	72	35	27	19	16	59	32	26	19	16
Road train 1	≤ 4.5 m	88	38	27	20	16	72	35	27	19	16	59	32	26	19	16
Road train 2	≤ 4.5 m	88	38	27	20	16	72	35	27	19	16	59	32	26	19	16
Cars - private	> 4.5 m	105	102	88	72	59	90	89	81	68	57	75	74	71	63	55
Cars - commercial	> 4.5 m	99.7	95	81.3	66.3	54.3	85.7	83.3	75	63	52.7	72	70.3	66.3	58.7	51
Non-Articulated	> 4.5 m	93.8	74.2	58	45.4	36.2	79.8	67.2	55	44.2	36	72.2	60.2	51.4	42.8	35.8
Buses	> 4.5 m	100	78	59	46	37	85	71	57	45	37	70	63	54	44	36
Articulated	> 4.5 m	100	52	40	32	24	75	47	39	32	24	60	42	36	31	24
B-double	> 4.5 m	100	40	28	20	16	75	36	27	19	16	60	33	26	19	16
Road train 1	> 4.5 m	100	40	28	20	16	75	36	27	19	16	60	33	26	19	16
Road train 2	> 4.5 m	100	40	28	20	16	75	36	27	19	16	60	33	26	19	16
Cars - private	Freeway	110	106	90	72	59	93	90	82	69	58	76	75	71	63	55
Cars - commercial	Freeway	105	99.3	83.3	66.3	54.3	88.7	84.7	76	63.7	53.3	73	71.3	66.7	58.7	51
Non-Articulated	Freeway	99	77.2	58.8	45.4	36.2	82	68.4	55.6	44.2	36	68.6	60.8	51.6	42.8	35.8
Buses	Freeway	110	82	60	46	37	89	73	58	46	37	72	64	54	44	37
Articulated	Freeway	106	53	40	32	24	77	47	39	32	24	60	42	36	31	24
B-double	Freeway	105	41	28	20	16	76	36	27	19	16	60	33	26	19	16
Road train 1	Freeway	105	41	28	20	16	76	36	27	19	16	60	33	26	19	16
Road train 2	Freeway	105	41	28	20	16	76	36	27	19	16	60	33	26	19	16

General terrain description	Percentage of each grade				
	Grade factor 1 (<2%)	Grade factor 2 (<4%)	Grade factor 3 (<6%)	Grade factor 4 (<8%)	Grade factor 5 (<10%)
Level or flat terrain	90	10	0	0	0
Rolling or undulating	50	30	20	0	0
Mountainous terrain	30	30	20	20	0

$$\text{Corr Free Speed}(VT) = \text{PCSpdF} \times \text{Free Speed}(VT)$$

Corr Free Speed(VT) = 59.92 km/h

$$\text{OS}(VT) = \text{SPVCR1} + (\text{CorrFreeSpeed}(VT) - \text{SPVCR1}) \times \left(\frac{1 - \text{VCR}}{1 - \text{VCRSPL}} \right)$$

OS (VT) = 53.56 km/h

Vehicle type	Road type	Straight					Curvy					V/curvy				
		F _{sig1}														
Cars – private	< 4.5 m	0.98	0.98	0.99	1	0.99	0.99	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1	
Cars – commercial	< 4.5 m	0.97	0.98	0.99	1	0.98	0.99	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1	
Non-Articulated	< 4.5 m	0.95	0.97	0.98	0.99	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.98	0.98	0.99	0.99	1	
Buses	< 4.5 m	0.97	0.98	0.99	1	0.98	0.99	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1	
Articulated	< 4.5 m	0.95	0.97	0.99	0.99	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1	
B-double	< 4.5 m	0.94	0.97	0.99	0.99	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1	
Road train 1	< 4.5 m	0.94	0.97	0.99	0.99	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1	
Road train 2	< 4.5 m	0.94	0.97	0.99	0.99	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1	
Cars – private	> 4.5 m	0.96	0.96	0.98	0.99	0.97	0.98	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1	
Cars – commercial	> 4.5 m	0.96	0.96	0.98	0.99	0.97	0.98	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1	
Non-Articulated	> 4.5 m	0.93	0.96	0.98	0.99	0.96	0.97	0.98	0.99	1	0.97	0.98	0.99	0.99	1	
Buses	> 4.5 m	0.95	0.98	0.99	1	0.97	0.98	0.99	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1	
Articulated	> 4.5 m	0.91	0.96	0.99	0.99	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1	
B-double	> 4.5 m	0.91	0.96	0.99	0.99	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1	
Road train 1	> 4.5 m	0.91	0.96	0.99	0.99	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1	
Road train 2	> 4.5 m	0.91	0.96	0.99	0.99	0.97	0.98	0.99	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1	

Vehicle type	Road type	Straight					Curvy					V/curvy				
		F _{sig2}														
Cars – private	< 4.5 m	0.76	0.77	0.8	0.87	0.92	0.79	0.8	0.83	0.88	0.92	0.84	0.85	0.87	0.9	0.94
Cars – commercial	< 4.5 m	0.75	0.77	0.81	0.88	0.93	0.79	0.8	0.83	0.89	0.93	0.84	0.85	0.87	0.9	0.94
Non-Articulated	< 4.5 m	0.68	0.76	0.84	0.91	0.95	0.74	0.79	0.86	0.91	0.95	0.79	0.83	0.87	0.92	0.95
Buses	< 4.5 m	0.74	0.81	0.89	0.95	0.97	0.79	0.84	0.9	0.95	0.97	0.85	0.87	0.91	0.95	0.97
Articulated	< 4.5 m	0.61	0.78	0.87	0.93	0.97	0.71	0.82	0.89	0.94	0.97	0.81	0.87	0.91	0.94	0.97
B-double	< 4.5 m	0.6	0.79	0.88	0.94	0.97	0.71	0.83	0.89	0.94	0.97	0.81	0.88	0.91	0.95	0.97
Road train 1	< 4.5 m	0.6	0.79	0.88	0.94	0.97	0.71	0.83	0.89	0.94	0.97	0.81	0.88	0.91	0.95	0.97
Road train 2	< 4.5 m	0.6	0.79	0.88	0.94	0.97	0.71	0.83	0.89	0.94	0.97	0.81	0.88	0.91	0.95	0.97
Cars – private	> 4.5 m	0.63	0.65	0.73	0.83	0.9	0.71	0.72	0.77	0.85	0.91	0.81	0.81	0.84	0.88	0.93
Cars – commercial	> 4.5 m	0.64	0.67	0.75	0.85	0.91	0.72	0.74	0.79	0.86	0.92	0.81	0.82	0.85	0.89	0.93
Non-Articulated	> 4.5 m	0.62	0.71	0.83	0.9	0.95	0.7	0.77	0.85	0.91	0.95	0.77	0.82	0.87	0.92	0.95
Buses	> 4.5 m	0.65	0.76	0.88	0.94	0.97	0.75	0.81	0.89	0.95	0.97	0.83	0.86	0.91	0.95	0.97
Articulated	> 4.5 m	0.53	0.74	0.86	0.93	0.97	0.68	0.81	0.88	0.94	0.97	0.8	0.86	0.91	0.94	0.97
B-double	> 4.5 m	0.54	0.75	0.87	0.94	0.97	0.68	0.82	0.89	0.94	0.97	0.8	0.87	0.91	0.95	0.97
Road train 1	> 4.5 m	0.54	0.75	0.87	0.94	0.97	0.68	0.82	0.89	0.94	0.97	0.8	0.87	0.91	0.95	0.97
Road train 2	> 4.5 m	0.54	0.75	0.87	0.94	0.97	0.68	0.82	0.89	0.94	0.97	0.8	0.87	0.91	0.95	0.97

De la misma manera se calcula para vehículos comerciales, camiones no articulados y buses, teniendo como resumen la tabla 27

Tabla 35: Velocidad de operación para los cuatro tipos de vehículos que transitan dicha carretera para el IRIc.

Tipo de vehículo	Velocidad de Operación	Velocidad de Operación
	OS (VT) km/h	OS (VT) mph
<i>Privado</i>	53.56	33.28
<i>Comercial</i>	51.58	32.05
<i>No Articulado</i>	45.97	28.56
<i>Buses</i>	50.75	31.54
<i>Articulado</i>	No se presenta	No se presenta
<i>B-doble</i>	No se presenta	No se presenta

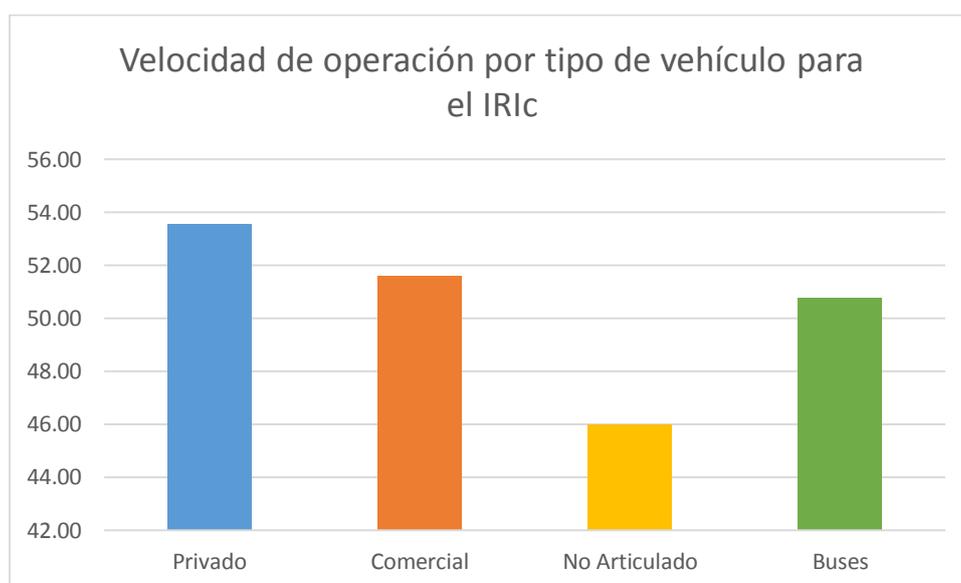


Figura 17: Velocidad de operación para los cuatro tipos de vehículos que transitan dicha carretera para el IRIc=9.26.

Se puede observar que los vehículos que presentan mayor velocidad de operación, obviamente son los vehículos particulares, como los autos y camionetas.

Se calculó la velocidad de operación para índices de rugosidad de 4, 6, 8, 10, 12 y 14; siguiendo la metodología propuesta por el gobierno de Queensland, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 36: Velocidad de operación para diferentes Índices de rugosidad y por tipo de vehículo

Tipo de vehículo	IRI					
	4	6	8	10	12	14
Privado	61.61 km/h	58.55 km/h	55.49 km/h	53.21 km/h	53.21 km/h	53.21 km/h
Comercial	59.06 km/h	56.21 km/h	53.37 km/h	51.25 km/h	51.25 km/h	51.25 km/h
No Articulado	49.89 km/h	48.40 km/h	46.90 km/h	44.13 km/h	44.13 km/h	44.13 km/h
Buses	57.10 km/h	54.69 km/h	52.27 km/h	50.48 km/h	50.48 km/h	50.48 km/h

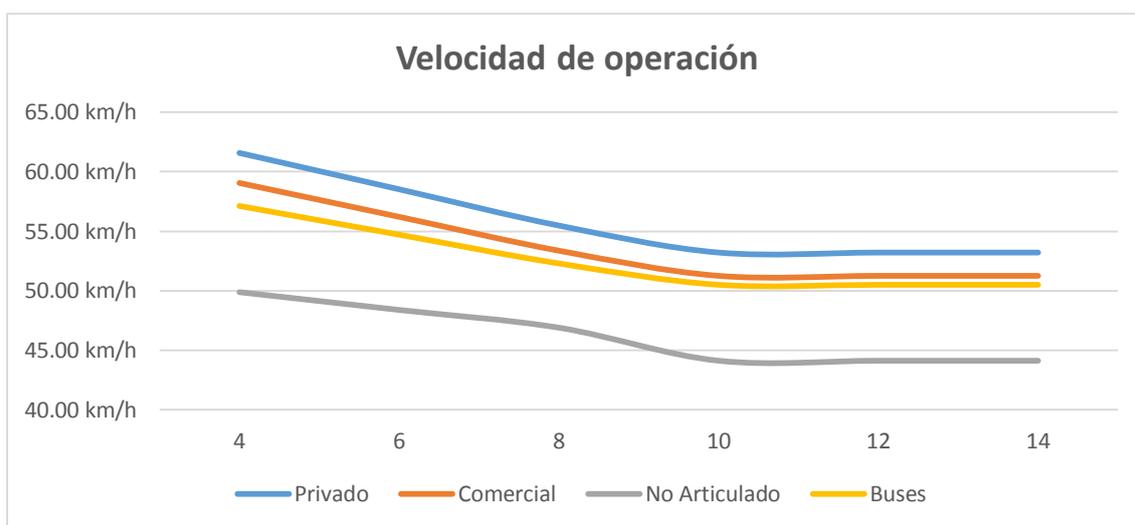


Figura 18: Velocidad de operación para diferentes Índices de rugosidad y por tipo de vehículo

4.3. COSTOS DE OPERACIÓN

Los costos de operación se calcularon con la metodología descrita en la sección 2.2.5 y se obtuvieron los siguientes resultados. Los costos de combustibles se convirtieron a centavos de dólar australiano para el uso de la metodología y luego se volvió a convertir a soles para el costo unitario de operación.

