

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Antecedentes**

Las características de la superficie de una carretera son importantes tanto para el confort como para la seguridad de los usuarios. La superficie de un pavimento debe proveer una fricción adecuada y mantener un nivel adecuado de calidad de ruedo para asegurar la satisfacción de los conductores. En particular, la fricción que se desarrolla entre las llantas del vehículo y la superficie del pavimento es un factor crítico para controlar y reducir los accidentes de tránsito.

La fricción llanta-pavimento y la textura en la superficie del pavimento son características que influyen de manera considerable en la seguridad del conductor, sobre todo cuando el pavimento está mojado, por lo que deben ser parámetros que debe considerarse en el diseño de la superficie del pavimento y monitoreado a lo largo de la vida útil del pavimento.

Las propiedades friccionantes que se desarrollan en la interface llanta-pavimento dependen de la microtextura y la macrotextura de la superficie, junto a las propiedades y el desgaste de la llanta, así como también condiciones ambientales y las características del vehículo.

Debido a las diferencias en las mediciones de fricción obtenidas con diferentes métodos y equipos el Comité Técnico de Características Superficiales de la Asociación Internacional Permanente de los Congresos de Carreteras (AIPCR) decidió llevar a cabo un experimento internacional para comparar y armonizar los diferentes métodos de medición de la fricción. Como resultado de este experimento se definió el Índice de Fricción Internacional (IFI) como un indicador que define el estado de una carretera en términos de las propiedades de textura y fricción del pavimento.

En Bolivia el manual de carreteras de la ABC considera un coeficiente de rozamiento mínimo de 0,45 según las mediciones con el péndulo británico a cualquier velocidad, además recomienda para mantener una resistencia al resbalamiento satisfactoria a velocidades de 90 km/h una dimensión de 1 mm para superficies bituminosas y 0,5 mm para superficies de concreto. Estos parámetros se deben tomar en cuenta para la gráfica

de aceptación o rechazo que nos recomienda la AIPCR, además de un cuadro de análisis de los valores de textura y fricción presentados a continuación (tabla 1 y 2).

**Tabla N° 1. Criterios para calificar la seguridad vial tomando en cuenta los valores coeficiente de resistencia al deslizamiento**

Condición	Calificación	Resultado del diagnostico
$CRD \geq 1,50$	Excelente	Superficie muy rugosa y áspera apropiada para el tránsito intenso o altas velocidades incluso con pavimento mojado.
$0,82 \leq CRD \leq 1,5$	Bueno	Superficie con rugosidad y aspereza aceptable para tránsito medio, propician condiciones satisfactorias de seguridad con pavimento mojado a moderadas velocidades de seguridad.
$0,45 \leq CRD \leq 0,82$	Regular	Superficie con rugosidad y aspereza adecuada para intensidades bajas o hasta media con precauciones. Condiciones garantizadas de seguridad sólo con pavimento seco. Se debe evaluar periódicamente el CRD y PT.
$0,21 \leq CRD \leq 0,45$	Malo	Condiciones inseguras de circulación con pavimento mojado y aún incluso con pavimento seco. Superficie con rugosidad y aspereza inadecuadas, con peligro, velocidad limitada y marcado pavimento.
$CRD \leq 0,21$	Pésimo	Circulación insegura con pavimento seco y crítico con pavimento mojado. Se debe reponer las características antideslizantes del pavimento. Establecer señalización vertical y horizontal con medidas extremas de control mientras permanezcan las condiciones inseguras.

Fuente: Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras (AIPCR, 1995)

**Tabla N° 2. Criterios para calificar la seguridad vial tomando en cuenta los valores de profundidad de Textura**

Condición	Calificación	resultado del diagnostico
$< 0,2$	Muy Fina	Requiere mantenimiento.
$0,2 \leq PT \leq 0,4$	Fina	Sólo para tramos donde raramente se superan los 80 Km/h (áreas urbanas).
$0,4 \leq PT \leq 0.8$	Media	Para tramos normales con velocidades moderadas de 80 a 120 Km/h.
$0,8 \leq PT \leq 1,2$	Gruesa	Para tramos normales con velocidades superiores a 120 Km/h.
$> 1,2$	Muy Gruesa	Para casos especiales con peligro de deslizamiento.

Fuente: Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras (AIPCR, 1995)

Recientes investigaciones han demostrado que niveles bajos de fricción puede asociarse con un incremento en el riesgo de accidentes, especialmente bajo condiciones húmedas, enfatizando la necesidad de controlar y restaurar las propiedades de fricción de la superficie. Mediante una evaluación de la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos aplicando el modelo de IFI de la Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras (AIPCR, 1995).

## 1.2. Justificación

Cualquier tipo de pavimento ya sea en carreteras urbanas o rurales, debe tener como objetivo principal proveer al usuario de una infraestructura vial cómoda y segura. Las texturas de la superficie proveen de características funcionales al pavimento que permiten el cumplimiento de este objetivo, y por lo tanto, se pueden controlar y evitar accidentes en las vías de tránsito.

Usualmente, desde el punto de vista de la ingeniería se da mayor importancia a las características estructurales del pavimento que a las funcionales. Sin embargo debido a que la capa superior es en gran medida responsable de la seguridad en la carretera, la construcción de la misma debe ser realizada con materiales que garanticen una buena adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento.

Ante la necesidad de averiguar si la superficie de los pavimentos de la ciudad de Tarija brinda la seguridad adecuada a los usuarios, se ve por conveniente realizar una evaluación de la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos urbanos.

La importancia de evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos urbanos de la ciudad de Tarija con un modelo de IFI es proporcionar información para calibrar, actualizar o ajustar métodos de diseño de pavimentos; comprobar predicciones de diseño y en caso necesario poder corregirse además de saber cómo debe ser la textura superficial en pavimentos urbanos terminados para poder ayudar con la seguridad de los usuarios de una carretera, asegurando una buena adherencia entre el neumático y el pavimento.

Al ser una vía igual que cualquier estructura u obra ingenieril tiene una vida útil, además de que necesita de conservación y mantenimiento determinando de ese modo si el pavimento podría ser rehabilitado o en su defecto ser reemplazado en su totalidad para seguir brindando eficazmente su servicio previniendo su conservación y continuidad.

En este estudio se propone sintetizar los conocimientos relacionados con la evaluación superficial desde el punto de vista de las condiciones de macrotextura y microtextura que se presenta en la superficie de los pavimentos, además de correlacionar la variación de la fricción del pavimento en función de la evaluación del índice condición del pavimento PCI, que debe orientar a los proyectistas a la búsqueda de soluciones a los problemas prácticos que afectan a la seguridad de los pavimentos, que tiene influencia directa con la textura de la superficie.

### **1.3. Planteamiento del problema**

#### **1.3.1. Situación problemática**

El Índice de Fricción Internacional (IFI) es una escala de referencia que integra la textura y la fricción, con el fin de tener una idea sobre la capacidad de un pavimento para ofrecer una superficie segura en condiciones adversas.

Mediante este índice se obtiene homogeneidad en las mediciones con diferentes equipos y en cualquier pavimento del mundo, de forma que las características pueden ser comparadas mediante una escala común de fricción.

La evaluación de la resistencia al deslizamiento con un modelo de IFI requiere de mediciones de macro textura y micro texturas, las cuales son fundamentales sobre todo en carreteras de elevada intensidad de tránsito.

Al igual que otras características superficiales, los niveles de adherencia del pavimento evolucionan con el tiempo como consecuencia del paso de vehículos; por lo tanto es necesario realizar mediciones periódicamente que reflejen la realidad del pavimento.

Actualmente en la ciudad de Tarija no se cuenta con un modelo de IFI que permita el diseño, evaluación y mantenimiento adecuado de las carreteras. La existencia de un modelo de IFI para mediciones específicas del país permite la adaptación a una escala internacional sin necesidad de cambiar los equipos de medición.

Los valores de fricción podrán analizarse según experiencias en otros países, posibilitando la creación de niveles de investigación propios del país y el intercambio de información entre los profesionales y las administraciones.

Es necesario realizar una evaluación de la resistencia al deslizamiento de los pavimentos urbanos de la ciudad de Tarija, con el fin de obtener si dichas características de la superficie brindan el confort y la seguridad vial necesaria para su tránsito vehicular y peatonal.

#### **1.3.2. Problema**

¿Será que al realizar una evaluación de la resistencia al deslizamiento de los pavimentos urbanos, se puede obtener las características superficiales adecuadas para el tránsito de vehículos en condiciones adversas cuando esta mojada la superficie?

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

- Evaluar la resistencia al deslizamiento longitudinal de la superficie de pavimentos urbanos de la ciudad de Tarija, considerando el modelo de Índice de Fricción Internacional (IFI) de la Asociación Internacional Permanente de Congresos de carreteras (AIPCR), para determinar el estado de los tramos en estudio y si estos tienen o no las características adecuadas de fricción y textura.

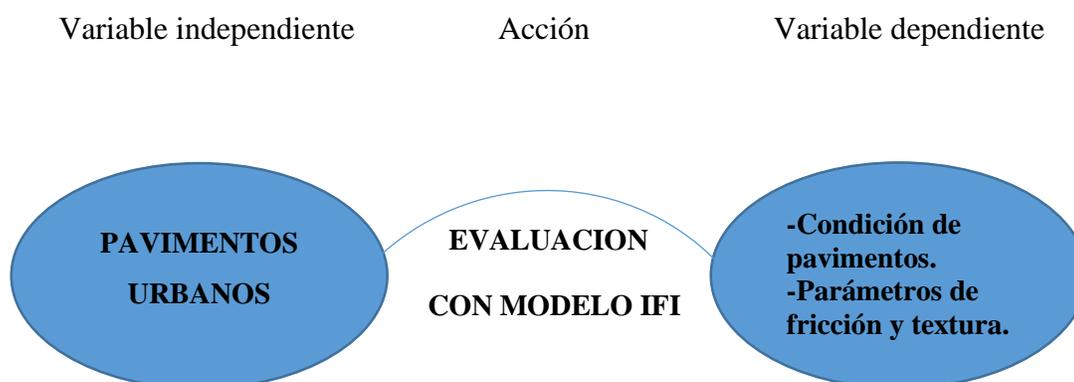
### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Recopilar información bibliográfica sobre la resistencia al deslizamiento superficial y los estudios realizados internacionalmente sobre el Índice de Fricción Internacional.
- Tomar en consideración lo estipulado en los manuales de la ABC para el diseño de carreteras de Bolivia con respecto a la resistencia al deslizamiento.
- Realizar mediciones de fricción con el péndulo de fricción; y mediciones de macrotextura con el círculo de arena para 45 superficies representativas de los pavimentos urbanos de la ciudad de Tarija.
- Obtener los valores de la constante de velocidad ( $S_p$ ) y el parámetro de fricción ( $F_{60}$ ) para poder expresar los resultados en formato del IFI.
- Realizar la gráfica de la curva “Fricción-Velocidad de deslizamiento” para calcular la fricción a cualquier velocidad de deslizamiento.
- Correlacionar el índice de fricción internacional IFI con el índice de condición del pavimento PCI para determinar la variación de la textura de la superficie en función del estado de deterioro del pavimento.
- Determinar el estado o condición en el que se encuentran los pavimentos en estudio aplicando la gráfica de aceptación o rechazo recomendada por la AIPCR, y por normas nacionales.
- Determinar los resultados de la evaluación y proponer posibles soluciones para mejorar la resistencia al deslizamiento de la superficie del pavimento.

### 1.5. Hipótesis

Si se da el caso de que los parámetros de fricción y textura que definen el Índice de Fricción Internacional (IFI) sirven para normar cualquier aplicación relativa a la resistencia al deslizamiento, y debido a la influencia que tiene la fricción y la macrotextura del pavimento en la seguridad de carreteras se considera usar el modelo AIPCR para calcular el IFI, y así evaluar las superficies de rodamiento de la ciudad de Tarija.

### 1.6. Variables



### 1.7. Diseño metodológico

#### 1.7.1. Componentes

##### Unidades de estudio

La unidad de estudio serán los pavimentos urbanos de la ciudad de Tarija.

##### Población

La población del presente estudio consta de las avenidas de la ciudad de Tarija.

##### Selección de nivel de confianza

Según los parámetros y criterios comprometidos en el desarrollo del presente trabajo, se establece un nivel de confiabilidad del **95%** asegurando que el procedimiento seleccionado es confiable, quedando un margen de error del 5%.

**Tabla N° 3. Tamaño y muestra**

Pregunta de investigación	Objeto de investigación	Unidad de muestreo	Ni
---------------------------	-------------------------	--------------------	----

¿Será que al realizar una evaluación de la resistencia al deslizamiento de los pavimentos urbanos, se puede obtener las características superficiales adecuadas para el tránsito de vehículos en condiciones adversas cuando esta mojada la superficie?	Evaluación superficial de pavimentos urbanos	Ensayo de coeficiente de rozamiento	119
		Ensayo de medición de la textura del pavimento	119
		Ensayo superficial mediante el PCI	20

FUENTE: Elaboración Propia

**Tabla N° 4. Tamaño y N° de muestras**

Grupos	Unidad de muestras	N° de pruebas (Ni)	pi	qi	pixqi	Ni x pi x qi	Wi	ni
Coeficiente de rozamiento	Péndulo de fricción	360	0,5	0,5	0,25	90	0,46	119
Textura superficial	Círculo de arena	360	0,5	0,5	0,25	90	0,46	119
Índice de condición del pavimento	Ensayo de evaluación de pavimentos PCI	60	0,5	0,5	0,25	15	0,08	20
N° de pruebas		780				195		

FUENTE: Elaboración Propia

$$n = \frac{\sum_{i=1}^l Ni x pi x qi}{ND + \frac{1}{N} x \sum_{i=1}^l Ni x pi x qi} = 258$$

Donde:

Ni= Tamaño total

pi= Comportamiento en proporción del evento

qi= Comportamiento en porcentaje del evento

D= Valor de la confianza = 0,00065

### Muestra

Para la muestra se determinó realizar 45 tramos de pavimentos urbanos de la ciudad de Tarija, de los cuales se realizaran 6 mediciones por cada tramo, considerando que sea representativo medir el la huella derecha, huella izquierda y entre las huellas de cada pavimento evaluado.

### Muestreo Sistemático para la determinación de tramos a evaluar

Cada muestra es seleccionada según la enésima posición de una división de la población, el primero se escoge al azar, su ventaja con respecto al muestreo aleatorio es la simplicidad. La se asignaron números a cada una de las avenidas de la ciudad de Tarija y se procedió evaluar las avenidas que fueron seleccionadas al azar. En la tabla 5 se observan las avenidas seleccionadas de color azul y de color naranja las avenidas con pavimento rígido.

**Tabla N° 5. Selección de muestra a ser evaluadas**

91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

FUENTE: Elaboración Propia

#### 1.7.2. Métodos y técnicas empleadas

Se efectuara el método de investigación inductivo. Obteniendo la información teórica, estudios recientes, modelos matemáticos en uso y la aplicación del IFI para realizar la evaluación de la resistencia superficial de pavimentos urbanos aplicando el modelo de IFI de la AIPCR en los pavimentos de las avenidas de la ciudad de Tarija a partir de la observación, registro y análisis estadístico de los datos de la textura y fricción del pavimento. Obteniendo el estado superficial de los pavimentos de acuerdo a las consideraciones y niveles de intervención que se obtiene del experimento de la AIPCR en 1995.

El tipo de muestreo será el probabilístico, usando la técnica de muestreo sistemático en la que el investigador seleccionara los tramos para la muestra según la enésima posición de una división de la población.

La técnica de medición de contexto natural se la usara para obtener los datos, de manera directa del ambiente natural en nuestro medio, efectuando la medición de la textura y la

fricción con la mancha de arena y el péndulo de fricción respectivamente, en las principales avenidas de la ciudad de Tarija.

Para el análisis de los datos se usaran técnicas de la estadística, como la teoría de errores para determinar que los datos obtenidos en campo tengan un valor acertado bien distribuido con una confiabilidad descrita en la norma.

Se usara la técnica de regresión lineal para obtener una correlación entre el índice de fricción internacional IFI y el índice de condición del pavimento PCI.

### **1.7.3. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información**

#### **1.7.3.1. Procedimiento para el análisis de información**

Se determinara la ubicación del estudio, en este caso el estudio se realizara en la ciudad de Tarija - Bolivia. Seleccionando las avenidas dentro de la ciudad de Tarija mediante la técnica de muestreo sistemático.

Se efectuara la medición con dos equipos con los que se cuenta en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, que son el Péndulo de Fricción para microtextura y la Mancha de Arena para macrotextura. La medición será puntual cada 20 m aproximadamente en los pavimentos seleccionados, tomando 2 medidas en la huella derecha, 2 medidas en la huella izquierda y 2 medidas entre las huellas por tramo.

Se buscara los valores de los coeficientes obtenidos durante el experimento de la AIPCR para los equipos utilizados (péndulo de fricción y mancha de arena), coeficientes utilizados para la obtención de la constante de velocidad “Sp” y el parámetro de fricción “F60”.

Todos los resultados de Sp y F60 de los 45 tramos serán los datos necesarios para realizar la evaluación con el modelo de IFI de la AIPCR. Para el análisis estadístico de estos datos obtenidos se realizara con la teoría de errores para determinar la confiabilidad de los datos y que estos tengan una buena distribución.

Se graficara la curva “fricción-velocidad de desplazamiento” para obtener la fricción F(S) de la superficie del pavimento a cualquier velocidad de circulación.

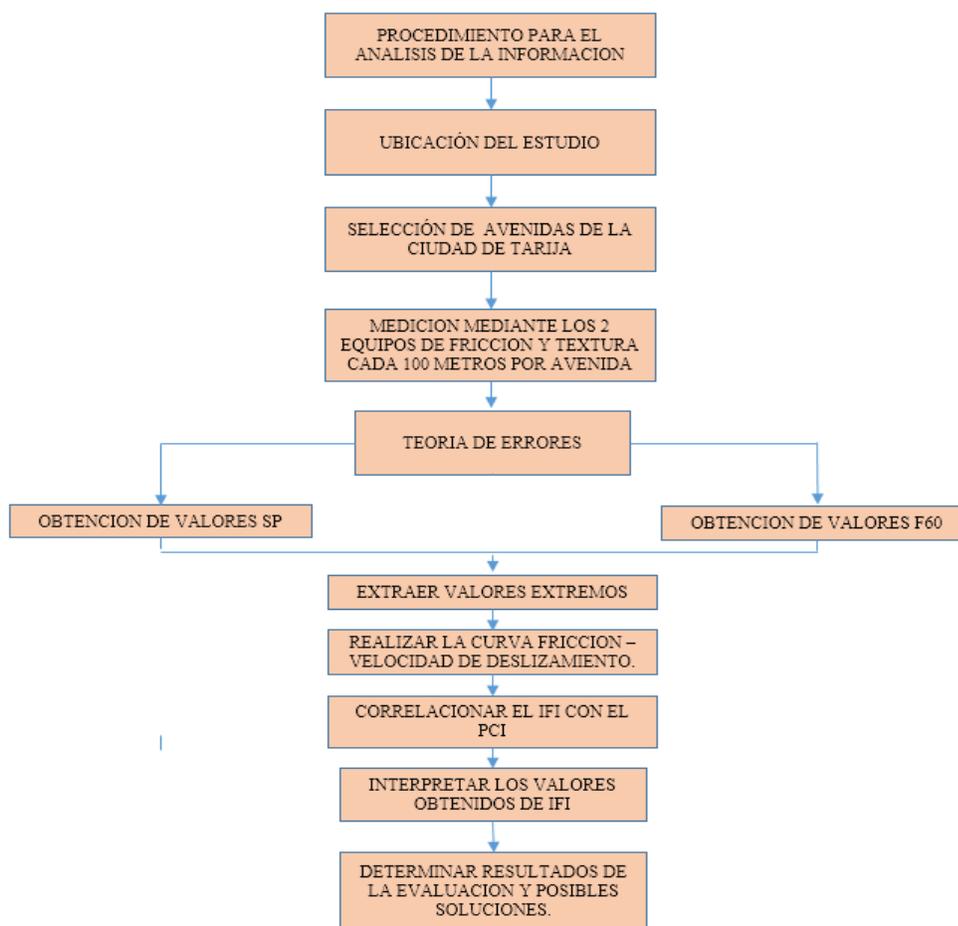
Con los valores obtenidos de  $F(S)$  se realizara una correlación con el PCI para determinar si la textura varía en función de la condición que presenta la superficie del pavimento y mediante la regresión lineal encontrar una ecuación que nos muestre la variación de esta textura en función de la condición del pavimento.

Los datos se los interpretara de acuerdo a experiencia y normas locales y de otros países que consideran el IFI para la evaluación de los pavimentos, tomando en cuenta valores mínimo de resistencia al deslizamiento para distintas velocidades de circulación.

Se realizara la gráfica de aceptación o rechazo de los valores de IFI en función a la fricción y la velocidad, que recomienda la AIPCR en el experimento de armonización de 1995, para obtener el estado en el que se encuentran las superficies del pavimento que fueron usados en el estudio.

Se aplicaran los conceptos referentes al índice de fricción internacional (IFI), presentados en los capítulos anteriores, al establecimiento de valores mínimos estandarizados de fricción y textura que garanticen la seguridad operativa en las carreteras de la ciudad de Tarija y en caso de no contar con los valores mínimos se propondrá algunas alternativas de solución.

### **Figura 1. Procedimiento de análisis de la información**



Fuente: Elaboración Propia

#### 1.7.4. Interpretación de información

Para verificar que los datos obtenidos tengan normalidad se aplicara la teoría de errores, con una probabilidad del 5 % para medidas del círculo de arena y 10 % para medidas del péndulo de fricción. Para esto se deberá calcular los parámetros:

##### Media

Es el cálculo de la suma de distintos valores de x y dividiendo por el número de datos:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Dónde:

X = Media.

$x_i$  = Dato  $i$ .

$n$  = Número de datos.

### **Desviación estándar**

Sin lugar a dudas la medida más usada para estimar la dispersión de los datos es la desviación estándar.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n - 1}}$$

Dónde:

$X$  = Media.

$x_i$  = Dato  $i$ .

$n$  = Número de datos.

$S$  = Desviación estándar

### **1.8. Alcance**

Se realizara la evaluación de la resistencia al deslizamiento superficial con el modelo de IFI de la AIPCR para los pavimentos de 14 avenidas de la ciudad de Tarija, para obtener valores de IFI de 45 tramos a partir de mediciones de textura y fricción de los pavimentos, realizando una investigación teórica de las diferentes experiencias internacionales sobre el uso y aplicación del índice de fricción internacional para el diseño, evaluación y mantenimiento de los pavimentos. Ya que actualmente en el departamento de Tarija no se cuenta con una evaluación que nos indique si la textura y la fricción de nuestro pavimento nos brinda la seguridad necesaria para el tránsito de los vehículos.

Se realizara la introducción y antecedentes a la investigación, definiendo la situación problémica, el problema, justificación y se realizara una investigación de bibliografía disponible para que de esta manera se pueda redactar claramente el objetivo general y los objetivos específicos. Que nos servirán de guía para realizar el proceso metodológico y definir el cronograma que se desarrollara en el presente estudio de aplicación.

Se investigara toda la bibliografía disponible que sirva para completar los objetivos de la investigación, información sobre los pavimentos y tipos de pavimentos, características superficiales y evaluación de pavimentos. A demás de información sobre normas internacionales de IFI que están vigentes y normas que se aplican en algunos países internacionales.

El modelo AIPCR que será el que se realizara en este proyecto y otro como el modelo de Pensilvania que sirve como referencia. Se encontraran los diferentes equipos y técnicas que se utilizan para la determinación de los parámetros principales del IFI, que son la textura y la fricción. En este estudio se utilizara la mancha de arena para la medición de la textura y las péndulas ingles de fricción para la medición de la fricción o microtextura.

Se aplicará toda la información de modelos de IFI y experiencias internacionales sobre el uso y aplicación del índice de fricción, en la evaluación de la resistencia al deslizamiento superficial con el modelo de IFI para pavimentos de la ciudad de Tarija, determinando la ubicación de la región y de las 14 avenidas que serán utilizadas para el estudio, se escogerán los equipos para realizar las mediciones (circulo de arena y péndulo ingles de fricción) estas mediciones se las realizara cada 20 metros aproximadamente en los 45 tramos para obtener los datos de textura y fricción. Datos que serán analizados mediante la estadística para poder verificar su homogeneidad y normalidad con la teoría de errores, para determinar los valores de IFI para pavimentos de las avenidas de la ciudad de Tarija, la constante de velocidad ( $S_p$ ) y la constante de fricción  $F_{60}$  se usara los coeficientes recomendados por la AIPCR tomando en cuenta el efecto de la temperatura además del uso de la curva de Fricción – velocidad de deslizamiento. Se determinara el estado de la superficie de los pavimentos urbanos mediante la interpretación de la gráfica de aceptación o rechazo recomendado por la AIPCR que está en función de la fricción y de la macrotextura.

Se realizara una correlación entre el índice de fricción internacional IFI y el índice de condición de pavimento PCI, para obtener la variación de la fricción con respecto al grado de condición del pavimento y así poder determinar una ecuación que nos permita saber el estado de la fricción al realizar una evaluación de la condición del pavimento. De esta

manera conocer si los pavimentos requerirán de alguna acción o tratamiento de conservación para mejorar las condiciones de operación.

De esta manera llegar a la conclusión de lograr una evaluación de la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos de la ciudad de Tarija, que podrá servir como base de datos y de referencia para futuras investigaciones que puedan determinar el modelo para implementar este índice al diseño, evaluación y mantenimiento de pavimentos de Bolivia.