En las siguientes hojas de cálculo se presenta el cálculo para la velocidad de operación de vehículos privados.

$$Rough\ Adj(VT) = FCGRVF(VT) = FCGRVF(VT) \times GCGFAC$$

Factor de ajuste por rugosidad =	0.22285
----------------------------------	---------

Factor De gal. A litro.	Diesel	S/. 9.79	S/. 2.59	soles/litro	01/12/2016
3.79	90	S/. 10.39	S/. 2.74	soles/litro	

Diesel	101.82	centavos de dólar australiano/litro
90	108.02	centavos de dólar australiano/litro

Petrol(VT) =	108.02	c/litro
Pdies(VT) =	0	
Diesel(VT) =	101.82	
Fuelcf(VT) =	108.02	

$$Fuelc(VT) = Petrol(VT) \times (1 - Pdies(VT)) + Diesel(VT) \times Pdies(VT)$$

FCAVF =	1.071
---------	-------

$$Fuel\ Cost(VT) = Fuelcf(VT) \times BFC(VT) \times (1 + FCAVF + Grad\ Adj + Curv\ Adj + CongAdj + Rough\ Adj) \times VT$$

Fuel Cost(VT) =	68883.80	c/1000km
Fuel Cost(VT) =	68.9	c/km

ACEITES

dtopcf =	1.5
Pdies(VT) =	0
Oilcons(VT, OS) =	0.6
gear =	1.1

$$Oil(VT) = (dtopcf \times Pdies(VT) + (1 - Pdies(VT))) \times Oilcons(VT, OS) \times gear$$

Oil(VT) =	0.66	L/1000km
Oils(VT) =	522	c/L

$$OilCost(VT) = Oil(VT) \times Oils(VT) / 1000$$

OilCost(VT) =	0.34	c/km
---------------	------	------

TABLA 3

Vehicle type	Curve categories		
	Very curvy	Curvy	Straight
Cars - private	0.2	0.1	0
Cars - commercial	0.2	0.1	0
Non-Articulated	0.2	0.1	0
Buses	0.2	0.1	0
Articulated	0.2	0.1	0
B-double	0.1	0.1	0
Road train 1	0.1	0.1	0
Road train 2	0.1	0.1	0

TABLA 4

OS (VT) = 53.56

Vehicle type	Speed description fcgrvf												
	8-15km/h	16-23km/h	24-31km/h	32-39km/h	40-47km/h	48-55km/h	56-63km/h	64-71km/h	72-79km/h	80-87km/h	88-95km/h	96-103km/h	104-111km/h
Cars - private	0.023	0.060	0.067	0.070	0.077	0.087	0.100	0.103	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090
Cars - commercial	0.026	0.060	0.065	0.073	0.075	0.084	0.090	0.092	0.083	0.080	0.080	0.077	0.073
Non-Articulated	0.044	0.083	0.093	0.103	0.111	0.123	0.127	0.110	0.104	0.097	0.091	0.076	0.071
Buses	0.050	0.080	0.090	0.100	0.110	0.120	0.140	0.150	0.130	0.120	0.120	0.110	0.100
Articulated	0.033	0.097	0.113	0.127	0.143	0.160	0.177	0.193	0.187	0.170	0.160	0.147	0.133
B-double	0.050	0.100	0.120	0.140	0.160	0.170	0.190	0.200	0.200	0.220	0.190	0.180	0.170
Road train 1	0.060	0.110	0.130	0.150	0.170	0.190	0.210	0.220	0.240	0.240	0.200	0.200	0.200
Road train 2	0.060	0.120	0.140	0.150	0.170	0.200	0.230	0.270	0.220	0.260	0.230	0.230	0.210

0

TABLA 5

OS (VT) = 53.56

Vehicle type	Oil consumption factors (oilcons)													Oil costs (c/L)	Pdies
	Operating speed														
	8-15km/h	16-23km/h	24-31km/h	32-39km/h	40-47km/h	48-55km/h	56-63km/h	64-71km/h	72-79km/h	80-87km/h	88-95km/h	96-103km/h	104-111km/h		
Cars - private	0.75	0.57	0.53	0.55	0.57	0.60	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.77	522.00	0.00
Cars - commercial	0.75	0.57	0.53	0.55	0.57	0.60	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.77	511.00	0.00
Non-Articulated	1.26	0.99	0.97	0.95	0.96	0.97	0.99	1.01	1.04	1.07	1.13	1.22	1.31	488.00	0.50
Buses	1.26	0.99	0.97	0.95	0.96	0.97	0.99	1.01	1.04	1.07	1.13	1.22	1.31	488.00	0.70
Articulated	1.80	1.37	1.36	1.34	1.36	1.37	1.44	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.63	488.00	0.90
B-double	2.59	2.02	1.99	1.90	1.99	2.02	2.07	2.12	2.10	2.23	2.26	2.28	2.34	488.00	1.00
Road train 1	2.59	2.02	1.99	1.90	1.99	2.02	2.07	2.12	2.18	2.23	2.26	2.28	2.34	488.00	1.00
Road train 2	2.59	2.02	1.99	1.90	1.99	2.02	2.07	2.12	2.18	2.23	2.26	2.28	2.34	488.00	1.00

TREAD COST

NoTyre =	4
CTYRE =	121
CRETR =	66
RETN =	0
TREADN =	6.71
TREADR =	5.87

$$TreadCost = NoTyre \times \frac{(CTYRE + CRETR + RETN) \times 100}{TREADN + TREADR \times RETN} \times 1000$$

TreadCost(VT) =	7.21	c/0.001mm
-----------------	------	-----------

TyreK(VT) =	201.9
OS(VT) =	53.6
TyreWC1 =	0.00000
TyreWC2 =	0.42780

$$Tyre\ wear = TyreK(VT) + (OS(VT))^2 \times TyreWC1(VT) + OS(VT) \times TyreWC2(VT)$$

Tyre Wear (VT) =	224.81	0,001 mm/1000 km
------------------	--------	------------------

VCR =	0.387
TCONG(VT) =	1.7

$$Cong(VT) = TCONG(VT) \times VCR$$

Cong(VT) =	0.66
------------	------

	2%	<4%	<6%	<8%	<10%
Distancia	4.8	6.4	13.4	5.6	0.0
Factor	0	0.1	0.2	0.4	0.6
Factor de ajuste por pendiente =					5.56

$$Grad(VT) = \sum Gradient\ Adj\ Array(VT, Grade_i) \times Grade\%_i$$

	30km/h	50km/h	65km/h	80km/h	no curve
Prop. Curv.	0%	0%	10%	30%	60%
Cur.Des.Sp	10	15	20	15	0

Factor de ajuste por pendiente =	6.5
----------------------------------	-----

$$Curv(VT) = \sum Curvature\ Adj\ Array(VT, Design\ Speed_i) \times Curvature\%_i$$

TABLE 6

Vehicle type	No.tyre	Ctyre#	Cretr#	Retn	Treadn	Treadr	Tyre wc1	Tyre wc2	Tyre k	Tcong%
	Number of tyres (excl. Spares)	Costs of new tyres (\$)	Cost of retreads (\$)	Average number of retreads per tyre	Thickness of tread for new tyre	Thickness of tread for retreaded tyre	Formula factor 1	Formula factor 2	State of tune factor	Factor for tyre wear increase at VCR=1
Cars - private	4	121	66	0	6.71	5.07	0.00000	0.42780	201.9	1.7
Cars - commercial	4	136.33	04.67	0	7.22	6.32	0.00000	0.42780	201.9	1.7
Non-Articulated Buses	7	309.0	141.2	1.4	9.27	0.50	0.00652	0.00556	305.54	1
Articulated Buses	0	309.0	141.2	1.75	9.53	0.92	0.00015	0.00000	331.45	1
B-double	20	330.33	110.67	2.5	10.67	9.75	0.00210	0.00000	100.23	1
Road train 1	44	331	130	2.5	10.67	9.75	0.00230	0.00000	106.3	1
Road train 2	62	327	134	2.5	10.67	9.75	0.00230	0.00000	106.3	1

TABLE 7

Vehicle type	Gradient								Curve design speed (km/h)			
	<2%	<4%	<6%	<8%	<10%	30	50	65	80			
Cars - private	0	0.1	0.2	0.4	0.6	10	15	20	15			
Cars - commercial	0	0.14	0.27	0.54	0.81	10	15	20	15			
Non-Articulated	0	0.14	0.27	0.54	0.81	10	15	20	15			
Buses	0	0.15	0.3	0.6	0.9	10	15	20	15			
Articulated	0	0.15	0.3	0.6	0.9	10	15	20	15			
B-double	0	0.15	0.3	0.6	0.9	10	15	20	15			
Road train 1	0	0.15	0.3	0.6	0.9	10	15	20	15			
Road train 2	0	0.15	0.3	0.6	0.9	10	15	20	15			

TABLE 8

Preset	Gradient proportion				
	< 2%	< 4%	< 6%	< 8%	< 10%
Level/flat	90%	10%	0%	0%	0%
Rolling/undulating	50%	30%	20%	0%	0%
Mountainous	30%	30%	20%	20%	0%

Preset	Curvature proportion				
	30km/h	50km/h	65km/h	80km/h	No curve
Curvy	0%	0%	10%	30%	60%
Very curvy	0%	0%	60%	20%	20%

Factor de ajuste por rugosidad = 0.16

$$Tyres(VT) = TreadCost \times btw(VT) \times (1 + Cong(VT) + Curve(VT) + Rough(VT) + Grad(VT))$$

Tyres(VT) = 22505.49 c/1000 km
 Tyres(VT) = 22.51 c/km

Reparación y mantenimiento

RMUC = 4.5

Rugosidad 244.00

$$rscmrf(VT) = \begin{cases} 30 \leq CNRM < 50 = 1 \\ 50 \leq CNRM < 100 = 1 + \frac{(PAVIND(ST, 100) - PAVIND(ST, 50)) \cdot (CNRM - 50)}{100 - 50} \\ 100 \leq CNRM < 150 = PAVIND(ST, 100) + \frac{(PAVIND(ST, 150) - PAVIND(ST, 100)) \cdot (CNRM - 100)}{150 - 100} \\ 150 \leq CNRM < 200 = PAVIND(ST, 150) + \frac{(PAVIND(ST, 200) - PAVIND(ST, 150)) \cdot (CNRM - 150)}{200 - 150} \\ 200 \leq CNRM < 250 = PAVIND(ST, 200) + \frac{(PAVIND(ST, 250) - PAVIND(ST, 200)) \cdot (CNRM - 200)}{250 - 200} \end{cases}$$

200	244.0028283	250
2	2.440028283	2.5

rscmrf = 2.440028283

$$REPMCS(VT) = RMUC(VT) \times rscmrf(VT)$$

REPMCS = 10.98 c/km

VEHICLESS(VT) =	24410
TAX(VT) =	10.00%
CTYRE(VT) =	121
NoTyre(VT) =	4

$$ECV(VT) = VEHICLESS(VT) \times \left(\frac{100}{100 + TAX(VT)} \right) - CTYRE(VT) \times (NOTYRE(VT) + 1)$$