## **CAPÍTULO 2. ASPECTOS GENERALES SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE**

### **2.1. Pavimentos**

Se define al pavimento como la estructura formada por varias capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la sub-rasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas

que el tránsito le transmite durante el período para el cual fue diseñada la estructura del pavimento. (Montejo Fonseca, 1998)

Un pavimento de una estructura, asentado sobre una fundación apropiada, tiene por finalidad proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confortable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática. Hay una gran diversidad de tipos de pavimento, dependiendo del tipo de vehículos que transitaran y del volumen de tráfico. (Cueva del Ingeniero, 2017)

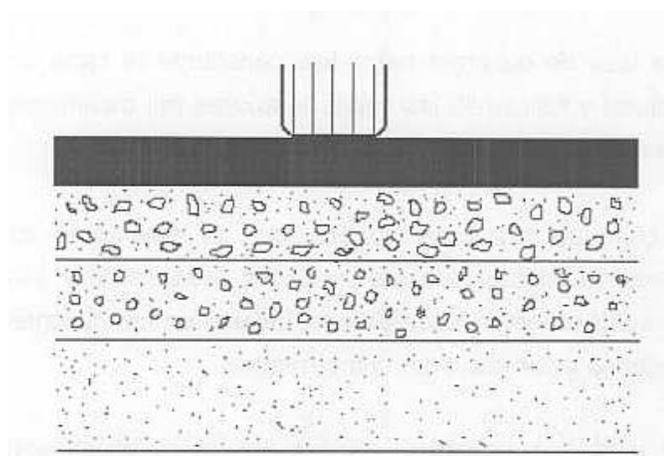
### 2.1.1. Tipos de pavimentos

#### 2.1.1.1. Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles están formados por una serie de capas (sección estructural) constituidas por materiales con resistencia y deformabilidad decreciente con la profundidad, de modo análogo a las disminuciones de las presiones transmitidas desde la superficie. La carpeta asfáltica es la parte superior del pavimento, soporta directamente las solicitaciones del tránsito y aporta las características funcionales de la carretera. Estructuralmente, absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los esfuerzos verticales (Figura 2).

Si la mezcla asfáltica no tiene las características reológicas adecuadas, puede darse incluso una verdadera fluencia del material. Este fenómeno tiene su manifestación más típica en las denominadas roderas, que son deformaciones plásticas longitudinales que se pueden llegar a producir en determinadas zonas de rodamiento de los vehículos pesados o por la canalización excesiva del tránsito. En ocasiones, el fenómeno de deformaciones plásticas se pone de manifiesto mediante ondulaciones o resaltos transversales. (Arriaga Patiño & Garnica Anguas, 1998)

**Figura 2. Conformación típica de un pavimento flexible**



Carpeta asfáltica.

Base hidráulica.

Subbase.

Subrasante.

Cuerpo del terraplén.

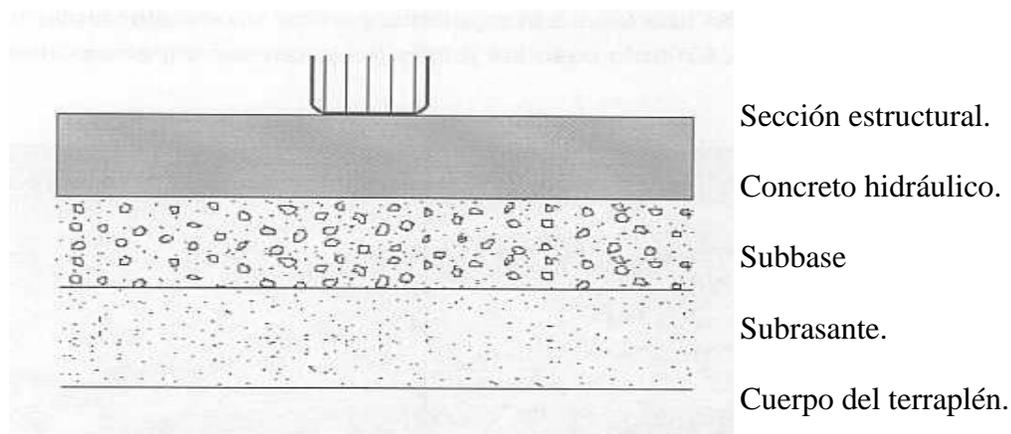
Fuente: Diagnóstico de las características superficiales de los pavimentos (Arriaga Patiño & Garnica Anguas, 1998)

### 2.1.1.2. Pavimentos rígidos

Son aquellos en los que la losa de concreto de cemento Portland (C.C.P.) es el principal componente estructural, que alivia las tensiones en las capas subyacentes por medio de su elevada resistencia a la flexión, cuando se generan tensiones y deformaciones de tracción de bajo la losa producen su fisuración por fatiga, después de un cierto número de repeticiones de carga. La capa inmediatamente inferior a las losas de C.C.P. denominada sub-base, por esta razón, puede ser constituida por materiales cuya capacidad de soporte sea inferior a la requerida por los materiales de la capa base de los pavimentos flexibles. (Araujo & Rangel, 2016)

La losa de concreto de cemento portland constituye la capa de mayor responsabilidad estructural y funcional; las capas inferiores del pavimento tienen por misión asegurar un apoyo uniforme y estable para la losa (Figura 3). (Arriaga Patiño & Garnica Anguas, 1998)

**Figura 3. Conformación típica de un pavimento rígido**



Fuente: Diagnóstico de las características superficiales de los pavimentos (Arriaga Patiño & Garnica Anguas, 1998)

### **2.1.1.3. Pavimentos urbanos y pavimentos rurales**

Los pavimentos urbanos son todas aquellos pavimentos de calles, urbanización, rotondas, paradas de autobuses, carril de bicis, zonas deportivas – infantiles y aparcamientos. Estos pavimentos están sometidos a un gran desgaste por las maniobras constantes de los vehículos y/o el tráfico de los usuarios, además requieren de características adicionales de resistencia y durabilidad. Así mismo estos pavimentos suelen precisar de acabados estéticos especiales adaptados a la señalización y diseño de la ciudad.

Los pavimentos rurales son todos aquellos caminos rurales, vías agrarias, vías verdes y ecológicas, acceso a fábricas y caminos particulares. Se requiere de un pavimento resistente y durable que no solo se adapte al uso continuado de todo tipo de vehículos, sino además tenga un buen comportamiento ante la acción de los fenómenos meteorológicos, como los cambios de temperatura, la lluvia, el viento o el hielo, sin olvidar el máximo respeto por el entorno natural en el que se encuentra. (Palomino, 2017)

De acuerdo a la norma francesa de resistencia al deslizamiento, una característica fundamental de los pavimentos rurales es la velocidad de circulación mayor a 90 km/h al ser vías que conectan poblaciones y los pavimentos urbanos se caracterizan por tener velocidades de circulación que no superan los 90 km/h. (Leiva, 2017)

## **2.2. Características superficiales, influencia en la interacción vehículo – pavimento**

Los requerimientos actuales del transporte a nivel mundial se muestran cada vez más exigentes con respecto a las características que deben satisfacer los pavimentos en cuanto a su relación con los aspectos de orden económico, principalmente los que concurren para la determinación del costo del transporte. Adicionalmente, el avance tecnológico de la industria automotriz ha introducido innovaciones en los vehículos, modificando velocidades, geometrías, carrocerías, sistemas de suspensión, etc., que han afectado en alguna forma las interrelaciones entre vehículo-pavimento-usuario.

A todo ello se suman las exigencias de estos últimos, que demandan pavimentos con superficies capaces de desarrollar adecuadas resistencias al deslizamiento, en condiciones de pavimento mojado, alta velocidad y llantas lisas; con características apropiadas para desalojar rápidamente el agua superficial evitando peligrosas y molestas salpicaduras de agua; con superficies exentas de irregularidades que provoquen oscilaciones molestas y peligrosas sobre todo a altas velocidades, sin roderas y que permitan un desplazamiento silencioso dentro y fuera de los vehículos, económico y con buenas cualidades de visibilidad.

Para este propósito, se ha tenido que desarrollar una tecnología específica, relativa a la investigación de las características superficiales que directamente afectan a los aspectos funcionales del pavimento y sus implicaciones con relación a la interacción entre pavimento-vehículo-usuario, constituyendo un problema complejo, en el que está de por medio el perfil del pavimento que debe caracterizarse por un modelo matemático apropiado, del desarrollo de otro modelo matemático para representar las características de la suspensión de los vehículos, que conjuntamente con el primer modelo, permita predecir la respuesta dinámica del vehículo y finalmente un conocimiento de las reacciones humanas ante el movimiento, para lo cual ha sido necesario emprender una profunda investigación sobre los parámetros que caracterizan las irregularidades o rugosidad de la superficie de los pavimentos, tales como su longitud y amplitud de onda y frecuencia.

La interacción vehículo-pavimento conduce a que las irregularidades superficiales influyan en mayor o menor grado en determinadas características superficiales que afectan al usuario, las cuales se clasifican de acuerdo con las longitudes de onda y amplitudes de las irregularidades de la superficie, definiéndose los conceptos de microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidad superficial o de planicidad. En la tabla N° 6 se presenta la clasificación de las (CSP), propuesta por el Comité Técnico de CSP de la AIPCR y en la figura 4 se muestran los campos de influencia de las irregularidades superficiales sobre las interacciones pavimento - vehículo. (Zarate Aquino, 1996)

**Tabla N° 6. Clasificación de las irregularidades superficiales de un pavimento**

Dominio	Rango de dimensiones
---------	----------------------

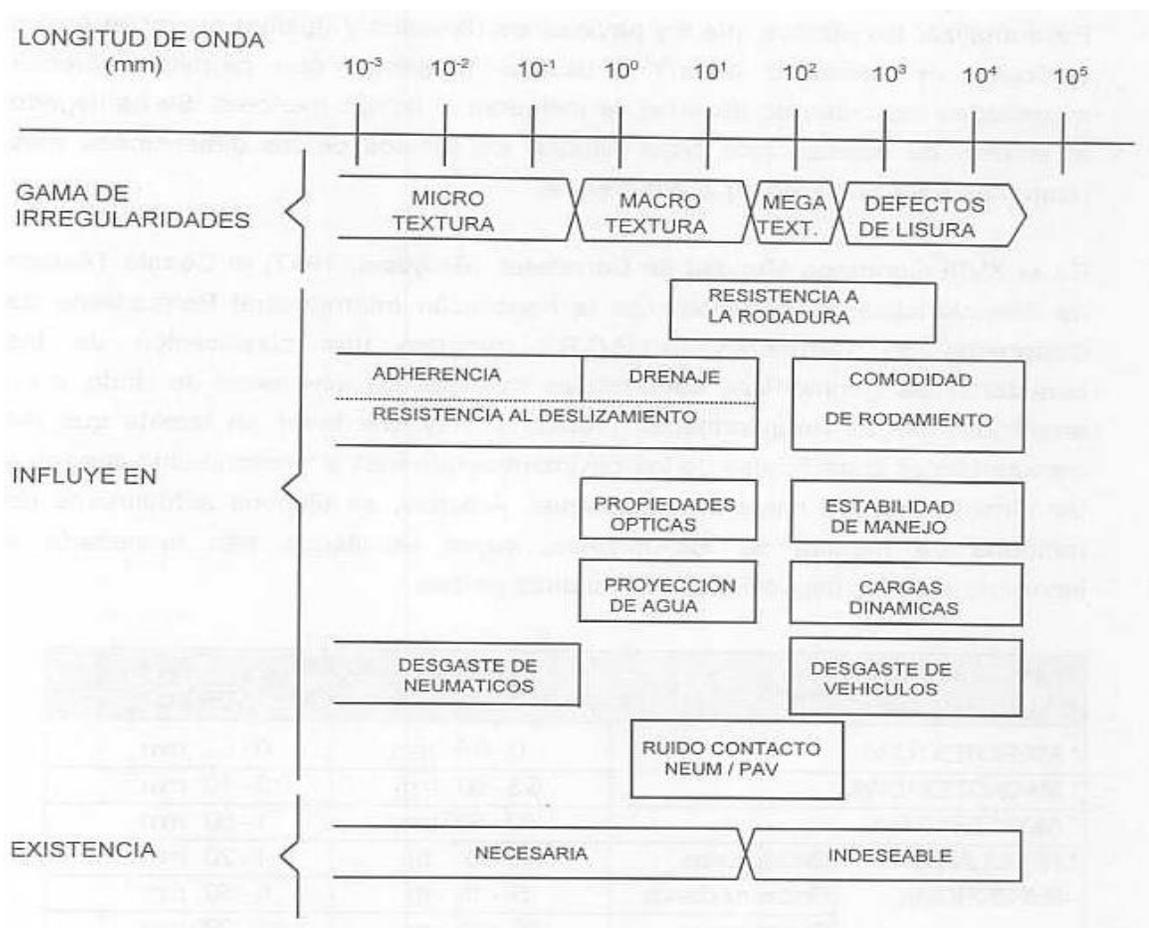
		<b>Longitud de onda (horizontal)</b>	<b>Amplitud (vertical)</b>
Microtextura		0 - 0,5 mm	0 - 0,2 mm
Macrotextura		0,5 - 50 mm	0,2 - 10mm
Megatextura		50 - 500mm	1 - 50 mm
Irregularidades superficiales	Ondas cortas	0,5 - 5 m	1 - 20 mm
	Ondas medias	5 - 15 m	5 - 50 mm
	Ondas largas	15 - 50 m	10 - 200 mm

Fuente: Características superficiales de los pavimentos asfálticos (Zarate Aquino, 1996)

La microtextura es función de la textura superficial de los agregados pétreos y del mortero asfáltico o de cemento. Es muy importante para la adherencia entre llanta y pavimento y por lo tanto para la resistencia al deslizamiento, en todas las circunstancias de superficie seca o mojada. Influye en el desgaste de las llantas y algo en el ruido en las altas frecuencias del espectro acústico. Las irregularidades de este tipo son siempre necesarias.

La macrotextura depende de la composición de la mezcla, riego o mortero asfáltico o del tratamiento de superficie dado a las losas de concreto (ranurado, denudado, etc.). Los deterioros tales como desprendimientos de agregados, grietas y juntas solo contribuyen cuando ocurren en casos frecuentes o si hay deformación notable.

**Figura 4. Campos de influencia de las irregularidades superficiales del pavimento sobre las interacciones carretera – vehículo**

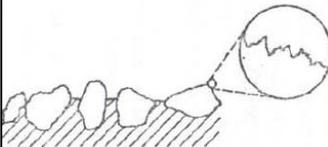
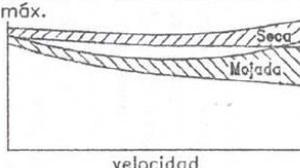
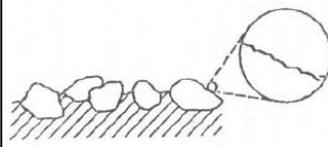
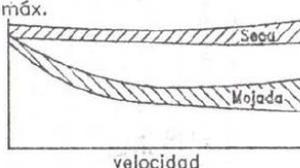
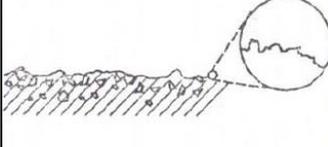
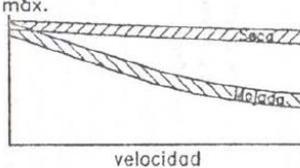
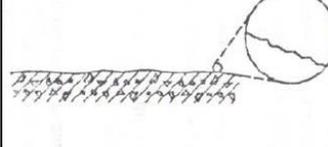
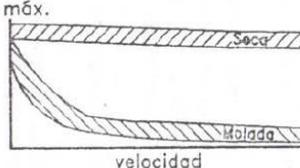


Fuente: Características superficiales de los pavimentos asfálticos (Zarate Aquino, 1996)

Esta característica es necesaria para una adecuada resistencia al deslizamiento a velocidad media y elevada con pavimento mojado. Además de la fricción por deformación relacionada con la histéresis elástica del hule, la rugosidad permite reestablecer el contacto con adherencia a alta velocidad. De este modo y mientras en zona urbana (velocidades moderadas) es adecuada una macrotextura moderada y una microtextura áspera, en carreteras será conveniente que exista además una macrotextura rugosa. En la figura 5 se ilustra el efecto de la textura superficial sobre el coeficiente de deslizamiento llanta - superficie. La figura 6 muestra el efecto de la expulsión de agua por medio de la macrotextura, distinguiéndose tres zonas de contacto entre la llanta y el pavimento. Es importante crear mediante una macrotextura adecuada, las condiciones para la rápida expulsión de agua, de manera que se incremente la superficie en la zona 3. Debe tenerse

presente que la resistencia al deslizamiento es fundamental para el control del vehículo (arranque, aceleración, giro, parada). (Zarate Aquino, 1996)

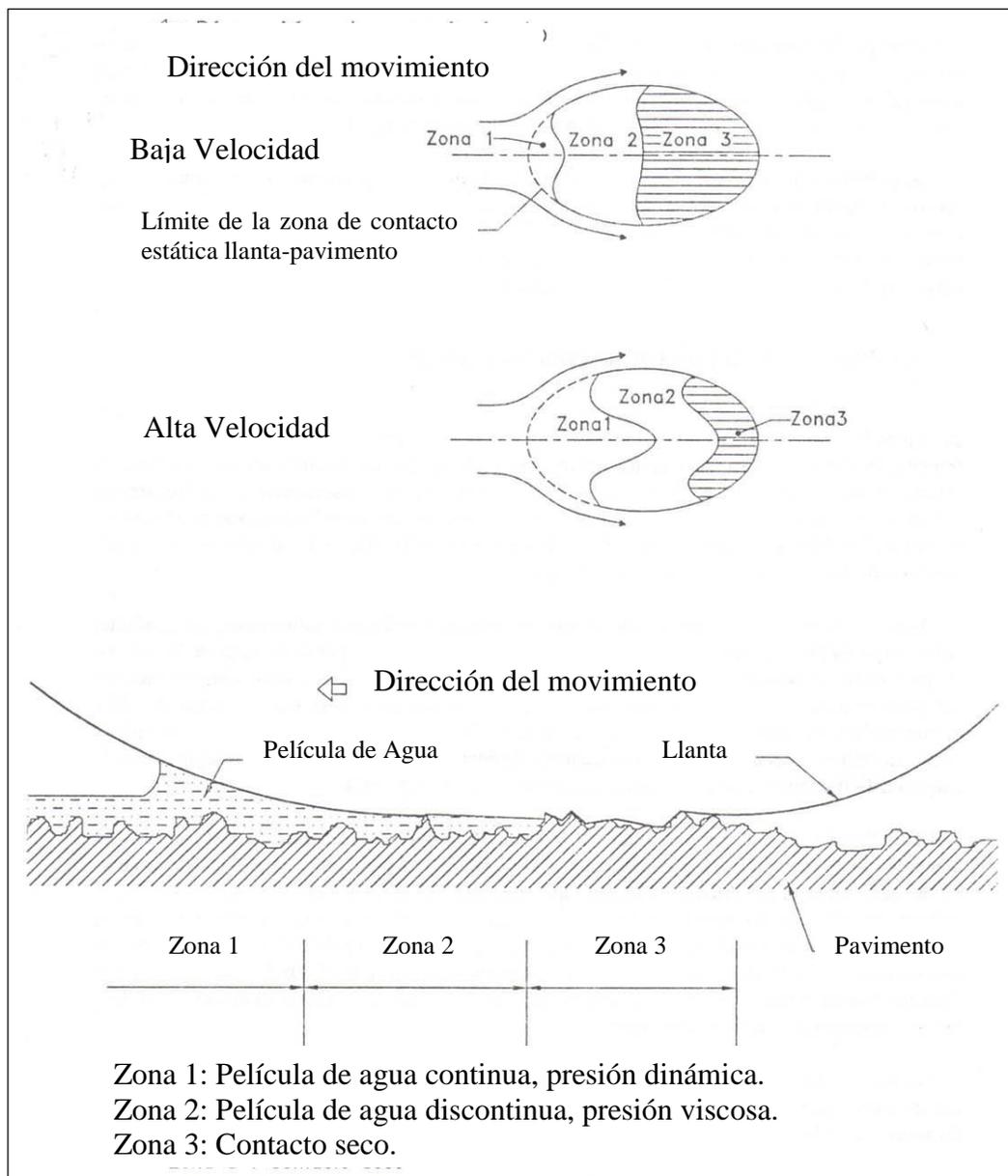
**Figura 5. Efecto de la textura de la superficie sobre el coeficiente de deslizamiento llanta-superficie**

Características de la superficie		Tendencias aproximadas del coeficiente máximo de deslizamiento llanta-superficie, correspondientes a llantas LISAS	
Macrotexturas	Microtexturas		
<p>Las superficies de macro textura ABIERTA proporcionan un buen drenaje en la zona de contacto llanta-superficie. En superficie mojada, el valor se disminuye gradualmente a medida que aumenta la velocidad. Las ranuras de la llanta no influyen mucho. A gran velocidad se puede aumentar debido a los efectos de histéresis</p>			
		<p>La micro textura ASPERA permite una considerable penetración de la película delgada del líquido; el nivel de resistencia al deslizamiento es elevada</p>	
<p>Las superficies de macro textura CERRADA ofrecen un escaso drenaje en la zona de contacto. En superficie mojada, los valores se disminuyen rápidamente con el aumento de la velocidad. Las ranuras de la llanta son eficaces</p>		<p>La micro textura ASPERA permite una considerable penetración de la película delgada del líquido; el nivel de resistencia al deslizamiento es elevada</p>	
		<p>La micro textura LISA o PULIDA presenta escasas posibilidades de penetración para las películas delgadas y generalmente el nivel de resistencia al deslizamiento que se produce es bajo</p>	

Fuente: Características superficiales de los pavimentos asfálticos (Zarate Aquino, 1996)

La macrotextura tiene una pequeña influencia en el consumo de combustible al aumentar la resistencia al rodamiento, que puede estar compensada por una ligera disminución de la velocidad de circulación. Mejora la visibilidad y las propiedades ópticas del pavimento al reducir las proyecciones de agua y producir una reflexión difusa. Un drenaje más eficaz permite asimismo una mejor visibilidad de las marcas viales.

**Figura 6. Zonas de contacto llanta-pavimento en condiciones de piso mojado**



Fuente: Características superficiales de los pavimentos asfálticos (Zarate Aquino, 1996)

Puede definirse además la macrotextura positiva y la negativa. La primera es la general típica de los tratamientos superficiales, formando capas impermeables; la segunda se refiere a las carpetas permeables. Ambas ofrecen, en diferente grado las ventajas mencionadas, sin embargo son muy diferentes en lo referente al ruido. Mientras que la macrotextura positiva aumenta el ruido en todas las frecuencias, las mezclas porosas llegan a disminuir sensiblemente el nivel de ruido, no solo en el contacto rueda/pavimento sino el debido al motor, por absorción acústica.

La megatextura corresponde a irregularidades de tipo intermedio, relacionadas con la construcción y también a diversos tipos de fallas y degradaciones o reparaciones.

Esta gama de irregularidades aumenta en particular la resistencia al rodamiento y el nivel de ruido con frecuencias bajas. El desplazamiento es más incómodo, con vibraciones y dificultades para mantener la estabilidad de avance. Contribuye además en el desgaste de los vehículos incluidos las llantas.

Las irregularidades se reflejan en ondas de diferente longitud debidas a deficiencias constructivas en el tendido, compactación, guiado de la extendedora, etc.

A deformaciones por efecto del tránsito o a deformaciones del suelo en profundidad. Estas irregularidades afectan a la comodidad del rodamiento por las vibraciones que producen, aumentan el consumo de combustible e influyen en la estabilidad de los vehículos. Cuanto mayor es la velocidad del usuario, más le afectan las irregularidades de gran longitud de onda. Las ondas cortas-medias producen una oscilación de las cargas sobre las ruedas dando lugar a cargas dinámicas y a una variación de la adherencia movilizable.

Como puede observarse en la figura 4, las (CSP) definidas en los campos de la micro y macrotextura son en general deseables. Por otro lado, las clasificadas en los campos de la megatextura e irregulares mayores son en general indeseables y deben evitarse; puesto que también tienen implicaciones económicas importantes, de la misma manera en que se muestra en la figura 7.

Las (CSP) por lo tanto, deben ser motivo de preocupación no solamente para los usuarios, por ser los afectados directamente en los aspectos de seguridad, comodidad y economía, sino también para proyectistas constructores y encargados de la operación y conservación de los pavimentos y deben ser incluidas en los proyectos de los pavimentos, por las implicaciones que tienen sobre sus atributos principales en los aspectos funcionales y económicos. (Zarate Aquino, 1996)

### **2.3. Características superficiales de las carpetas asfálticas**

Como es sabido, los pavimentos asfálticos o flexibles son los más utilizados en todo tipo de vialidades, con sus diferentes modalidades o tipología adaptados a diferentes condiciones de tránsito, facilidades de carácter constructivo, de conservación, etc,

incluyendo en ocasiones la rehabilitación y refuerzo de pavimentos rígidos mediante la construcción de sobre carpetas asfálticas. Por lo tanto, es importante conocer las características superficiales que pueden obtenerse con los diferentes tipos de carpetas asfálticas, para utilizarlas en las condiciones más eficientes bajo las diversas circunstancias prácticas.

Debe reconocerse que algunas características pueden conducir a situaciones de conflicto, como por ejemplo en el caso de la macrotextura, necesaria desde el punto de vista de la adecuada resistencia al deslizamiento, pero que en situaciones en que es necesario obtener mejores condiciones para operación en tiempo lluvioso, se puede caer en niveles más elevados de ruido, lo que redundaría en menor comodidad para el usuario. De esta manera surgen casos en los que es necesario valorar adecuadamente las situaciones de compromiso que surjan, para elegir el tipo de carpeta asfáltica que mejor convenga a cada caso en particular.

La figura 8, proporciona una idea sobre la forma en que el coeficiente de deslizamiento es afectado por las características superficiales, la velocidad del vehículo y el espesor de la lámina de agua sobre el pavimento. A medida que aumenta la velocidad en pavimento mojado, se reducen las áreas de las zonas 2 y 3 de la figura 6, llegando a desaparecer, situación en la que la llanta pierde contacto con el pavimento y se desliza sobre una película de agua, fenómeno denominado acuaplaneo y que ocurre a velocidades superiores a 75 km/hr, de acuerdo con investigaciones al respecto. De ahí la importancia de desalojar rápidamente el agua bajo la llanta con texturas superficiales adecuadas.