ECV = 23780.61

DDPN(VT) = 0.22

TABLA 9

OS (VT) = 53.56

Vehicle type	Operating speed (km/h)										
	8-16	16-24	24-32	40-48	48-56	56-64	64-72	72-80	80-88	88-96	96-104
Cars - private	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
Cars - commercial	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
Non-Articulated	0.32	0.32	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.30	0.30
Buses	0.20	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
Articulated	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
B-double	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Road train 1	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Road train 2	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

TABLA 10

Vehicle type	RMUC
Basic repairs and servicing cost (cents/km)	
Cars - private	4.5
Cars - commercial	4.6
Non-Articulated	0.6
Buses	0.6
Articulated	16.6
B-double	20.6
Road train 1	22.0
Road train 2	28.2

TABLA 11

Surface type	Pavind (NRM)				
	50	100	150	200	250
Earth/formed	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Gravel	1.5	1.57	1.65	2	2.5
Sealed/concrete	1	1.15	1.3	1.45	1.6

TABLA 12

Vehicle type	Tax	Vehicles	Ddpn	Tdi	Fleet	Ahour
	Effective sales tax % on new vehicles	New vehicle price (\$)	Basic distance depreciation rate	Basic time depreciation	Proportion of VT susceptible to fleet reduction	No. Of hours/year vehicle is available on the road
Cars - private	10%	24,410	0.22	9.50	0.00	1000
Cars - commercial	10%	29,090	0.25	9.20	0.27	1200
Non-Articulated	10%	101,450	0.28	7.40	0.80	1760
Buses	10%	101,450	0.15	7.00	0.80	2000
Articulated	10%	245,917	0.15	5.50	0.65	2833
B-double	10%	357,110	0.14	5.50	0.60	3000
Road train 1	10%	395,720	0.14	5.50	0.60	3000
Road train 2	10%	495,950	0.14	5.50	0.60	3000

Surface type	Depsrf
	Factor relating distance depreciation to road surface type
Unsurfaced	2.5
Primerseal	1.5
Sealed	1
Concrete	1

$$DSTEP(VT) = 0.001 \times 100 \times ECV(VT) \times \frac{DDPN(VT)}{100}$$

DSTDEP(VT) =	5.23
--------------	------

TDI(VT) =	9.5
FLEET(VT) =	0
AHOUR(VT) =	1000

$$TDPINT(VT) = 100 \times ECV(VT) \times \left(\frac{TDI(VT)}{100} \right) \times \frac{FLEET(VT)}{AHOUR(VT)}$$

TDPINT(VT) =	0.00
--------------	------

DEPSRF =	1.5
----------	-----

OS(VT) =	53.56
----------	-------

$$DPINCS(VT) = (DSTDEP(VT) \times DEPSRF + \frac{TDPINT(VT)}{OS(VT)})$$

DPINCS(VT) =	7.85	c/km
--------------	------	------

$$UnitVOC(VT) = Fuel + Oil + Tyre + Repairs + Depreciation$$

UnitVOC =	110.56	c/km
-----------	--------	------

UnitVOC =	2.81	soles/km
-----------	------	----------

TABLE 12

Vehicle type	Tax Effective sales tax % on new vehicles	Vehicles New vehicle price (\$)	Ddpn Basic distance depreciation rate	Tdi Basic time depreciation	fleet Proportion of VT susceptible to fleet reduction	Ahour No. Of hours/ year vehicle is available on the road
Cars – private	10%	24,410	0.22	9.50	0.00	1000
Cars – commercial	10%	29,890	0.25	9.20	0.27	1200
Non-Articulated	10%	101,450	0.20	7.40	0.80	1760
Buses	10%	101,450	0.15	7.00	0.80	2000
Articulated	10%	245,917	0.15	5.50	0.65	2833
B-double	10%	357,110	0.14	5.50	0.60	3000
Road train 1	10%	395,720	0.14	5.50	0.60	3000
Road train 2	10%	495,950	0.14	5.50	0.60	3000

La siguiente tabla muestra en resumen los costos de operación por tipo de vehículo por día en céntimos/km

Tabla 37: Costo de operación por tipo de vehículo

Tipo de vehículo	Costo de Operación	
	VOCUnit (VT) céntimos/km	VOCUnit (VT) soles/km
Privado	280.83	2.81
Comercial	320.38	3.20
No Articulado	1,043.27	10.43
Buses	1,848.52	18.49
Articulado	No se presenta	
B-doble	No se presenta	

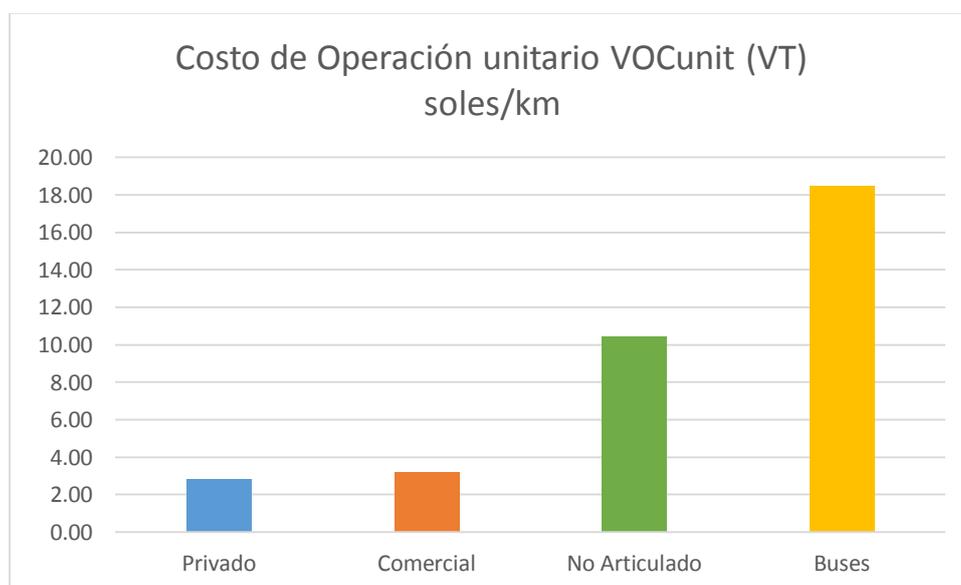


Figura 19 Costo de operación por tipo de vehículo en soles/km

En la Grafica anterior se puede notar que el costo de operación de los camiones es superior a los otros ya que estos consumen más combustibles, aceites y demás factores cuando hay cambios de pendiente.

Tabla 38: Costos de operación por km, por día, mes y año para todo el tramo y para el total de vehículos.

Tipo de vehículo	Costo de Operación					
	Día	Mes	Día	Mes	Año	Para todos los vehículos
	Soles/km	Soles/km	Tramo 35.1 km			
Privado	2.81	84.25	98.57	2,957.10	35,978.06	1,403,144.47
Comercial	3.20	96.11	112.45	3,373.60	41,045.48	246,272.89
No Articulado	10.43	312.98	366.19	10,985.64	133,658.62	668,293.08
Buses	18.49	554.56	648.83	19,464.91	236,823.10	236,823.10
						S/. 2,554,533.54

La tabla anterior nos indica que en dicho tramo de carretera, un vehículo particular o privado que transita por ahí presenta un costo de operación de S/.98.57 por día, teniendo así por mes un costo de operación de S/. 2,957.10 y al año S/.35,978.06.

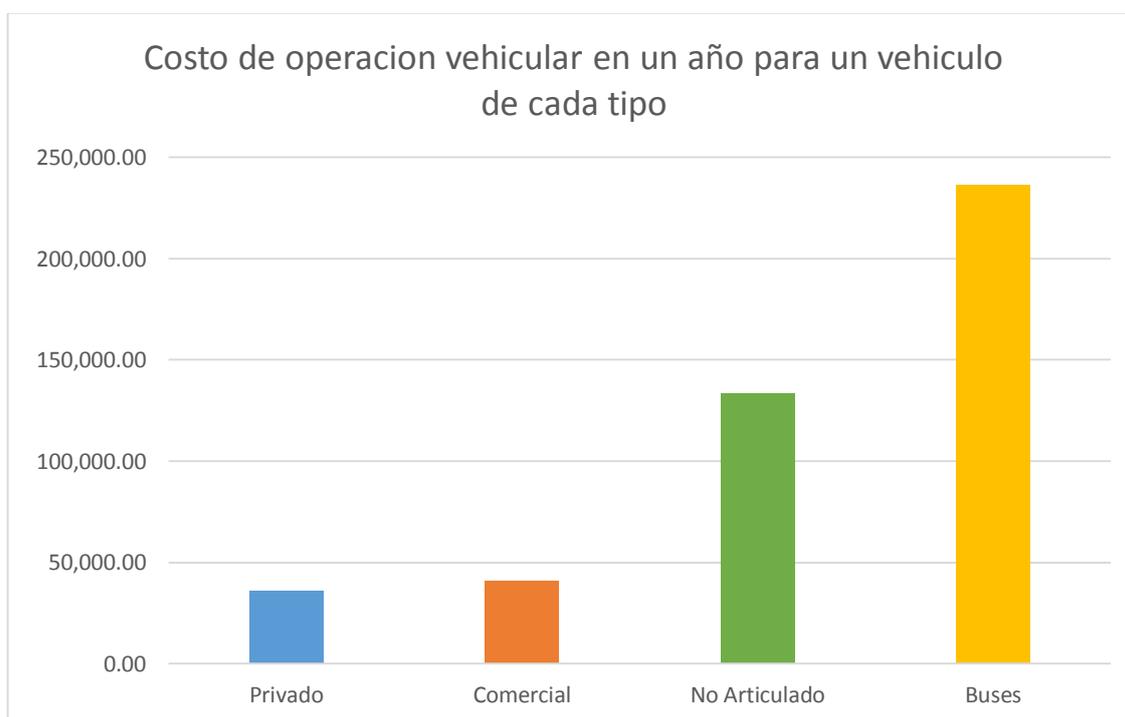


Figura 20: Costo de operación en un año por tipo de vehículo para el IRIC encontrado

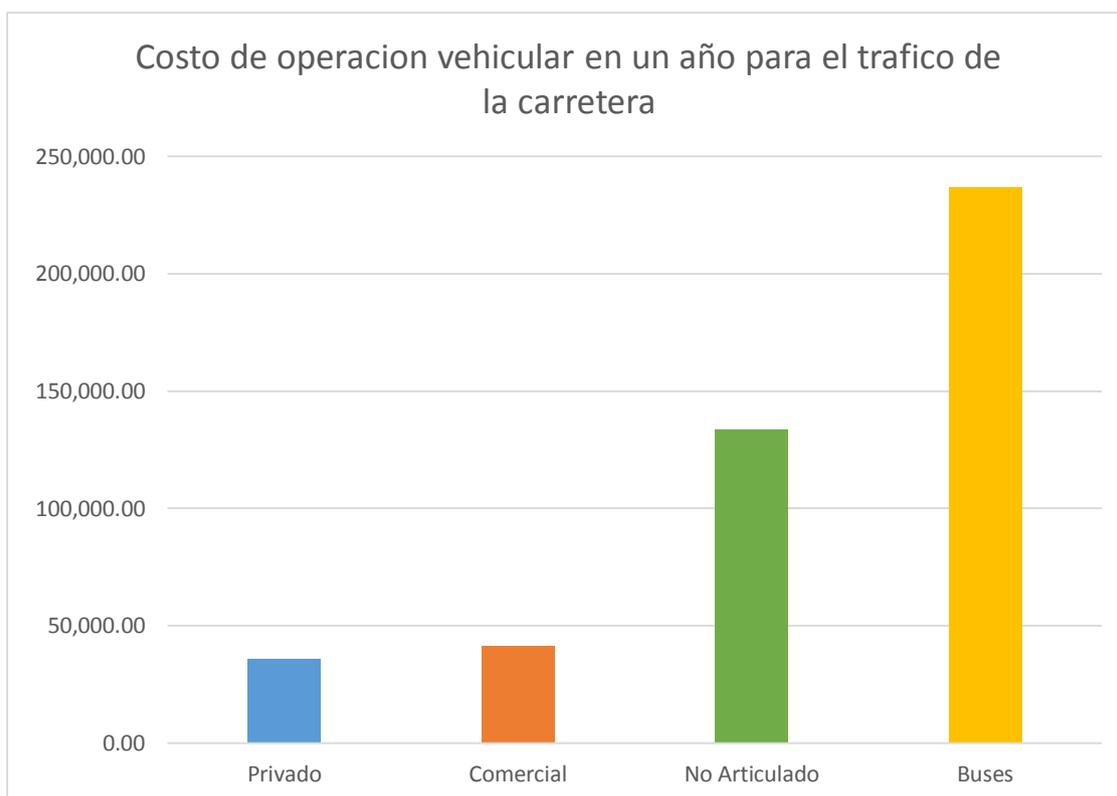


Figura 21: Costo de operación para el tráfico dado en la carretera, para un año

También se calculó el costo de operación para diferentes índices de rugosidad internacional con la misma metodología. Con lo que se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 39: Costos por índice de rugosidad internacional para los tipos de vehículos que transitan la vía.