Por lo que respecta al ruido y coeficiente de deslizamiento, en la figura 9 se presentan los campos de nivel sonoro y del coeficiente de deslizamiento para diferentes tipos de carpetas, incluyendo adoquines y losas de concreto hidráulico.

**Figura 7. Relación entre las características superficiales del pavimento y los factores de consumo de energía y costos de operación, accidentes y ambientales**

Rugosidad de 1 <sup>er</sup> orden microrrugosidad	Rugosidad de 2 <sup>do</sup> orden macrorrugosidad	Rugosidad de 3 <sup>er</sup> orden megarrugosidad
---	---	--

Superficie de los agregados, mortero asfáltico, mortero de cemento.	Granulometría, distribución de los agregados, ranuras, fisuras finas, canales de drenaje y porosidad.	Irregularidad superficial, baches, juntas, grietas anchas, roderas, falta de revestimiento, efectos aerodinámicos
Desgaste de llantas	Costos de combustibles y lubricantes	
	Desgaste del vehículo	
		Costos de mantenimiento degradación de las llantas
Costos adherencia ( todas las velocidades )	De adherencia ( velocidades media y elevada )	Llantas estabilidad del vehículo
Costos de accidentes		
ruidos alta frecuencia	ruidos baja frecuencia	ruidos intermitentes
Costos de medidas anti ruido		

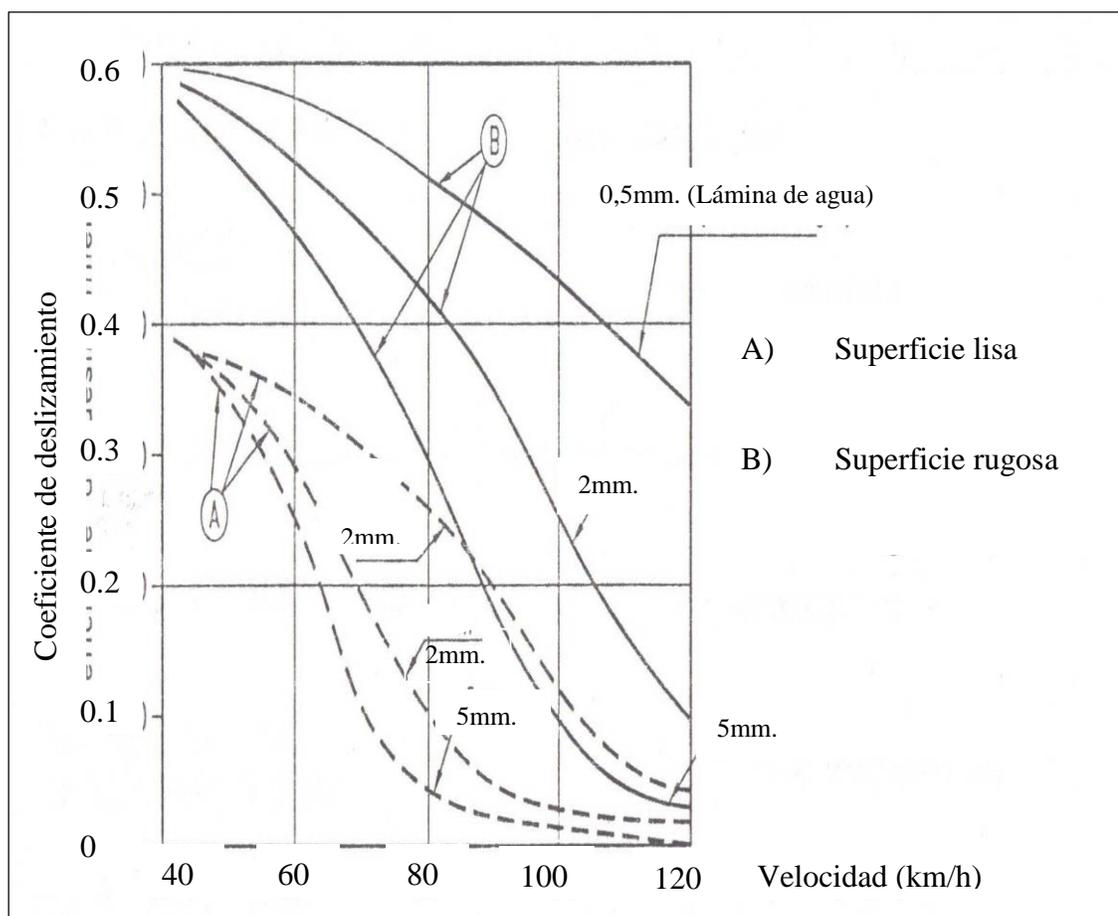
Fuente: Características superficiales de los pavimentos asfálticos (Zarate Aquino, 1996)

Estos dos aspectos, ruido y fricción, llegan a presentar situaciones de conflicto, por lo que se deben valorar adecuadamente para elegir lo más conveniente. En esta figura se indican los niveles de ruido que causan incomodidad y molestia al usuario, destacando el comportamiento de cada tipo de carpeta con respecto a la generación de ruido y los niveles del coeficiente de deslizamiento entre llanta y pavimento.

Finalmente, en la figura 10 se presenta un cuadro que resume las características relativas a los diferentes tipos de carpetas y tratamientos superficiales asfálticos más utilizados, incluyendo el campo de aplicación más recomendable para cada una de ellas. En esta figura se resalta la posibilidad que se presenta actualmente de elegir adecuadamente las características superficiales de los pavimentos, en función de las condiciones

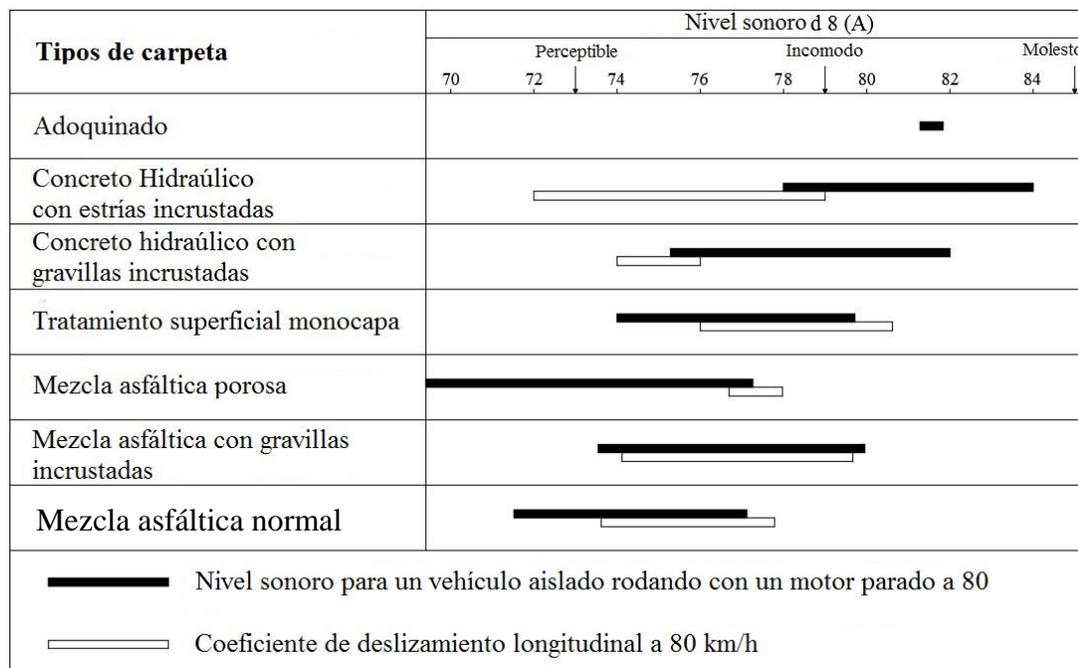
prevalientes de tránsito, velocidad de operación, volumen de vehículos pesados, etc., e inclusive para las condiciones geométricas de la carretera, como sinuosidad y pendiente, de tal manera que se ofrezca al usuario las condiciones adecuadas de seguridad, comodidad y economía que requiere. Debe finalmente insistirse en que la calidad de la ejecución de la obra es muy importante y si se aparta de la práctica de una buena construcción, puede malograrse el objetivo deseado. (Zarate Aquino, 1996)

**Figura 8. Efecto de la macrotextura sobre el coeficiente de deslizamiento**



Fuente: Características superficiales de los pavimentos asfálticos (Zarate Aquino, 1996)

**Figura 9. Comparación de los campos de nivel sonoro y coeficiente de deslizamiento longitudinal en diversos pavimentos**



Fuente: Características superficiales de los pavimentos asfálticos (Zarate Aquino, 1996)

**Figura 10. Características de los principales tipos de carpetas asfálticas**

Tipo de carpeta		Adherencia a velocidad		Regularidad inicial	mitigación de ruido	Propiedades ópticas		Reducción de proyección de agua	Facilidad de conservación	Impermeabilidad	Aplicación preferente
		Lenta	Rápida			Seco	Mojado				
Tratamientos superficiales	Textura gruesa	○	○	1	◐	◑	◒	◓	○	◑	Carreteras de alta velocidad
	Especiales con textura fina (2)	○	○	1	◑	◒	◓	◔	◑	○	Vialidades urbanas, carreteras
Clave ○ Muy bueno ◐ Bueno ◑ Regular ◒ Rechazable											
						1	Depende de la superficie de apoyo				
						2	Por ejemplo lechadas con resina				

Fuente: Características superficiales de los pavimentos asfálticos (Zarate Aquino, 1996)

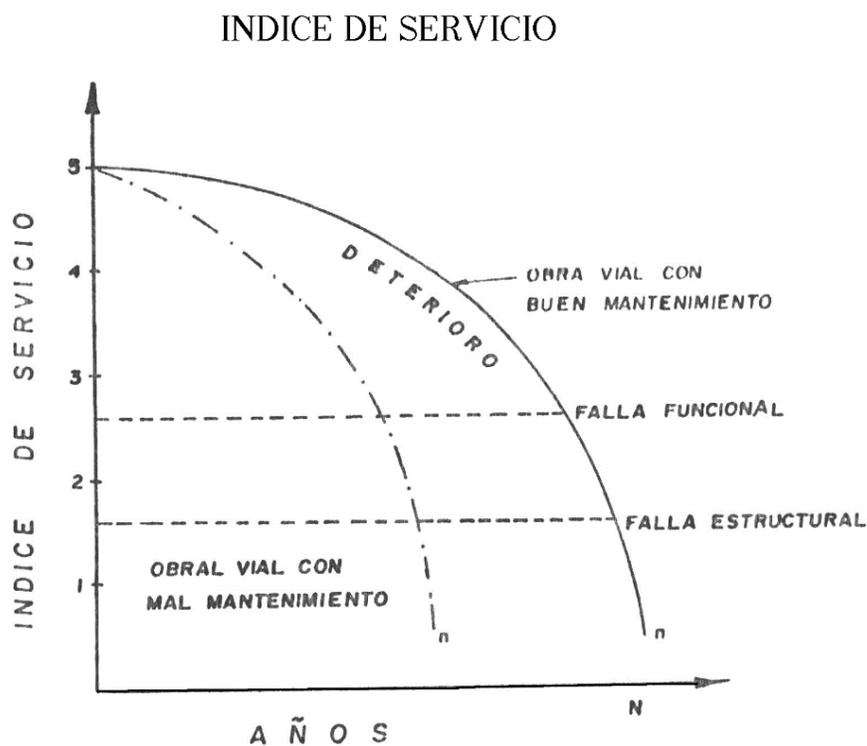
## 2.4. Evaluación de pavimentos

Las vías terrestres se planean y se construyen para que estén en servicio un determinado número de años (como mínimo), que se llama vida útil de la obra.

Al estar en operación una obra vial, se va deteriorando, presentando diferentes condiciones de servicio a través de los años. Los deterioros que se van teniendo, al principio pueden ser pequeños, pero pueden ser la causa de problemas serios en la obra vial, que aceleren su falla, por lo que para que una obra proporcione un servicio adecuado requiere de mantenimiento o conservación, que cuando menos asegure su vida de proyecto.

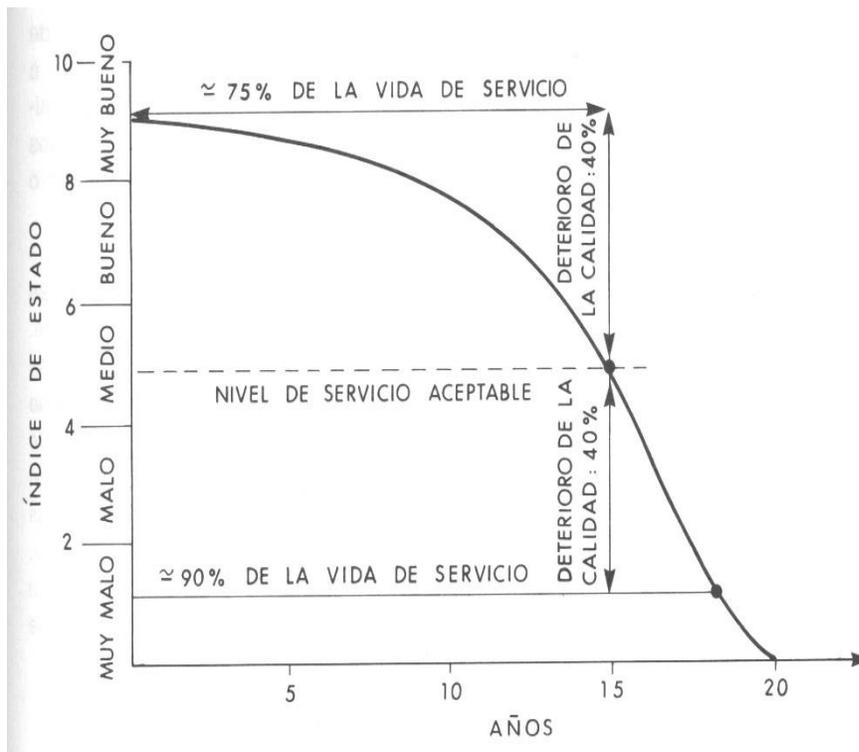
El deterioro que se va teniendo en las obras viales, se va observando y se le asigna una calificación, dándole un valor de 1 a 5 que se llama índice de servicio. Cuando una obra se pone a funcionar, recién construida, debe tener una calificación entre 4.5 y 5, la cual va disminuyendo conforme pasa el tiempo (n), y según el tipo de mantenimiento que este tenga. Figura 11.

**Figura 11. Índice de servicio de un pavimento**



Fuente: Estructuración de vías terrestres (Olivera Bustamante, 2011)

**Figura 12. Ejemplo de evolución del índice de estado del pavimento**



Fuente: Estructuración de vías terrestres (Olivera Bustamante, 2011)

La evaluación de pavimentos es una tarea muy importante, que cada institución dedicada al mantenimiento y conservación de las vías (caminos, calles, autopistas) debe realizar, con el único propósito de detectar las posibles fallas o anomalías que pudiera presentar una determinada vía, para luego ver la mejor alternativa de solución en caso de necesitarla, de tal forma poder seguir dando una continuidad de operación a dicha vía. (Olivera Bustamante, 2011)

#### **2.4.1. Tipos de evaluación de pavimentos**

Para evaluar pavimentos, se puede decir que ésta evaluación se la subdivide en:

**Evaluación superficial**

**Evaluación estructural**

### **2.4.2. Evaluación superficial**

El trabajo de la evaluación superficial de un pavimento flexible, implica la observación y cuantificación de las características superficiales del pavimento, vale decir la capa asfáltica, desde el momento que este pavimento se pone en servicio.

Este tipo de evaluación debe basarse en:

- Muestras aleatorias del tramo vial en estudio, con el fin de reducir la inspección visual.
- Evaluar objetiva y cuantitativamente las condiciones superficiales del pavimento.
- Utilizar métodos y equipo adecuados para realizar la evaluación.

Por otro lado se debe tener en cuenta una inspección visual continua, porque un pavimento flexible o rígido no falla instantáneamente, sino que su deterioro va aumentando en forma continua.

Con una inspección visual sistemática se detecta las fallas existentes en la superficie del pavimento, dichas fallas pueden ser originadas por solicitaciones de los vehículos, fallas constructivas y por efectos climáticos. (Medina Palacios & De la Cruz Puma, 2015)

Los objetivos de la observación sistemática son:

- Detectar los posibles tipos de deterioros o fallas.
- Fijar prioridades dentro un programa de mantenimiento para el tramo en estudio.
- Analizar el comportamiento del pavimento en vista de mejoras o reconstrucción.

#### **2.4.2.1. Índice de condición del pavimento PCI**

El PCI es un índice numérico, que varía de 0 para pavimentos fallados, a 100 para pavimentos en perfectas condiciones. El cálculo del PCI está basado en los resultados de una inspección visual de la superficie en la cual el tipo de anomalía, severidad y cantidad son identificadas. El PCI fue desarrollado para proporcionar un índice de la integridad estructural del pavimento y condición operacional de la superficie. La información de anomalías obtenida como la parte del estudio de la condición de PCI proporciona una visión de las causas de anomalía, y si es relativo a la carga o al clima.

El grado de deterioración del pavimento es una función del tipo de anomalía, severidad de anomalía, y cantidad o densidad de anomalía. Debido al número grande de condiciones

posibles, producir un índice que tendría en cuenta los tres factores era un problema considerable. Para superar este problema, “los valores deducidos” se introdujeron como un tipo de factor clave para indicar el grado de efecto que cada combinación de tipo de anomalía, nivel de severidad y la densidad de anomalía tiene la condición del pavimento.

El grado de deterioro de un pavimento está en función de:

El tipo de falla.

La severidad de la falla (ancho de las grietas, etc.).

La densidad de la falla (% del área afectada).

$$PCI = 100 - \left[ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{m_i} VD(T_i, S_j, D_{ij}) \right] * F \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

PCI = Índice de Condición de pavimento.

VD = Valor de deducción, en función del tipo de falla (Ti), severidad (Sj), y densidad de fallas (Dij) observables en el pavimento.

I = Tipos de falla.

J = Grados de severidad.

P = Número de fallas en el pavimento analizado.

Mi = Grados de severidad para la falla “i”.

F = Factor de ajuste, en función de la sumatoria total y el número de valores de deducción mayores que 2.

### **Tipos de fallas**

A continuación se muestran las distintas fallas que se presentan en los pavimentos flexibles, los cuales consideraremos en el método PCI (tabla N° 7). Y para pavimentos rígidos en la tabla N °8.

**Tabla N °7. Fallas frecuentes en los pavimentos flexibles**

Falla n°	Descripción	Unidad
1	Grieta Piel de cocodrilo	m <sup>2</sup>
2	Exudación de Asfalto	m <sup>2</sup>
3	Grietas de Contracción	m <sup>2</sup>
4	Elevaciones – Hundimiento	m
5	Corrugaciones	m <sup>2</sup>
6	Depresiones	m <sup>2</sup>
7	Grietas de Borde	m
8	Grietas de Reflexión de Juntas	m
9	Desnivel Calzada – Hombrillo	m
10	Grietas Longitudinales y Transversales	m
11	Baches y Zanjas Reparadas	m <sup>2</sup>
12	Agregado Pulidos	m <sup>2</sup>
13	Huecos	N
14	Acceso a Puentes - Rejillas de Drenajes	m <sup>2</sup>
15	Ahuellamiento	m <sup>2</sup>
16	Deformación por Empuje	m <sup>2</sup>
17	Grietas de Deslizamiento	m <sup>2</sup>
18	Hinchamiento	m <sup>2</sup>
19	Disgregación y Desintegración	m <sup>2</sup>

Fuente: Pavement management for airports, roads and parking lots (Shahin, 2005)

Antes de describir individualmente cada tipo de falla, es importante aclarar algunos puntos que generalmente presentan duda con respecto a la forma de medición de distintas fallas:

Si están presentes la grietas piel de cocodrilo y ahuellamiento en la misma área, ambas fallas se miden separadamente.

- Si el pavimento presenta exudación, el agregado pulido no se cuenta en la misma área.
- Si existen grietas en los bordes de una falla de elevación – hundimiento, estas se miden separadamente.
- Fallas en un bache no se cuentan, ellas sólo afectan la severidad del bache.

Los huecos se miden por número de huecos con una determinada área y no como área total.

En algunos casos se requiere entender como es afectada la calidad de rodaje por diversos tipos de falla a fin de determinar su severidad.

En el caso de pavimentos rígidos se analizan y se contabilizan los tipos de falla por cada losa construida, y de esta manera se determina la densidad de fallas de acuerdo al número de losas afectadas por las diferentes fallas.

**Tabla N° 8. Fallas frecuentes en pavimentos rígidos**

<b>Falla n°</b>	<b>Descripción</b>
1	Hinchamiento / Pandeo
2	Ruptura de esquina
3	Losa dividida
4	Agrietamiento de durabilidad
5	Falla
6	Daño del sello de junta
7	Caída extrema de Vía / hombrera
8	Agrietamiento lineal
9	Parchado grande y corte de utilidad
10	Parchado pequeño
11	Agregado pulido
12	Baches
13	Bombeo
14	Perforación de punzón
15	Cruce de ferrocarril
16	Escamadura / Agrietamiento de mapa/dilapidado
17	Grietas de contracción
18	Escamadura de esquina
19	Escamadura de junta

Fuente: Pavement management for airports, roads and parking lots (Shahin, 2005)

El efecto sobre la calidad de rodaje es:

**BAJO:** Las vibraciones o saltos en el vehículo se sienten, pero no es necesario reducir la velocidad por razones de seguridad y/o confort.

MEDIO: (1) Se producen vibraciones o saltos significativos, que hacen necesario reducir la velocidad por seguridad y/o confort. (2) Saltos individuales o continuos que producen molestias.

ALTO: (1) Excesivas vibraciones hacen reducir considerablemente la velocidad. (2) Saltos individuales, que producen gran molestia, peligro o posible daño vehicular. (Shahin, 2005)

## **2.5. Índice de Fricción Internacional IFI**

### **2.5.1. Predicción de la resistencia al deslizamiento como función de la velocidad a partir de medidas de textura del pavimento**

La resistencia al deslizamiento ha sido asociada a la textura del pavimento desde 1978 a través de las investigaciones de Henry y Leu, que predijeron la variación de la resistencia al deslizamiento con respecto a la velocidad de deslizamiento por medio de la micro y macrotextura del pavimento. La microtextura del pavimento abarca hasta una longitud de onda de 0.5 mm y la macrotextura varía entre 0.5 mm y 50 mm.

Por medio de esta investigación se determinó la importancia de la microtextura del pavimento para la evaluación de la capacidad de frenado a velocidades bajas; además la macrotextura fue utilizada para obtener la relación entre la velocidad y la resistencia al deslizamiento, y ésta fue correlacionada con la tasa a la que el agua de la superficie del pavimento puede separarse del neumático durante las mediciones. (Morales Aguilar, 2015)

#### **2.5.1.1. Modelo de Pennsylvania**

Conocido como el modelo Penn State de Henry, 1992, relaciona la fricción (F) con la velocidad de deslizamiento (S) mediante la siguiente fórmula:

$$F(S) = F_o \times e^{\frac{-S}{S^p}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

F(S) = Fricción medida con cierto equipo a la velocidad "S".

Fo = Constante adimensional que depende de la microtextura, corresponde a la fricción a una velocidad de deslizamiento igual a 0.

$S$  = Velocidad de deslizamiento en km/h; que es igual a la velocidad del vehículo en los ensayos con rueda bloqueada, a la velocidad multiplicada por el porcentaje bloqueado para el ensayo de rueda parcialmente bloqueada, y a la velocidad por el seno del ángulo de deriva en los ensayos de rueda oblicua.

$S_0$  = Constante con unidades de velocidad que depende de la macrotextura, su valor varía entre 20 y 600 km/h.

Otra forma de ver el modelo de Penn State es a partir del concepto ya estudiado por Henry y Leu e introduciendo la variable del porcentaje del gradiente normalizado (PNG, por sus siglas en inglés), que expresa la relación entre la resistencia al deslizamiento y la velocidad:

$$F(S) = F_0 \times e^{-\left(\frac{PNG}{100} \times S\right)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

$F(S)$  = Fricción medida con cierto equipo a la velocidad " $S$ ".

$F_0$  = Constante adimensional que depende de la microtextura, corresponde a la fricción a una velocidad de deslizamiento igual a 0.

PNG = Porcentaje de gradiente normalizado.

$S$  = Velocidad de deslizamiento.

Henry y Leu (1992) demostraron que PNG es más o menos constante para una superficie y que está relacionado con la macrotextura (al igual que  $S_0$  en la Ecuación 1). Mediante una regresión lineal de las mediciones de fricción en una superficie a diferentes velocidades pueden encontrarse las constantes  $F_0$ ,  $S_0$  y  $F_0$  y PNG para las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

En este modelo se puede observar que para valores bajos de  $S_0$  o altos de PNG (valores bajos de macrotextura), cuanto mayor es la velocidad de deslizamiento la fricción es menor.

En cambio valores altos de  $S_0$  y bajos de PNG (valores altos de macrotextura) indican una menor sensibilidad de la fricción hacia la velocidad.

Este modelo fue modificado de manera que la velocidad de referencia fuera 10 km/h en lugar de 0 km/h; esto se debió a que el modelo no se adaptaba lo suficiente a las mediciones experimentales y presentaba mucha dispersión en los resultados. Muchos de los equipos de rueda oblicua y de rueda bloqueada miden a bajas velocidades de deslizamiento y  $F_0$  puede obtenerse únicamente por extrapolación. Por tanto, el modelo modificado adoptó la siguiente forma:

$$F(S) = F_{10} \times e^{\frac{S-10}{S_0}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$F(S)$  = Fricción medida con cierto equipo.

$F_{10}$  = Valor de fricción obtenida para una velocidad de deslizamiento de 10 km/h.

$S$  = Velocidad de deslizamiento.

$S_0$  = Constante con unidades de velocidad que depende de la macrotextura.