Tipo de vehículo	IRI					
	4	6	8	10	12	14
Privado	S/. 2.50	S/. 2.64	S/. 2.72	S/. 2.87	S/. 3.01	S/. 3.15
Comercial	S/. 2.85	S/. 3.04	S/. 3.13	S/. 3.26	S/. 3.41	S/. 3.68
No Articulado	S/. 9.28	S/. 9.79	S/. 10.13	S/. 10.65	S/. 11.14	S/. 11.64
Buses	S/. 16.51	S/. 17.20	S/. 17.80	S/. 18.91	S/. 19.94	S/. 20.97

Visto de mejor manera en la siguiente figura, donde se ve el incremento del costo de operación por el índice de rugosidad internacional.

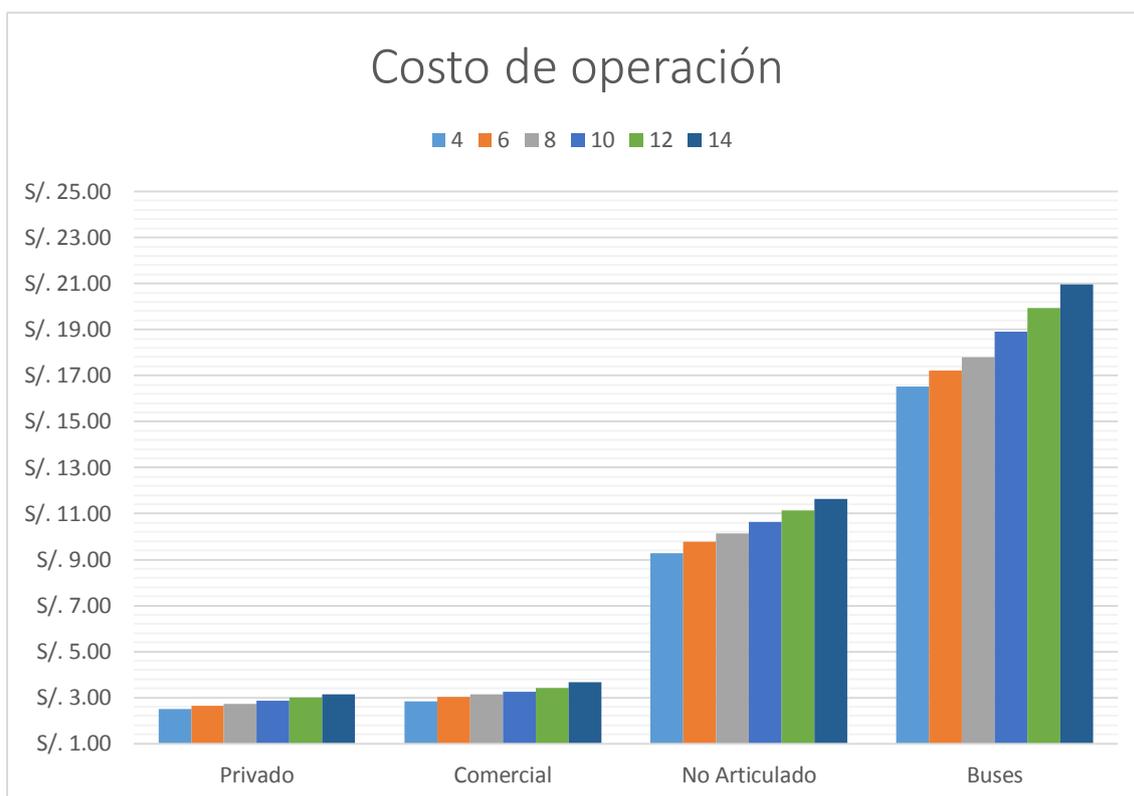


Figura 22: Costo de operación para el tráfico dado en la carretera, para un año

En el siguiente cuadro podemos observar los costos de operación para el tráfico calculado y la sumatoria, que es el costo de operación total por año para los diferentes índices de rugosidad. La tabla indica un costo mayor en el costo de operación de los vehículos privados, esto debido a que transitan más vehículos privados por esta carretera.

Tabla 40: Costos de operación anual por el tráfico y por índices de rugosidad internacional

Tipo de vehículo	IRI					
	4	6	8	10	12	14
Privado	S/. 1,249,907.75	S/. 1,316,712.50	S/. 1,361,383.33	S/. 1,434,879.82	S/. 1,503,233.22	S/. 1,575,607.24
Comercial	S/. 218,892.52	S/. 233,310.21	S/. 240,691.41	S/. 250,477.19	S/. 261,945.05	S/. 283,028.49
No Articulado	S/. 594,671.23	S/. 626,873.42	S/. 648,854.87	S/. 682,029.80	S/. 713,691.92	S/. 745,354.04
Buses	S/. 211,500.16	S/. 220,406.81	S/. 228,024.49	S/. 242,238.55	S/. 255,428.96	S/. 268,619.36
	S/. 2,274,975.66	S/. 2,397,308.93	S/. 2,478,962.10	S/. 2,609,635.36	S/. 2,734,311.15	S/. 2,872,623.13

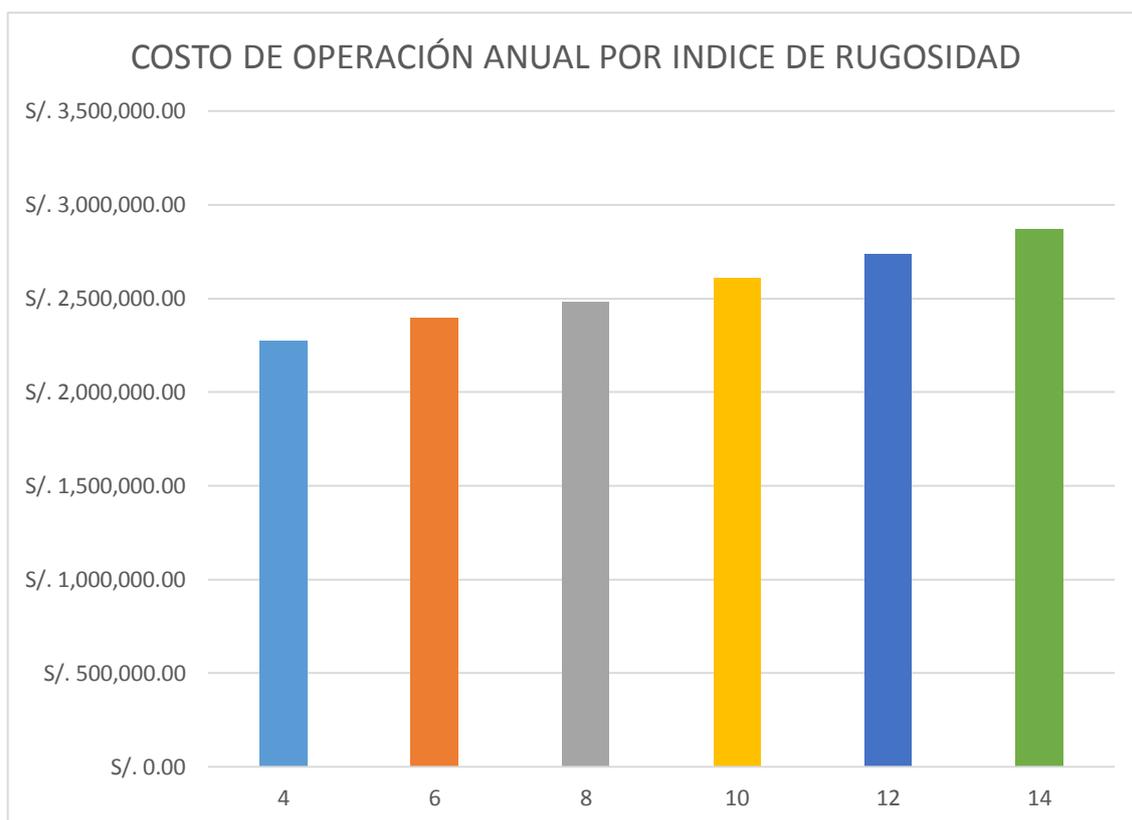


Figura 23: Costos de operación total por año para los índices de rugosidad indicados.

4.4. NIVEL DE SERVICIO

Para los cálculos se convirtió las unidades del sistema internacional al sistema inglés como se puede observar en las siguientes tablas.

4.4.1. ANÁLISIS OPERATIVO DE SEGMENTOS DE TERRENO EN GENERAL

Para el tramo de pendiente mínima de 0% a 2% que tiene una longitud de 2.4 km, lo que equivale aproximadamente a 3 millas. Para los cálculos se convirtió las unidades del sistema internacional al sistema inglés como se puede observar en las siguientes tablas.

Tabla 41: tabla del análisis operativo para la sección con pendiente menor a 2%.

1. Datos geométricos												
_____							0 ft Vel. de diseño <u>50</u> mph					
_____							Terrain R <u>3.00</u> mi					
-----							18 ft % de zonas de no pase <u>80</u>					
_____							0 ft					
2. Datos de tráfico												
Vol. total, ambas direc. <u>15</u> vph							Reparto direc. : <u>60/40</u>					
Flujo = Volumen ÷ PHF							Composición veh. <u>10</u> %T <u>0</u> %RV <u>2</u> %B					
<u>15.4</u> = <u>12</u> ÷ <u>0.78</u>							PHF : <u>0.78</u>					
3. Análisis del nivel de servicio												
$SF = 2800 \times (v/c)_i \times f_d \times f_w \times f_{HV}$							$f_{HV} = 1/[1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1) + P_B(E_B - 1)]$					
<i>L</i>	<i>S</i>	$SF = 2800$	$\times (v/c)$	$\times f_d$	$\times f_w$	$\times f_{HV}$	P_T	E_T	P_R	E_R	P_B	E_B
			Tabla 8-1	Tabla 8-4	Tabla 8-5			Tab 8-6		Tab 8-6		Tab 8-6
A	15	2800	0.02	0.94	0.49	0.60	0.10	7	0	5	0.02	5.70
B	78.2	2800	0.12	0.94	0.49	0.51	0.10	10	0	5.2	0.02	6.00
C	130	2800	0.20	0.94	0.49	0.51	0.10	10	0	5.2	0.02	6.0
D	218	2800	0.37	0.94	0.49	0.46	0.10	12	0	5.2	0.02	6.50
E	636	2800	0.80	0.94	0.66	0.46	0.10	12	0	5.2	0.02	6.50
F												
4. Comentarios												
Flujo <u>15.4</u> vph							LOS = <u>B</u>					
Vel. Op. <u>33</u> mph							LOS = <u>F</u>					

4.4.2. ANÁLISIS OPERATIVO DE PENDIENTES ESPECÍFICAS

Este análisis se realizó para los tramos con pendientes de 4% que tiene una distancia de 6.4 km lo que equivale aproximadamente a 4 millas y 5% que tiene una distancia de 4.8 km lo que equivale aproximadamente a 3 milla. Con pendiente de 6%, 13.4 km lo cual corresponde a 8.3 millas de los cuales solo se analizara solo 4 millas, con pendiente de 7% 5.6 km lo que corresponde aproximadamente a 3.5 millas.

Tabla 42: análisis operativo para la sección con pendiente de 4%

1. Datos geométricos												
					0 ft	Vel. de diseño	50	mph				
					18 ft	Pendiente	4	%	4	mi		
						% de zonas de no pase	80					
					0 ft							
2. Datos de tráfico												
Vol. total, ambas direc.					15	Reparto direccion		60/40				
Flujo = Volumen ÷ PHF					Composición veh. 10 %T 0 %RV 2 %B							
15.38 = 12 ÷ 0.78					PHF : 0.78							
3. Factores de ajuste f_B y f_{HV}												
$f_g = 1/[1 + P_p I_p]$						$f_{HV} = 1/[1 + P_{HV}(E_{HV} - 1)]$						
$I_p = 0.02(E - E_o)$						$E_{HV} = 1 + (0.25 + P_{T/HV})(E - 1)$						
Veloc. (mph)	P_p	I_p	E Tab 8-9	E_o Tab 8-9	f_g	P_{HV}	E_{HV}	$P_{T/HV}$ (P_T/P_{HV})	E Tab 8-9	f_{HV}		
55			-									
52.5			-									
50	0.88	0.99	51	1.6	0.53	0.12	55.2	0.8333333	51	0.14		
45	0.88	0.43	22.8	1.4	0.73	0.12	24.6	0.8333333	22.8	0.26		
40	0.88	0.25	13.8	1.3	0.82	0.12	14.9	0.8333333	13.8	0.38		
30	0.88	0.12	7.4	1.3	0.90	0.12	7.93	0.8333333	7.4	0.55		
4. Flujo de servicio												
Veloc. (mph)	SF	2800	x	v/c	x	fg	x	fw	x	fg	x	fHV
				Tabla 8-7		Tabla 8-8		Tabla 8-5				
55	A	0		2800	0.13	0.87		0.49				
52.5		0		2800	0.27	0.87		0.49		0.00		0.00
50	B	41		2800	0.47	0.87		0.49		0.53		0.14
45	C	190		2800	0.83	0.87		0.49		0.73		0.26
40	D	372		2800	1.00	0.87		0.49		0.82		0.38
30		0		2800	0.00	0.87		0.66		0.90		0.55
5. Comentarios												
Flujo					15.4	vph		LOS = B				
Vel. Op.					33	mph		LOS = E				

Tabla 44: análisis operativo para la sección con pendiente de 6%:

2. Datos de tráfico										
Vol. total, ambas direc. <u>15</u> vph Reparto direccion <u>60/40</u>										
Flujo = Volumen ÷ PHF Composición veh. <u>10</u> %T <u>0</u> %RV <u>2</u> %B										
<u>15.38</u> = <u>12</u> ÷ <u>0.78</u> PHF : <u>0.78</u>										
3. Factores de ajuste f_B y f_{HV}										
$f_g = 1/[1 + P_p I_p]$						$f_{HV} = 1/[1 + P_{HV}(E_{HV} - 1)]$				
$I_p = 0.02(E - E_o)$						$E_{HV} = 1 + (0.25 + P_{T/HV})(E - 1)$				
Veloc. (mph)	P_p	I_p	E Tab 8-9	E_o Tab 8-9	f_g	P_{HV}	E_{HV}	$P_{T/HV}$ (P_T/P_{HV})	E Tab 8-9	f_{HV}
55										
52.5										
50										
45	0.88	1.77	90	1.4	0.39	0.12	97.4	0.833	90	0.08
40	0.88	0.87	45	1.3	0.56	0.12	48.7	0.833	45	0.15
30	0.88	0.34	18.1	1.3	0.77	0.12	19.5	0.833	18.1	0.31
4. Flujo de servicio										
Veloc. (mph)	SF		2800 x v/c x		fg	fw x		fg	fHV	
			Tabla 8-7		Tabla 8-8	Tabla 8-5				
55	A									
52.5										
50	B									
45	C	22	2800	0.59	0.87	0.49		0.39	0.08	
40	D	83	2800	0.81	0.87	0.49		0.56	0.15	
30		382	2800	0.98	0.87	0.66		0.77	0.31	
5. Comentarios										
Flujo <u>15.4</u> vph LOS = <u>C</u>										
Vel. Op. <u>33</u> mph LOS = <u>E</u>										

Tabla 45: análisis operativo para la sección con pendiente de 7%:

1. Datos geométricos														
_____			0 ft	Veloc. de diseño	50 mph									
-----			18 ft	Pendiente	7 %		4 mi							
_____				% de zonas de no pase	80									
_____			0 ft											
2. Datos de tráfico														
Vol. total, ambas direc.			15 vph		Reparto direcciones		60/40							
Flujo = Volumen ÷ PHF					Composición veh.		10 %T 0 %RV 2 %B							
15.38 = 12 ÷ 0.78					PHF :		0.78							
3. Factores de ajuste f_B y f_{HV}														
$f_g = 1/[1 + P_p I_p]$						$f_{HV} = 1/[1 + P_{HV}(E_{HV} - 1)]$								
$I_p = 0.02(E - E_o)$						$E_{HV} = 1 + (0.25 + P_{T/HV})(E - 1)$								
Veloc. (mph)	P_p	I_p	E Tab 8-9	E_o Tab 8-9	f_g	P_{HV}	E_{HV}	$P_{T/HV}$ (P_T/P_{HV})	E Tab 8-9	f_{HV}				
55														
52.5														
50														
45														
40														
30	0.88	0.53	28	1.3	0.68	0.12	30.3	0.833	28	0.23				
4. Flujo de servicio														
Veloc. (mph)	SF		2800	x	v/c	x	f_g	x	f_w	x	f_g	x	f_{HV}	
			Tabla 8-7				Tabla 8-8		Tabla 8-5					
55	A													
52.5														
50	B													
45	C													
40	D													
30			217				0.88		0.87		0.66		0.68	0.23
5. Comentarios														
Flujo			15.4 vph		LOS =		E							
Vel. Op.			33 mph		LOS =		E							

Como se observa en las tablas anteriores si consideramos el flujo de tráfico se obtiene un nivel de servicio B, C, y E, dado que el tráfico es mínimo, lo cual no representa las condiciones de la vía. Pero si consideramos la velocidad para determinar el nivel de servicio obtenemos un nivel de servicio del tramo

estudiado E y F. Por lo tanto un valor promedio del nivel de servicio a lo largo de toda la carretera es de E. Pero según el manual de mantenimiento rutinario el nivel de servicio de caminos varía entre A y B, para dicho fin se considera el nivel de servicio B.

4.5. MANTENIMIENTO

El manual de mantenimiento rutinario de caminos vecinales, que corresponde para la carretera estudiada, nos indica un procedimiento y unos costos dependiendo de muchos factores, de los cuales no tomaremos consideración. Se analizará el mantenimiento periódico para los índices de rugosidad indicados, que son IRI de cuatro, seis, ocho, diez, doce y catorce. Para lo cual se consideró la reposición de afirmado como partida principal y se elaboró presupuestos de mantenimiento periódico para los diferentes índices de rugosidad mencionados.

Para un índice de rugosidad de 4 el mantenimiento para regresar a un estado óptimo de IRI, tendrá el siguiente presupuesto considerando una reposición de material mínima de 5% y que el tiempo que se mantendrá en esas condiciones será de dos meses.

Tabla 46: Costo de mantenimiento para un índice de rugosidad de 4.

Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	OBRAS PRELIMINARES				62,138.85
01.01	MOVILIZACION Y DESMOVILIZACION DE EQUIPOS - MANTENIMIENTO	glb	1.00	36,976.47	36,976.47
01.02	NIVELACION Y REPLANTEO	km	47.78	526.63	25,162.38
02	PAVIMENTOS				41,447.38
02.01	REPOSICIÓN DE AFIRMADO	m3	1,374.25	30.16	41,447.38
03	TRANSPORTE				101,117.32
03.01	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR D<1 km	m3k	1,374.25	13.82	18,992.14
03.02	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR D=10 km	m3k	12,368.25	6.64	82,125.18
04	IMPACTO AMBIENTAL				7,150.00
04.01	RESTAURACION DE CANTERAS	m2	3,200.00	1.82	5,824.00
04.02	RESTAURACION DEL PATIO DE MAQUINAS	m2	850.00	1.56	1,326.00
05	SEÑALIZACION				8,264.20
05.01	HITOS KILOMÉTRICOS	und	35.00	236.12	8,264.20
	Costo Directo				220,117.75

Para un índice de rugosidad de 6 el mantenimiento para regresar a un estado óptimo de IRI, tendrá el siguiente presupuesto considerando una reposición de

material mínima de 15% y que el tiempo que se mantendrá en esas condiciones será de cuatro meses.

Tabla 47: Costo de mantenimiento para un índice de rugosidad de 6.

S10 Página 1

Presupuesto

Presupuesto 0201003 COSTO DE MANTENIMIENTO
 Subpresupuesto 002 COSTO DE MANTENIMIENTO IRI 6
 Cliente S10 S.A.C. Costo al 06/12/2016
 Lugar JUNIN - HUANCAYO - CHUPURO

Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	OBRAS PRELIMINARES				62,138.85
01.01	MOVILIZACION Y DESMOVILIZACION DE EQUIPOS - MANTENIMIENTO	glb	1.00	36,976.47	36,976.47
01.02	NIVELACION Y REPLANTEO	km	47.78	526.63	25,162.38
02	PAVIMENTOS				124,342.14
02.01	REPOSICION DE AFIRMADO	m3	4,122.75	30.16	124,342.14
03	TRANSPORTE				303,351.95
03.01	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR D<1 km	m3k	4,122.75	13.82	56,976.41
03.02	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR D=10 km	m3k	37,104.75	6.64	246,375.54
04	IMPACTO AMBIENTAL				7,150.00
04.01	RESTAURACION DE CANTERAS	m2	3,200.00	1.82	5,824.00
04.02	RESTAURACION DEL PATIO DE MAQUINAS	m2	850.00	1.56	1,326.00
05	SEÑALIZACION				8,264.20
05.01	HITOS KILOMÉTRICOS	und	35.00	236.12	8,264.20
	Costo Directo				505,247.14

Para un índice de rugosidad de 8 el mantenimiento para regresar a un estado óptimo de IRI, tendrá el siguiente presupuesto considerando una reposición de material mínima de 20% y que el tiempo que se mantendrá en esas condiciones será de dos meses.

Tabla 48: Costo de mantenimiento para un índice de rugosidad de 8.

S10 Página 1

Presupuesto

Presupuesto 0201003 COSTO DE MANTENIMIENTO
 Subpresupuesto 003 COSTO DE MANTENIMIENTO IRI 8
 Cliente S10 S.A.C. Costo al 06/12/2016
 Lugar JUNIN - HUANCAYO - CHUPURO

Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	OBRAS PRELIMINARES				62,138.85
01.01	MOVILIZACION Y DESMOVILIZACION DE EQUIPOS - MANTENIMIENTO	glb	1.00	36,976.47	36,976.47
01.02	NIVELACION Y REPLANTEO	km	47.78	526.63	25,162.38
02	PAVIMENTOS				165,789.52
02.01	REPOSICION DE AFIRMADO	m3	5,497.00	30.16	165,789.52
03	TRANSPORTE				404,469.26
03.01	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR D<1 km	m3k	5,497.00	13.82	75,968.54
03.02	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR D=10 km	m3k	49,473.00	6.64	328,500.72
04	IMPACTO AMBIENTAL				7,150.00
04.01	RESTAURACION DE CANTERAS	m2	3,200.00	1.82	5,824.00
04.02	RESTAURACION DEL PATIO DE MAQUINAS	m2	850.00	1.56	1,326.00
05	SEÑALIZACION				8,264.20
05.01	HITOS KILOMÉTRICOS	und	35.00	236.12	8,264.20
	Costo Directo				647,811.83

Para un índice de rugosidad de 10 el mantenimiento para regresar a un estado óptimo de IRI, tendrá el siguiente presupuesto considerando una reposición de material mínima de 30% y que el tiempo que se mantendrá en esas condiciones será de cuatro meses.

Tabla 49: Costo de mantenimiento para un índice de rugosidad de 10.