Finalmente con el objetivo de obtener las constantes  $F_{10}$  y  $S_0$  se realizaron mediciones de fricción a diferentes velocidades con diferentes equipos. Los equipos fueron divididos en dos grupos, uno con neumático liso y el otro estriado; dentro de cada grupo se calcularon los valores correspondientes a  $F_{10}$  y  $S_0$  para cada tramo ensayado. Excluidos los datos atípicos los datos fueron promediados sin embargo, no se obtuvieron buenas correlaciones. (Morales Aguilar, 2015)

#### **2.5.1.2. Modelo AIPCR**

Dado que el modelo de Pennsylvania no proporcionó buenas correlaciones entre las mediciones con diferentes equipos, se probaron otros modelos. El experimento internacional de la Asociación Mundial de las Carreteras (AIPCR) de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento, se llevó a cabo en los meses de septiembre y octubre de 1995.

En el experimento de la AIPCR participaron 16 países, 47 sistemas de medición y se evaluaron 54 tramos diferentes ubicados en España y Bélgica. Se realizaron mediciones en una gran variedad de superficies; y los equipos fueron clasificados de la siguiente forma:

**a) Fricción**

De rueda oblicua (con respecto al sentido de la marcha)

De rueda parcialmente bloqueada con grado de bloqueo fijo

De rueda bloqueada con grado de bloqueo variable

De rueda bloqueada

**b) Textura**

Equipos estacionarios

Equipos dinámicos a bajas velocidades

Equipos dinámicos a altas velocidades

**El modelo de la AIPCR**

Surge como resultado del experimento anterior y es una modificación del modelo de Pennsylvania que introduce el concepto de la constante de velocidad  $S_p$  que sustituye los parámetros  $S_1$  y  $1/PNG$  visto anteriormente de la siguiente forma:

$$FRS = FR_o \times e^{-\frac{S}{S_p}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$FRS$  = Fricción a la velocidad de deslizamiento.

$FR_o$  = Valor de fricción a una velocidad de deslizamiento de 0 km/h.

$S$  = Velocidad de deslizamiento.

$S_0$  = Constante con unidades de velocidad que caracteriza las propiedades de drenaje de la superficie, está relacionada con la macrotextura.

Específicamente para el modelo de la AIPCR, se modificó la velocidad de referencia a 60 km/h. El modelo se describe en función de una constante de fricción ( $FR_{60}$ ) que corresponde al valor de la fricción medida para una velocidad de 60 km/h, y se obtiene de la siguiente forma:

$$FR60 = FRS \times e^{\frac{S-60}{Sp}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

FR60= Fricción medida con cierto equipo a una velocidad de 60 km/h.

FRS= Fricción obtenida con cierto equipo a una velocidad "S".

S = Velocidad de deslizamiento.

Sp = Constante con unidades de velocidad que caracteriza las propiedades de drenaje de la superficie, está relacionada con la macrotextura.

La Ecuación 5 permite convertir la medida de fricción realizada a cualquier velocidad a la medida de la fricción a 60 km/h. Se representa la curva de fricción-deslizamiento de un equipo determinado. Por lo tanto, si este pavimento se ensayara con otro equipo la curva sería diferente. Para mejorar esta situación y armonizar las mediciones fue necesario fijar un valor real. A partir de las mediciones se estableció el procedimiento para ajustar las curvas de cada equipo alrededor de la curva de referencia (GF) como se ve en la ecuación 5. (Morales Aguilar, 2015)

$$GF(S) = GF60 \times e^{\frac{S-60}{Sp}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

GF(S) = Fricción de referencia a cierta velocidad.

GF60 = Fricción de referencia a 60 km/h.

S = Velocidad real de circulación.

Sp = Constante de velocidad.

## **2.6. Variables asociadas al modelo de IFI**

### **2.6.1. Textura**

La textura del pavimento es definida como las asperezas presentes en la superficie. Estas asperezas son medidas como la desviación de la superficie en comparación con una superficie verdaderamente plana. Las desviaciones existentes pueden definirse según la longitud de onda y la amplitud de las esperezas de los agregados. Según la Asociación

Mundial de la Carretera (AIPCR) la textura de un pavimento puede clasificarse en megatextura, macrotextura y microtextura de acuerdo a su longitud de onda como se puede observar en la Figura 4. La textura de pavimentos ha cobrado importancia a nivel internacional como elemento adicional para describir la funcionalidad de la vía, debido que su profundidad influye en la facilidad de drenaje superficial y en las características de fricción de la superficie del pavimento.

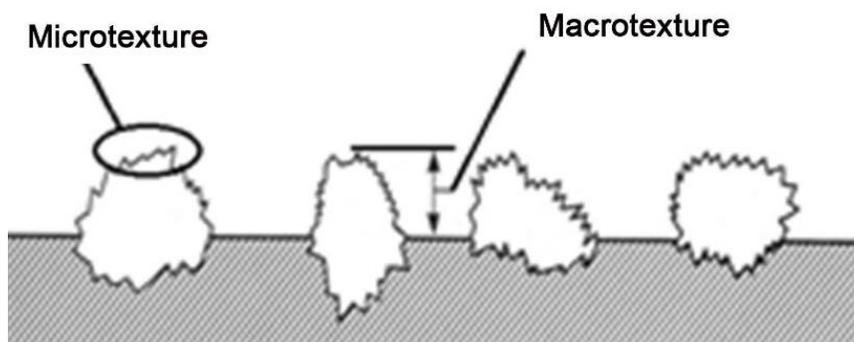
La megatextura corresponde a la mayor longitud de onda ( $50 \text{ mm} < A. < 500 \text{ mm}$ ). La amplitud de las asperezas de los agregados va desde 0.1 a 50 mm. En general, se encuentra más cercana a la rugosidad. Usualmente no es considerada como una variable significativa en la provisión de seguridad.

La macrotextura, proporciona las propiedades necesarias para el escurrimiento del agua en el pavimento, de modo tal que la película de agua que sirve de fase entre el neumático y el pavimento mantenga cierto espesor que permita el contacto entre neumático y pavimento. Corresponde a la longitud de onda media ( $0.5 \text{ mm} < /, < 50 \text{ mm}$ ); la amplitud de las asperezas de los agregados va desde 0.1 a 2.0 mm. Afecta la capacidad de frenado en presencia de agua y las emisiones de ruido en la interface rueda/pavimento.

La microtextura proporciona el contacto directo entre el neumático y el pavimento, y por tanto está directamente asociada a la resistencia al deslizamiento. Corresponde a la longitud de onda menor  $U- < 0.5 \text{ mm}$ ) y la amplitud de las asperezas de los agregados varía desde 1 a 500 mm. Depende exclusivamente de las características del agregado y de su susceptibilidad al desgaste producido por el contacto con el neumático.

De los tres tipos de textura la microtextura y la macrotextura son los factores predominantes en la fricción del pavimento, en la Figura 13 se muestran estos conceptos. La microtextura es significativa a bajas velocidades y causa adhesión entre la llanta y la superficie del pavimento; la macrotextura es la responsable fricción, histéresis y del hidropneumático. (Morales Aguilar, 2015)

**Figura 13. Concepto de microtextura y macrotextura**



Fuente: Pavement Friction And Skid Resistance Measurement Methods (Behrouz, Hamzeh, Mohsen, & Fereidoon Moghadas, 2016)

### 2.6.1.1. Ensayos para evaluar la macrotextura del pavimento

Hoy en día existen diferentes tipos de ensayos para evaluar la macrotextura de un pavimento. Estos ensayos varían mucho, tanto en la rapidez del trabajo, tipo de medida y costo del equipo.

Estos ensayos se dividen en tres tipos de medida:

#### 2.6.1.1.1. Método volumétrico

Este método mide la profundidad media de textura (MTD) y se mide con el método del:

#### **Círculo de la arena**

Este ensayo es la manera más antigua que se tiene de evaluar el pavimento.

Consiste en extender sobre la superficie del pavimento un volumen conocido de arena fina (que pase la malla 100 y la retenga la 200). Luego se extiende la arena formando un círculo (ver figura 14). La medida de su diámetro permite determinar el área del círculo y al dividirlo entre el volumen se obtiene la profundidad promedio de las depresiones, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$PT = \frac{4V}{\pi D^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

PT = Profundidad de textura (en mm).

V = Volumen de arena utilizado.

D = Diámetro que forma el círculo de arena.

**Figura 14. Círculo de arena**

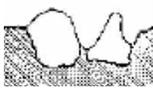
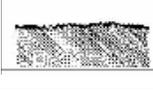


Fuentes: Estudio de Fricción en pavimentos (avance) (Campos, Wahr, & Arancibia, 2003)

Este ensayo es útil para valores de textura superiores a los 0.25mm y se debe hacer en un pavimento seco, limpio y sin viento.

Se debe también indicar la escala de textura de la superficie ensayada con la siguiente tabla N° 9. (Campos, Wahr, & Arancibia, 2003)

**Tabla N° 9. Escala de textura ensayada con el círculo de la arena**

	Superficie	Clases de Textura	
		Macro	Micro
A		Gruesa	Áspera
B		Gruesa	Pulida
C		Fina	Áspera
D		Fina	Pulida

Fuente: Estudio de Fricción en pavimentos (avance) (Campos, Wahr, & Arancibia, 2003)

A pesar que este ensayo es el más utilizado presenta una serie de inconvenientes:

- Funciona en tramos específicos, y no a nivel de red.
- Se debe cortar el tránsito en una carretera abierta.
- Es difícil garantizar la homogeneidad de la arena o de las esferas de vidrio por lo que se puede producir errores.

Por otro lado, en Cuba se ha elaborado un método similar al círculo de arena, cuyo procedimiento es el siguiente:

### **El marco portátil de textura**

Este ensayo consiste en:

Un marco de madera de 70 x 20 x 1 cm. sin fondo ni tapa

A todo lo largo, por ambos bordes longitudinales hay una escala graduada en centímetros.

Una banda metálica de 200 x 50 x 1cm. favorece en los primeros 5 cm. el inicio del ensayo coincidiendo con el cifrado de cero.

25cm<sup>3</sup> de arena granulada que pasa por el tamiz 50 y retiene el tamiz 100.

Paleta de madera fina de 3mm de espesor y 19mm de ancho para extender y enrasar la arena.

La altura de la macrotextura (HAMm.) se determina de la siguiente forma:

$$HA = \frac{12.5}{La} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

La = Longitud de la mancha de arena (cm).

HA = Altura de la macrotextura de pavimento (mm).

**Tabla N° 10. Escala de textura ensayada con el marco portátil de textura**

La (cm)	Tipo de Textura
> 66	Muy fina
45 - 66	Fina
30 - 45	Media
15 - 30	Gruesa
< 15	Muy gruesa

Fuente: Evaluación de la característica superficial del pavimento de carreteras con procedimientos de bajo costo (Diaz & Eutiquio, 1999)

Como se puede observar, este ensayo está basado en el círculo de la arena teniendo la ventaja que es aún más económico. (Diaz & Eutiquio, 1999)

#### **2.6.1.1.2. Perfilómetros**

Obtienen un perfil digital de la macrotextura. Existen tres tipos en general: láser, foto seccionamiento y aguja de contacto. El más común es el del tipo láser. Estos equipos miden la altura de un punto sobre el pavimento. Normalmente van instalados en otros equipos pudiendo ser desplazados para su medida hasta una velocidad de 72Km/h.

Uno de los Perfilómetros más usados es el siguiente:

##### **Perfilómetro video láser RST**

La evolución de las técnicas de medida de la textura especialmente con sensores láser de alta intensidad de muestreo ha originado un interés creciente por mejorar cuantitativa y cualitativamente la medida de la textura. Con este equipo se determina un valor de la Media Cuadrática de Textura (RMS) de las amplitudes del perfil filtrado de determinadas bandas de longitud de onda.

Se obtienen valores medios cada 20m y para cada uno de los tres rangos de medidas, es decir, evalúa la megatextura, la macrotextura gruesa y la macrotextura fina. La textura se mide usando cámaras láser de 32 kHz. Para cada rodada, pudiéndose configurar para cada usuario.

### 2.6.1.1.3. Drenómetros

Miden el tiempo de drenaje. Se utiliza un cilindro transparente con un volumen establecido. Este cilindro tiene un obturador de caucho entre el cilindro y el pavimento. El cilindro es llenado de agua y se mide, con un cronómetro, el tiempo que tarda en evacuar el agua. El inverso del tiempo representa la medida de textura, que es la que determina el flujo de agua.

El tiempo en una superficie perfectamente lisa sería infinito. (Diaz & Eutiquio, 1999)

### 2.6.2. Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento se define como la fuerza desarrollada entre la superficie del pavimento y los neumáticos, que estando impedidos de rotar, deslizan a lo largo de la superficie. Representa la interacción entre la llanta de un automóvil y el pavimento, sin considerar la demanda de fricción producto de las aceleraciones tangenciales y/o transversales a las que se ve sometido un automóvil. Es un concepto que describe el fenómeno a nivel local. El reconocimiento de la importante influencia de la presencia de agua en la superficie ha llevado a definir en forma explícita un coeficiente de fricción ( $f$ ) determinado con el pavimento mojado.

$$f = \frac{F_a}{N} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$f$  = Coeficiente de fricción con el pavimento mojado.