Presupuesto					
Presupuesto	0201003	COSTO DE MANTENIMIENTO			
Subpresupuesto	004	COSTO DE MANTENIMIENTO IRI 10			
Cliente	S10 S.A.C.		Costo al	06/12/2016	
Lugar	JUNIN - HUANCAYO - CHUPURO				
Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	OBRAS PRELIMINARES				62,138.85
01.01	MOVILIZACION Y DESMOVILIZACIÓN DE EQUIPOS - MANTENIMIENTO	glb	1.00	36,976.47	36,976.47
01.02	NIVELACIÓN Y REPLANTEO	km	47.78	526.63	25,162.38
02	PAVIMENTOS				248,684.28
02.01	REPOSICIÓN DE AFIRMADO	m3	8,245.50	30.16	248,684.28
03	TRANSPORTE				606,703.89
03.01	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR D<1 km	m3k	8,245.50	13.82	113,952.81
03.02	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR D=10 km	m3k	74,209.50	6.64	492,751.08
04	IMPACTO AMBIENTAL				7,150.00
04.01	RESTAURACION DE CANTERAS	m2	3,200.00	1.82	5,824.00
04.02	RESTAURACION DEL PATIO DE MAQUINAS	m2	850.00	1.56	1,326.00
05	SEÑALIZACION				8,264.20
05.01	HITOS KILOMÉTRICOS	und	35.00	236.12	8,264.20
	Costo Directo				932,941.22

Para un índice de rugosidad de 12 el mantenimiento para regresar a un estado óptimo de IRI, tendrá el siguiente presupuesto considerando una reposición de material mínima de 45% y que el tiempo que se mantendrá en esas condiciones será de cuatro meses.

Tabla 50: Costo de mantenimiento para un índice de rugosidad de 12.

Presupuesto					
Presupuesto	0201003	COSTO DE MANTENIMIENTO			
Subpresupuesto	005	COSTO DE MANTENIMIENTO IRI 12			
Cliente	S10 S.A.C.		Costo al	06/12/2016	
Lugar	JUNIN - HUANCAYO - CHUPURO				
Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	OBRAS PRELIMINARES				62,138.85
01.01	MOVILIZACION Y DESMOVILIZACIÓN DE EQUIPOS - MANTENIMIENTO	glb	1.00	36,976.47	36,976.47
01.02	NIVELACIÓN Y REPLANTEO	km	47.78	526.63	25,162.38
02	PAVIMENTOS				373,026.42
02.01	REPOSICIÓN DE AFIRMADO	m3	12,368.25	30.16	373,026.42
03	TRANSPORTE				910,055.84
03.01	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR D<1 km	m3k	12,368.25	13.82	170,929.22
03.02	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR D=10 km	m3k	111,314.25	6.64	739,126.62
04	IMPACTO AMBIENTAL				7,150.00
04.01	RESTAURACION DE CANTERAS	m2	3,200.00	1.82	5,824.00
04.02	RESTAURACION DEL PATIO DE MAQUINAS	m2	850.00	1.56	1,326.00
05	SEÑALIZACION				8,264.20
05.01	HITOS KILOMÉTRICOS	und	35.00	236.12	8,264.20
	Costo Directo				1,360,835.31

Para un índice de rugosidad de 14 el mantenimiento para regresar a un estado óptimo de IRI, tendrá el siguiente presupuesto considerando una reposición de material mínima de 60% y que el tiempo que se mantendrá en esas condiciones será de cuatro meses.

Tabla 51: Costo de mantenimiento para un índice de rugosidad de 14.

S10 Página 1

Presupuesto

Presupuesto **0201003 COSTO DE MANTENIMIENTO**
 Subpresupuesto **006 COSTO DE MANTENIMIENTO IRI 14**
 Cliente **S10 S.A.C.** Costo al **06/12/2016**
 Lugar **JUNIN - HUANCAYO - CHUPURO**

Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	OBRAS PRELIMINARES				62,138.85
01.01	MOVILIZACION Y DESMOVILIZACION DE EQUIPOS - MANTENIMIENTO	glb	1.00	36,976.47	36,976.47
01.02	NIVELACION Y REPLANTEO	km	47.78	526.63	25,162.38
02	PAVIMENTOS				497,368.56
02.01	REPOSICION DE AFIRMADO	m3	16,491.00	30.16	497,368.56
03	TRANSPORTE				1,213,407.78
03.01	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR D<1 km	m3k	16,491.00	13.82	227,905.62
03.02	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR D=10 km	m3k	148,419.00	6.64	985,502.16
04	IMPACTO AMBIENTAL				7,150.00
04.01	RESTAURACION DE CANTERAS	m2	3,200.00	1.82	5,824.00
04.02	RESTAURACION DEL PATIO DE MAQUINAS	m2	850.00	1.56	1,326.00
05	SEÑALIZACION				8,264.20
05.01	HITOS KILOMÉTRICOS	und	35.00	236.12	8,264.20
	Costo Directo				1,788,329.39

En la siguiente tabla se muestra el costo de mantenimiento para los índices de rugosidad internacional mencionados. Las variantes de los costos se deben a la variación del metrado de las siguientes partidas.

- Reposición de afirmado
- Transporte de material granular D<1 km
- Transporte de material granular D=10 km

Tabla 52: Costo de mantenimiento para diferentes índices de rugosidad

IRI	COSTO MANTENIMIENTO
4	S/. 220,117.75
6	S/. 505,247.14
8	S/. 647,811.83
10	S/. 932,941.22
12	S/. 1,360,635.31
14	S/. 1,788,329.39

En la siguiente tabla se presenta el Índice de rugosidad internacional relacionado con el tiempo en el que se mantiene o llega a dicho índice.

Tabla 53: Índice de rugosidad vs tiempo.

IRI	TIEMPO
4	2 meses
6	6 meses
8	8 meses
10	12 meses
12	18 meses
14	24 meses

La representación gráfica de la tabla anterior se aprecia a continuación.

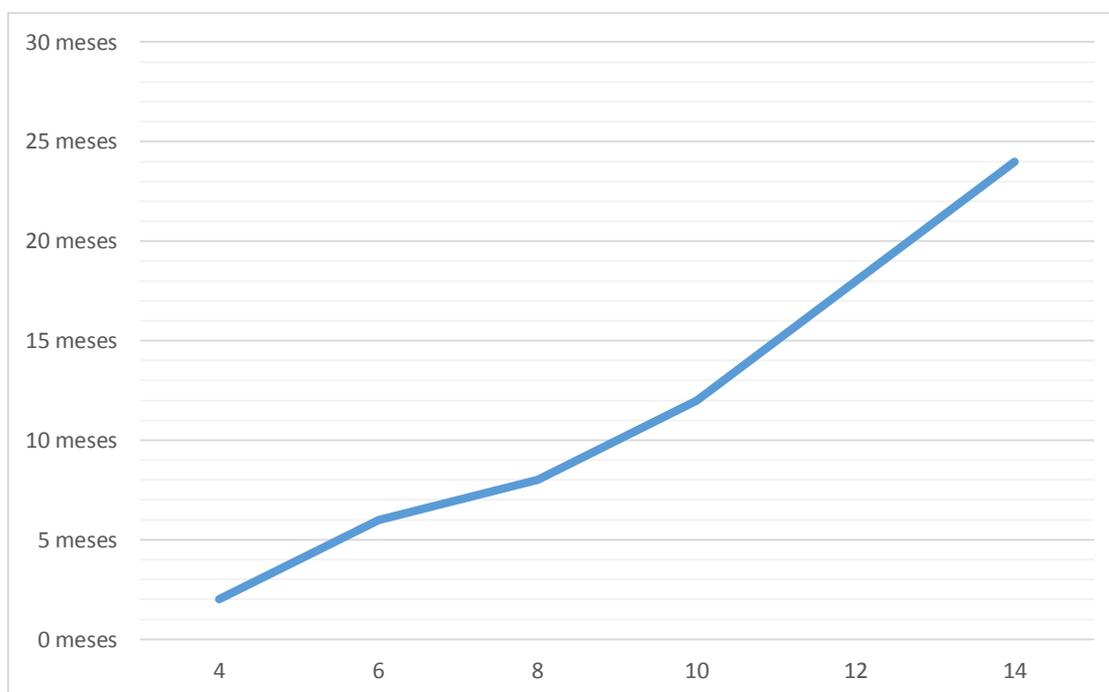


Figura 24: Índice de rugosidad internacional con respecto al tiempo.

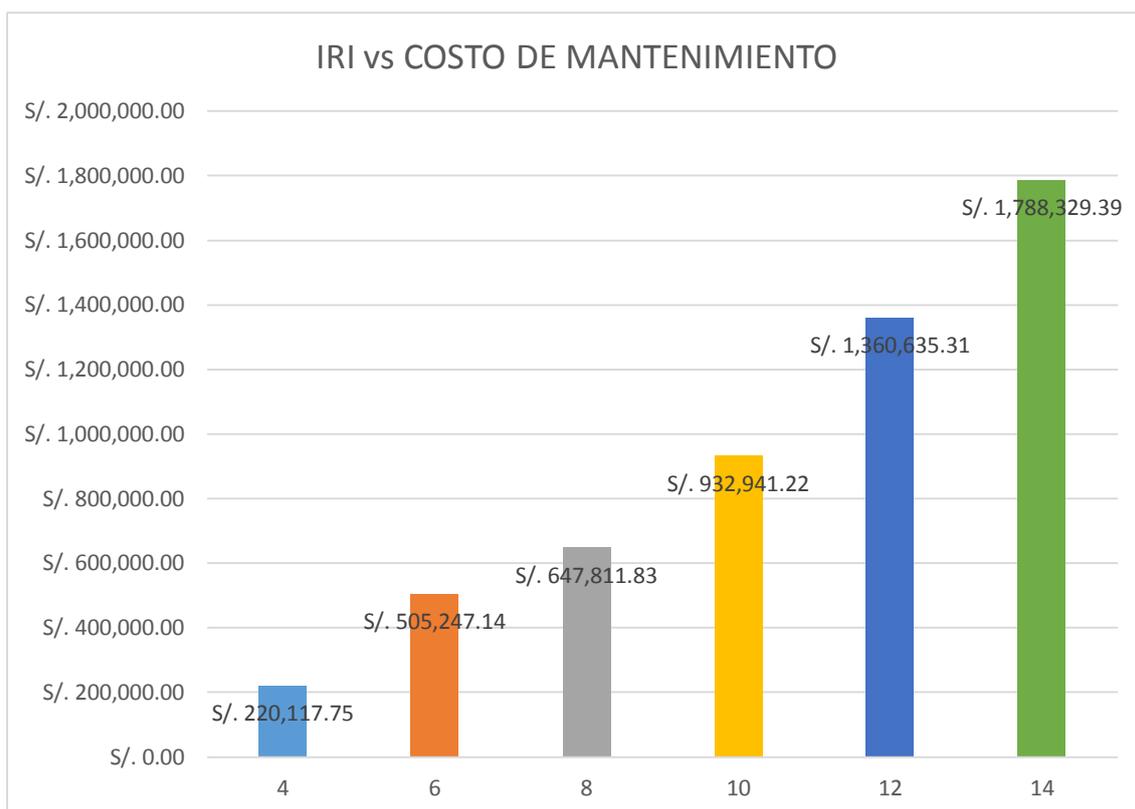


Figura 25: Costo de mantenimiento para diferentes índices de rugosidad

Realizando una comparación del mantenimiento periódico evaluando el índice de rugosidad internacional y considerando el costo de operación para los tiempos en que se mantendrá la rugosidad, tenemos los siguientes costos.

Tabla 54: Costos de operación y mantenimiento según el análisis para los diferentes índices de rugosidad.

IRI	MANTENIMIENTO	COSTO DE OPERACIÓN	SUMA
4	S/. 2,641,412.94	S/. 4,487,711.33	S/. 7,129,124.27
6	S/. 2,020,988.54	S/. 4,648,617.33	S/. 6,669,605.87
8	S/. 1,943,435.49	S/. 4,709,008.91	S/. 6,652,444.40
10	S/. 1,865,882.44	S/. 4,855,337.32	S/. 6,721,219.76
12	S/. 1,814,180.41	S/. 5,034,882.87	S/. 6,849,063.28
14	S/. 1,788,329.39	S/. 5,192,875.32	S/. 6,981,204.71

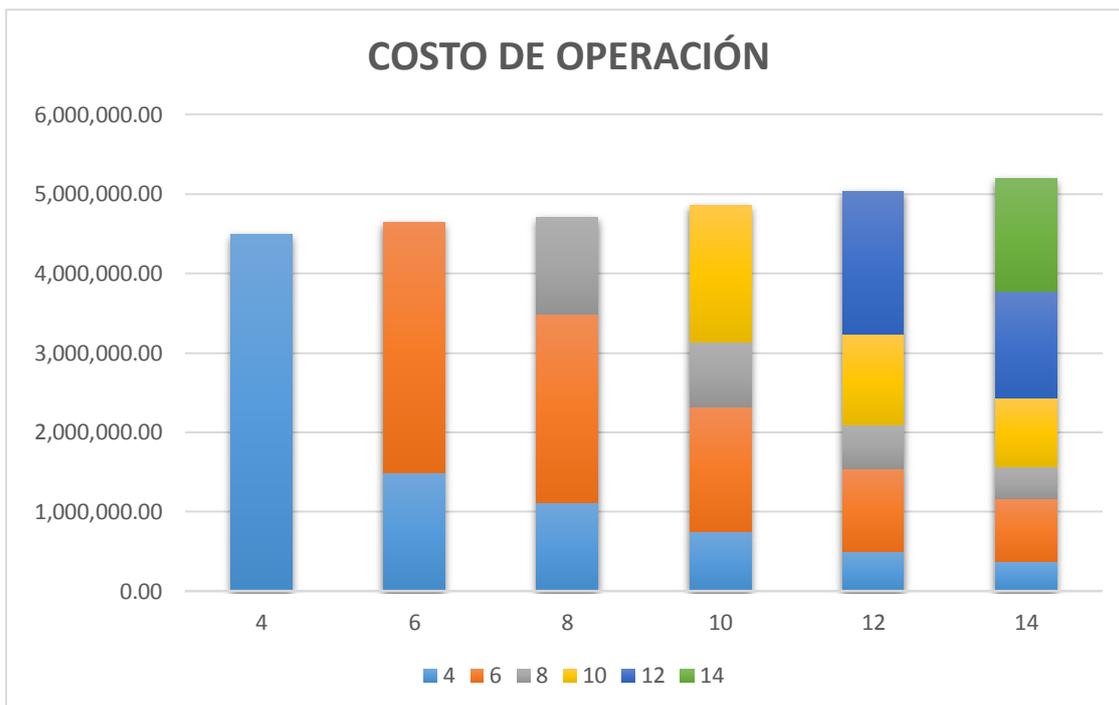


Figura 26: Costo de operación según análisis para los diferentes índices de rugosidad.

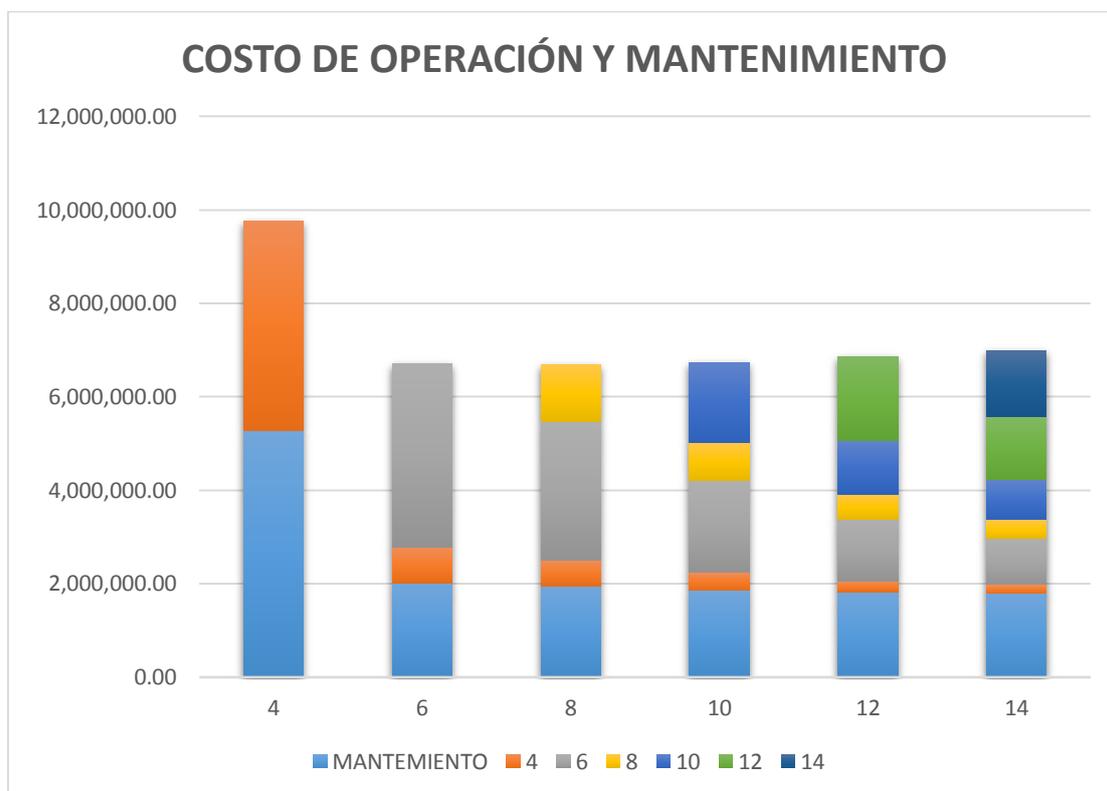


Figura 27: Costo de operación y mantenimiento según análisis para los diferentes índices de rugosidad

4.6. CONTRASTE DE HIPÓTESIS

PRUEBA DE HIPÓTESIS

ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL VS VELOCIDAD DE OPERACIÓN VEHÍCULOS PRIVADOS

Medidas	Índice de Rugosidad Internacional	Velocidad de Operación
Media	9.00	55.88
Error estándar	1.53	1.43
IC 95% Límite inferior	6.01	53.07
IC 95% Límite superior	11.99	58.69

Estadísticos

		IRI	VO
N	Válido	6	6
	Perdidos	1	1
Media		9,0000	55,8800
Error estándar de la media		1,52753	1,43179

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
VO	,277	6	,168	,820	6	,088

a. Corrección de significación de Lilliefors

Hipótesis:

Ho: La regularidad Superficial (IRI) influye en la velocidad de los vehículos privados en la carretera Chupuro – Lapa.

H1: La regularidad Superficial (IRI) no influye en la velocidad de los vehículos privados en la carretera Chupuro – Lapa.

Nivel de significancia:

Nivel de significancia (α): 5% = 0.05

Estadístico de Prueba:

Correlación de Pearson

		Correlaciones	
		IRI	VO
IRI	Correlación de Pearson	1	-,919**
	Sig. (bilateral)		,010
	N	6	6
VO	Correlación de Pearson	-,919**	1
	Sig. (bilateral)	,010	
	N	6	6

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Valor de P 0.009569 R de Pearson -,919 = -91.9%

Lectura del p-valor

Con una probabilidad de error de 0.957% existe correlación entre el Índice de Rugosidad Internacional y la velocidad de Operación de vehículos privados.

Toma de decisiones e interpretación

Existe buena correlación negativa o inversa (R = -0.919), entre el Índice de Rugosidad Internacional y la Velocidad de Operación de vehículos privados.

ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL VS VELOCIDAD DE OPERACIÓN VEHÍCULOS COMERCIALES

Medidas	Índice de Rugosidad Internacional	Velocidad de Operación
Media	9.00	55.88
Error estándar	1.53	1.43
IC 95% Límite inferior	9.00	53.73
IC 95% Límite inferior	1.53	1.33

Estadísticos

		IRI	VO
N	Válido	6	6
	Perdidos	1	1
Media		9,0000	53,7317
Error estándar de la media		1,52753	1,33092

Hipótesis:

Ho: La regularidad Superficial (IRI) influye en la velocidad de los vehículos comerciales en la carretera Chupuro – Lapa.

H1: La regularidad Superficial (IRI) no influye en la velocidad de los vehículos comerciales en la carretera Chupuro – Lapa.

Nivel de significancia:

Nivel de significancia (α): 5% = 0.05

Estadístico de Prueba:

Correlación de Pearson

		IRI	VO
IRI	Correlación de Pearson	1	-,919**
	Sig. (bilateral)		,010
	N	6	6
VO	Correlación de Pearson	-,919**	1
	Sig. (bilateral)	,010	
	N	6	6

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Valor de P 0.0095758 R de Pearson -,919 = -91.9%

Lectura del p-valor

Con una probabilidad de error de 0.95758% existe correlación entre el Índice de Rugosidad Internacional y la velocidad de Operación de vehículos comerciales.

Toma de decisiones e interpretación

Existe buena correlación negativa o inversa (R = -0.919), entre el Índice de Rugosidad Internacional y la Velocidad de Operación de vehículos comerciales.

ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL VS VELOCIDAD DE OPERACIÓN VEHÍCULOS NO ARTICULADOS

Medidas	Índice de Rugosidad Internacional	Velocidad de Operación
Media	9.00	46.26
Error estándar	1.53	1.03
IC 95% Límite inferior	6.01	44.25
IC 95% Límite superior	11.99	48.28

Estadísticos		IRI	VO
N	Válido	6	6
	Perdidos	1	1
Media		9,0000	46,2633
Error estándar de la media		1,52753	1,02919

Hipótesis:

Ho: La regularidad Superficial (IRI) influye en la velocidad de los vehículos no articulados en la carretera Chupuro – Lapa.

H1: La regularidad Superficial (IRI) no influye en la velocidad de los vehículos no articulados en la carretera Chupuro – Lapa.

Nivel de significancia:

Nivel de significancia (α): 5% = 0.05

Estadístico de Prueba:

Correlación de Pearson

Correlaciones		IRI	VO
IRI	Correlación de Pearson	1	-,941**
	Sig. (bilateral)		,005
	N	6	6
VO	Correlación de Pearson	-,941**	1
	Sig. (bilateral)	,005	
	N	6	6

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Valor de P 0.005121 R de Pearson -,941 = -94.1%

Lectura del p-valor

Con una probabilidad de error de 0.5121% existe correlación entre el Índice de Rugosidad Internacional y la velocidad de Operación de vehículos no articulados.

Toma de decisiones e interpretación

Existe buena correlación negativa o inversa ($R = -0.941$), entre el Índice de Rugosidad Internacional y la Velocidad de Operación de vehículos no articulados.

ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL VS VELOCIDAD DE OPERACIÓN DE BUSES

Medidas	Índice de Rugosidad Internacional	Velocidad de Operación
Media	9.00	52.58
Error estándar	1.53	1.13
IC 95% Límite inferior	6.01	50.37
IC 95% Límite superior	11.99	54.80

Estadísticos

		IRI	VO
N	Válido	6	6
	Perdidos	1	1
Media		9,0000	52,5833
Error estándar de la media		1,52753	1,12855

Hipótesis:

Ho: La regularidad Superficial (IRI) influye en la velocidad de los buses en la carretera Chupuro – Lapa.

H1: La regularidad Superficial (IRI) no influye en la velocidad de los buses en la carretera Chupuro – Lapa.

Nivel de significancia:

Nivel de significancia (α): 5% = 0.05

Estadístico de Prueba:

Correlación de Pearson

		IRI	VO
IRI	Correlación de Pearson	1	-,919**
	Sig. (bilateral)		,010
	N	6	6
VO	Correlación de Pearson	-,919**	1
	Sig. (bilateral)	,010	
	N	6	6

**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Valor de P 0.00961 R de Pearson -,919 = -91.9%

Lectura del p-valor

Con una probabilidad de error de 0.961% existe correlación entre el Índice de Rugosidad Internacional y la velocidad de Operación de buses.

Toma de decisiones e interpretación

Existe buena correlación negativa o inversa (R = -0.919), entre el Índice de Rugosidad Internacional y la Velocidad de Operación de vehículos buses.

PRUEBA DE HIPÓTESIS**ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL VS COSTO DE OPERACIÓN VEHÍCULOS PRIVADOS**

Medidas	Índice de Rugosidad Internacional	Costo de Operación
Media	9.00	1406953.98
Error estándar	1.53	49456.11
IC 95% Límite inferior	6.01	1310020.01
IC 95% Límite inferior	11.99	1503887.95

Estadísticos

		IRI	COV
N	Válido	6	6
	Perdidos	0	0
Media		9,0000	1406953,9767
Error estándar de la media		1,52753	49456,10644

Hipótesis:

Ho: La regularidad Superficial (IRI) influye en el costo de operación de los vehículos privados en la carretera Chupuro – Lapa.

H1: La regularidad Superficial (IRI) no influye en el costo de operación de los vehículos privados en la carretera Chupuro – Lapa.

Nivel de significancia:

Nivel de significancia (α): 5% = 0.05

Estadístico de Prueba:

Correlación de Pearson

Correlaciones

		IRI	COV
IRI	Correlación de Pearson	1	,998**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	6	6
COV	Correlación de Pearson	,998**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	6	6

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Valor de P 0.0000067445 R de Pearson 0.998 = 99.8%

Lectura del p-valor

Con una probabilidad de error de 0.000067445% existe correlación entre el Índice de Rugosidad Internacional y el costo de Operación de vehículos privados.

Toma de decisiones e interpretación

Existe buena correlación positiva o directa ($R = 0.998$), entre el Índice de Rugosidad Internacional y el costo de Operación de vehículos privados.

ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL VS COSTO DE OPERACIÓN VEHÍCULOS COMERCIALES

Medidas	Índice de Rugosidad Internacional	Costo de Operación
Media	9.00	248057.48
Error estándar	1.53	9208.74
IC 95% Límite inferior	6.01	230008.35
IC 95% Límite superior	11.99	266106.61

Estadísticos

		IRI	COV
N	Válido	6	6
	Perdidos	0	0
Media		9,0000	248057,4783
Error estándar de la media		1,52753	9208,74039

Hipótesis:

Ho: La regularidad Superficial (IRI) influye en el costo de operación de los vehículos comerciales en la carretera Chupuro – Lapa.

H1: La regularidad Superficial (IRI) no influye en el costo de operación de los vehículos comerciales en la carretera Chupuro – Lapa.

Nivel de significancia:

Nivel de significancia (α): 5% = 0.05

Estadístico de Prueba:

Correlación de Pearson

		IRI	COV
IRI	Correlación de Pearson	1	,987**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	6	6
COV	Correlación de Pearson	,987**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	6	6

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Valor de P 0.0002655 R de Pearson 0.987 = 98.7%

Lectura del p-valor

Con una probabilidad de error de 0.02655% existe correlación entre el Índice de Rugosidad Internacional y el costo de Operación de vehículos comerciales.

Toma de decisiones e interpretación

Existe buena correlación positiva o directa (R = 0.987), entre el Índice de Rugosidad Internacional y el costo de Operación de vehículos comerciales.

ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL VS COSTO DE OPERACIÓN VEHÍCULOS NO ARTICULADOS

Medidas	Índice de Rugosidad Internacional	Costo de Operación
Media	9.00	668579.21
Error estándar	1.53	22877.40
IC 95% Límite inferior	6.01	623739.51
IC 95% Límite superior	11.99	713418.92

Estadísticos

		IRI	COV
N	Válido	6	6
	Perdidos	0	0
Media		9,0000	668579,2133
Error estándar de la media		1,52753	22877,39897

Hipótesis:

Ho: La regularidad Superficial (IRI) influye en el costo de operación de los vehículos no articulados en la carretera Chupuro – Lapa.

H1: La regularidad Superficial (IRI) no influye en el costo de operación de los vehículos no articulados en la carretera Chupuro – Lapa.

Nivel de significancia:

Nivel de significancia (α): 5% = 0.05

Estadístico de Prueba:

Correlación de Pearson

Correlaciones

		IRI	COV
IRI	Correlación de Pearson	1	,999**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	6	6
COV	Correlación de Pearson	,999**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	6	6

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Valor de P 0.000002412 R de Pearson 0.941 = 94.1%

Lectura del p-valor

Con una probabilidad de error de 0.0002412 % existe correlación entre el Índice de Rugosidad Internacional y el costo de Operación de vehículos no articulados.

Toma de decisiones e interpretación

Existe buena correlación positiva o directa ($R = 0.999$), entre el Índice de Rugosidad Internacional y el costo de Operación de vehículos no articulados.

ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL VS COSTO DE OPERACIÓN DE BUSES

Medidas	Índice de Rugosidad Internacional	Costo de Operación
Media	9.00	237703.06
Error estándar	1.53	8888.24
IC 95% Límite inferior	6.01	220282.11
IC 95% Límite superior	11.99	255124.00

Estadísticos

		IRI	COV
N	Válido	6	6
	Perdidos	0	0
Media		9,0000	237703,0550
Error estándar de la media		1,52753	8888,23709

Hipótesis:

Ho: La regularidad Superficial (IRI) influye en el costo de operación los buses en la carretera Chupuro – Lapa.

H1: La regularidad Superficial (IRI) no influye en el costo operación de los buses en la carretera Chupuro – Lapa.

Nivel de significancia:

Nivel de significancia (α): 5% = 0.05

Estadístico de Prueba:

Correlación de Pearson

		IRI	COV
IRI	Correlación de Pearson	1	,994**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	6	6
COV	Correlación de Pearson	,994**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	6	6

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Valor de P 0.00005344 R de Pearson 0.994 = 99.4%

Lectura del p-valor

Con una probabilidad de error de 0.005344% existe correlación entre el Índice de Rugosidad Internacional y el costo de Operación de buses.

Toma de decisiones e interpretación

Existe buena correlación positiva o directa (R = 0.994), entre el Índice de Rugosidad Internacional y el costo de Operación de vehículos buses.

CAPITULO V:
DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se determinó que mientras sea mayor el Índice de Rugosidad Internacional el nivel de servicio será más bajo ya que la velocidad de operación vehicular se ajusta por rugosidad y esta disminuye para tal efecto, obteniéndose un Índice de Rugosidad Internacional característico para la carretera de **9.26**, a partir de dicho IRI se obtuvo velocidades de operación para los cuatro tipos de vehículos que transitan por dicha carretera, siendo el promedio de dichas velocidades **52.5 km/h** lo que equivale aproximadamente a 32.6 mph y tenemos un **Nivel de servicio E** para la carretera Chupuro – Lapa. Es necesario ya, el mantenimiento de dicha carretera, ya que mientras transcurra el tiempo, el costo de operación sigue aumentando y el costo de mantenimiento también como lo podemos apreciar en la tabla 54.
- La velocidad de operación vehicular es afectada por la rugosidad de la carretera, así como también por las curvas verticales y horizontales baches, enclaminado y erosión a lo largo de la carretera. Teniendo mayor efecto en los camiones y buses, siendo la velocidad de operación vehicular de estos de 46 km/h y 51 km/h mientras que para los vehículos particulares y comerciales 54 km/h y 52 km/h respectivamente.
- Los costos de operación dependen de la velocidad de operación y también se ven afectados por la rugosidad, el tráfico vehicular, la pendiente. Siendo los costos de operación para vehículos particulares de S/.98.6 por día para el tramo de carretera de 35.1 km, para vehículos comerciales de S/. 112.45 por día, para camiones es de S/. 366.19 por día y para buses de S/.648.83 por día. Y un costo de operación anual de la carretera para todos los vehículos de S/. 2, 554,533.54 para todo el año. Estos costos de operación vehicular incluyen el combustible, aceites, repuestos y mantenimiento, depreciación, etc. Siendo el costo de combustible el mayor de ellos.

- El costo de mantenimiento será mayor cuanto mayor sea el índice de rugosidad sin embargo como se observa en la tabla 45, estos disminuyen con respecto a los índices de rugosidad, ya que para mantener el índice de rugosidad, se requiere hacer más veces el mantenimiento mientras que para índices de rugosidad más alto se requiere menos veces de mantenimiento. Adicionando también el costo de operación a estos costos de mantenimiento se obtiene los costos de la tercera columna de la tabla 45, teniendo como menor costo el que corresponde a un índice de rugosidad internacional de ocho.
- Los formatos usados para la recolección de datos son los indicados en los anexos para la obtención del Índice de Rugosidad Internacional con el equipo de MERLIN, el cual es un equipo que si bien tiene un bajo rendimiento (2km/h), tiene un bajo costo y una gran precisión. Este método es conveniente para tramos no muy largos de carreteras no pavimentadas por sus características, ya que estas se adecuan a las necesidades de la región y del país.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda para futuras investigaciones plantear un ajuste o insertar el Índice de rugosidad internacional en la metodología de cálculo del nivel de servicio, ya que si bien se llegó a relacionar indirectamente mediante la velocidad, si calculamos mediante el flujo de tráfico vehicular nos indica un nivel de servicio que no indican las condiciones de la carretera, pero si se insertara el IRI, se lograría coincidir en el cálculo del nivel de servicio.
- También se sugiere relacionar directamente el IRI, la velocidad de operación, los costos de operación y el nivel de servicio en una sola metodología para vías en el nivel de afirmado que son una parte considerable del total de vías a nivel nacional. Sería una investigación muy complicada y costosa, pero sería de suma importancia, ya que generalmente nos basamos en investigaciones internacionales que se

aproximan pero nos reflejan muchas veces la realidad del país; además que es muy necesario para la evaluación y conservación de vías no pavimentadas.

- El equipo MERLIN es muy recomendable para las condiciones y situación de nuestra región y nuestro país, ya que su manejo es muy fácil, sus costos son bajos en comparación a otros métodos de obtención de IRI y sus resultados son muy confiables. La implementación de este equipo para las instituciones que supervisan y evalúan las condiciones de las carreteras en nivel de afirmado sería muy beneficioso.
- Se recomienda analizar la variación de los tiempos en que permanece una vía con una cierta rugosidad, ya que esta, dependerá del tráfico, pendientes, ancho de carril y otros factores que son los mismos para otras carreteras.

BIBLIOGRAFÍA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guía para el diseño de estructuras de pavimento*. Washington: AASHTO.
- American Society for Testing and Materials. (1995). ASTM E 867 Terminology Relating to Traveled Surface Characteristics.
- Arriaga Patiño, M. C., Garnica Anguas, P., & Rico Rodríguez, A. (1998). Índice Internacional de Rugosidad en la red carretera de México. Sanfandila, Queretaro, México.
- CHOQUE SÁNCHEZ, H. M. (2012). Evaluación de ditivos químicos en la eficiencia de la conservación de superficies de rodadura en carreteras no pavimentadas. Lima, Perú.
- Del Aguila Rodríguez, P. (s.f.). Metodología para la determinación de la rugosidad de los pavimentos con equipo de bajo costo y gran precisión. Perú.
- Instituto Nacional de Vías. Norma I.N.V.E. - 790 - 07. (2007). Determinación del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) para medir la rugosidad de los pavimentos. Bogotá, Colombia: LTDA.
- Ministerio de transportes y comunicaciones. (2013). *Manual de carreteras. Especificaciones técnicas generales para la construcción EG - 2013*. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *MTC - Informes y publicaciones/Transportes*. Obtenido de <http://www.mtc.gob.pe/estadisticas/transportes.html>
- Montoya Goicochea, J. (Septiembre de 2013). Análisis del IRI para un proyecto de carretera sinuosa concesionada en el Perú. Lima, Perú.

- Onofre Calderón, J., Sánchez Pérez, J., & Santiago Viana, W. (Abril de 2008). Determinación del Índice de Rugosidad Internacional de pavimento usando el perfilometro Romdas Z-250. El Salvador.
- Pradena Miquel, M. (Diciembre de 2006). Análisis de Regularidad Superficial en Caminos Pavimentados. Chile.
- Programa de infraestructura del transporte. (Marzo de 2014). Propuesta para la definición de un procedimiento de medición y análisis del Índice de Regularidad internacional. San José, Costa Rica.
- Queensland Government. (Febrero de 2011). Cost-benefit Analysis Manual. Queensland.
- Reyes Spíndola, R. C., & Cárdenas Grisales, J. (1994). *Ingeniería de Transito Fundamentos y Aplicaciones*. México D.F.
- Transportation Research Board. (1998). Highway Capacity Manual - Special Report 209. Washington, D.C., EE.UU.
- Ventura, J.; Alvarenga, E.; Unidad de Investigación y Desarrollo Vial. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano. República del Salvador. (2005). Determinación del índice de regularidad internacional (IRI).

ANEXOS