$F_a$  = Fuerza de fricción con el pavimento mojado.

$N$  = Peso sobre la rueda.

Existen dos situaciones básicas que condicionan la seguridad del usuario por una baja resistencia al deslizamiento. Debido a lo anterior se definen los coeficientes de fricción longitudinal y transversal para el deslizamiento ante una frenada y la salida del vehículo desde el camino de una curva respectivamente.

### **2.6.3. Fricción**

La fricción en la superficie del pavimento es un factor de seguridad significativo que juega un papel crítico reduciendo los accidentes en pavimento húmedo.

La fricción varía a lo largo de la vida útil o de diseño de un pavimento. Existen una serie de factores que afectan el desarrollo de la fricción en la interface pavimento-llanta y estos pueden agruparse en 4: características superficiales del pavimento, parámetros de operación del vehículo, propiedades de la llanta y factores ambientales. Estos factores se presentan en la tabla N° 11.

Las fuerzas de fricción consisten mayormente en dos componentes denominadas adhesión e histéresis (Moore, 1972). Estas dos componentes puede observarse en la Figura 15.

#### **Adhesión**

La adhesión es la fuerza cortante desarrollada en el área de contacto entre la llanta y el pavimento en dirección contraria al movimiento.

Esta fuerza de fricción es contribuida por la microtextura (rugosidad de la superficie). Según Hogervost (1974), a velocidades típicas de conducción, la adhesión aporta dos tercios de la resistencia desarrollada en la interface llanta-pavimento. Sobre superficies secas y limpias este rozamiento es muy alto pero disminuye en presencia de sustancias que impiden un contacto molecular perfecto (polvo, barro, láminas de agua entre otras).

#### **Histéresis**

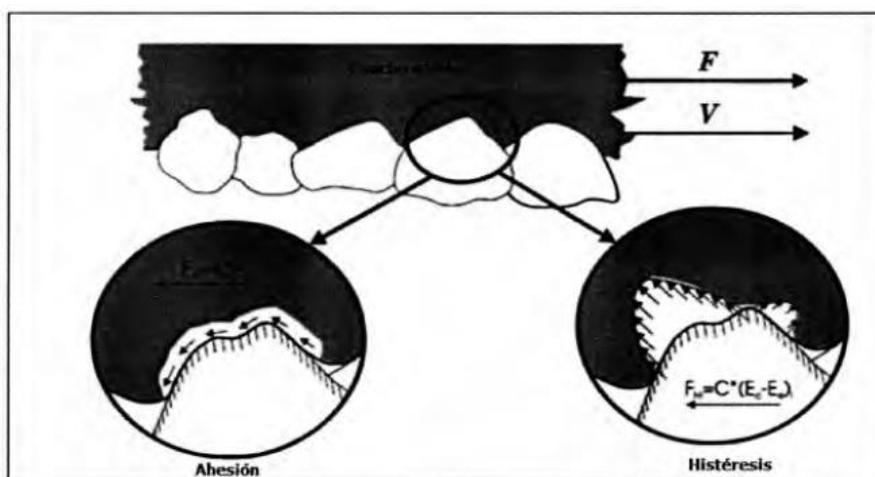
Es producida a consecuencia de las irregularidades de la superficie del pavimento que hacen que el caucho de los neumáticos se comprima y dilate alternativamente. El caucho de los neumáticos almacena energía cuando la llanta se comprime sobre el pavimento, cuando la llanta se relaja parte de esta energía es recuperada por lo que se generan pérdidas de energía debidas a la histéresis elástica del material. Esta fuerza depende mayormente de la macrotextura del pavimento ya que la llanta forma una superficie envolvente en la interface llanta - pavimento. Esta fuerza de rozamiento es generalmente más pequeña que la generada por la adherencia, sin embargo no se modifica al existir capas líquidas ya que las deformaciones que sufrirá el caucho serán las mismas que si no existieran dichas capas. (Morales Aguilar, 2015)

**Tabla N° 11. Factores que afectan la fricción en el pavimento**

Características superficiales	Operación del vehículo	Propiedades de la llanta	Ambiente
Microtextura	Velocidad de deslizamiento	Huella	Clima
Macrotextura		Diseño de la banda de rodadura y condición	Viento
Megatextura	Velocidad del vehículo		Temperatura
Irregularidades	Acción de frenado	Composición del caucho y dureza	Agua (lluvia, condensación)
Propiedades del material	Maniobra de conducción	Presión de inflado	Nieve, hielo
Temperatura	Giros	Velocidad de deslizamiento	Contaminación
Conductividad térmica	Adelantamiento	Carga	Material antideslizante
		Temperatura	Suciedad, escombros
		Conductividad térmica	Viscosidad
		Calor específico	Densidad
			Espesor de la película de agua
			Conductividad térmica
			Calor específico

Fuente: Friction Measurement Methods an the correlation between road friction and trafic safety  
(Wallman & Astrom, 2001)

**Figura 15. Adhesión e histéresis mecanismo entre llanta-pavimento**



Fuente: Friction Measurement Methods an the correlation between road friction and trafic safety  
(Wallman & Astrom, 2001)

### **2.6.3.1. Equipos para evaluar el coeficiente de fricción**

Existen diferentes tipos de ensayo que evalúan la resistencia al deslizamiento. Entre estos están: SCRIM, Mu Meter, Griptester y el Péndulo TRRL. Debido a la importante influencia del agua en esta propiedad es que estos métodos han optado por normalizar los ensayos de pavimento mojado. (Roco, Fuentes, & Valverde, 2003)

Sin embargo no existen a nivel internacional desarrollos homogéneos en la evaluación del coeficiente de fricción, siendo éstas diferencias las siguientes:

#### **Tipo de medida (rueda)**

##### **a) Rueda oblicua**

En estos equipos la rueda se mantiene formando un ángulo con respecto al sentido del movimiento sin aplicársele ninguna otra condición al frenado. Con estos equipos se mide el esfuerzo lateral, perpendicular al plano de rotación.

La velocidad relativa entre el neumático y el pavimento de estos equipos es equivalente a la velocidad del vehículo ( $V$ ) por el seno del ángulo de deriva ( $\alpha$ ). Esto quiere decir que es un equipo que mide a velocidades bajas, a pesar que la velocidad del vehículo sea alta.

Los equipos más usados con rueda oblicua son el SCRIM y el Mu-Meter. (Figuras: 17,18 y 19)

##### **b) Rueda bloqueada**

Estos equipos producen un bloqueo del 100%, por lo que la velocidad relativa entre el neumático y el pavimento es igual a la del vehículo.

La fuerza se mide durante un segundo al aplicar el freno con la rueda completamente inmovilizada, por lo que detectan la fricción máxima.

El equipo más usado es el Tráiler ASTM y el GRIPTESTER (Figura 16)

##### **c) Rueda parcialmente bloqueada (con grado de deslizamiento fijo)**

Normalmente operan con un grado de deslizamiento del 10 al 20%. Tienen la ventaja de medir en forma continua, a diferencia de los equipos con rueda bloqueada.

La velocidad relativa entre el neumático y el pavimento de estos equipos es la velocidad de deslizamiento propio del equipo multiplicada por el tanto por uno de grado de deslizamiento.

Los equipos más comunes son el Saab y el Runway Friction Tester.

**d) Rueda parcialmente bloqueada (con grado de deslizamiento variable)**

Estos equipos permiten hacer un barrido dentro de una escala de valores, como también pueden encontrar la fricción máxima. Por lo que con estos equipos se obtiene la mayor información sobre las características de fricción. (Roco, Fuentes, & Valverde, 2003)

Uno de los pocos equipos diseñados de esta manera es el Norsemeter.

**e) Zapata**

Se les conoce también como patín de goma. Son zapatas de caucho usadas en equipos que generalmente se miden con velocidades muy bajas, como 10 Km/h. Los equipos que usan zapatas más usados, son: ROSAN (USA), DF Tester, Péndulo Británico.

**La velocidad de medida**

Los equipos han sido diseñados para medir con velocidades distintas unos de otros. Por ejemplo, el SCRIM mide velocidades de hasta 90Km/h, el Mu-Meter a 80Km/h, mientras que el Péndulo Británico lo hace a 10Km/h.

**El espesor de la película de agua**

La mayoría de estos equipos al avanzar van dejando una película de agua. El espesor de ésta película será diferente de acuerdo a cada equipo, por ejemplo, 0.5mm o 1mm de espesor.

En el caso de otros equipos es necesario rociar agua antes de evaluar el pavimento, como es el caso del Péndulo Británico. (Roco, Fuentes, & Valverde, 2003)

**2.6.3.2. Equipos que miden el coeficiente de fricción longitudinal**

Los equipos deslizan una rueda sobre el pavimento longitudinalmente, a una velocidad de rotación menor que la de rodadura, generando así una fuerza de fricción.

Estos equipos se basan en el principio de bloque de rueda sin esviaje por lo que el valor obtenido corresponde a la fricción requerida para un bloque del 100% de la rueda en el instante que comienza el deslizamiento. (Roco, Fuentes, & Valverde, 2003)

### **GRIPTESTER**

**Figura 16. Equipo GRIPTESTER**



Fuente: Evaluación de la resistencia al deslizamiento en pavimentos Chilenos (Roco, Fuentes, & Valverde, 2003)

Consiste en un tráiler liviano de tres ruedas, donde la rueda central es la medidora. Esta rueda medidora se desplaza en el sentido del tránsito con un grado de bloqueo del 14%.

#### **2.6.3.3. Equipos que miden el coeficiente de fricción transversal**

Los equipos representan la situación de derrape en zonas de curvas, en cada caso se desliza una rueda bloqueada entre 15 y 20 grados respecto a la dirección de circulación. (Roco, Fuentes, & Valverde, 2003)

Los equipos más conocidos son el SCRIM y el Mu-Meter, ambos de Gran Bretaña.

## SCRIM

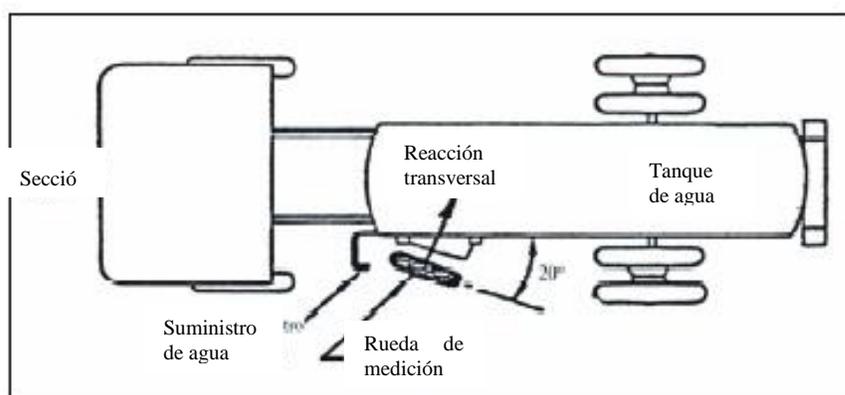
**Figura 17. Equipo SCRIM**



Fuente: Evaluación de la resistencia al deslizamiento en pavimentos Chilenos (Roco, Fuentes, & Valverde, 2003)

Compuesto por un camión cisterna de 5000 litros de capacidad para regar agua en la calzada, proporcionando una lámina de 1mm. De espesor a su paso. Tiene una rueda de medición formando un ángulo de 20° con el vehículo.

**Figura 18. Rueda oblicua del equipo SCRIM**



Fuente: Evaluación de la resistencia al deslizamiento en pavimentos Chilenos (Roco, Fuentes, & Valverde, 2003)

La velocidad de operación de este equipo va desde los 20 Km/h hasta los 100 Km/h.

El SCRIM dispone de equipos especiales para el procesamiento de información.

## MU-METER

**Figura 19. Equipo Mu-Meter**



Fuente: Resistencia al deslizamiento en pavimentos flexibles: Propuesta de norma Peruana  
(Barraza Eléspuru, 2004)

El Mu Meter es un equipo de medición continuo de fricción para pruebas en aeropuertos y carreteras que permite obtener la fuerza de fricción lateral y es registrado mediante el número Mu (MuN, por sus siglas en inglés). El Mu Meter consiste en un pequeño tráiler de 3 ruedas que incorpora sistemas de medición que operan en conjunto con una computadora ubicada dentro del vehículo que remolca el equipo (Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Perú, 2000). El procedimiento de medición con el Mu Meter se describe en la norma ASTM E 670.

La medición se obtiene halando a una velocidad constante el equipo, esta cuenta con dos ruedas de ensayo rotando libremente y formando un ángulo con la dirección del movimiento (Figura 19). El vehículo remolcador debe ser capaz de alcanzar una velocidad mínima de 65km / h y mantenerla dentro de una variación de  $\pm 0.8$  km/h, en caso de tener una velocidad superior a esta el rango de variación de be ser de  $\pm 1.5$  km/h.

Las dos ruedas de prueba deben estar desviadas  $7.5 \pm 0.75$  ° cada una hacia fuera del eje del Mu Meter, la tercera rueda actúa como estabilizadora y se encarga de obtener un registro continuo de medición (Douglas Equipment Ltd., 2007). Las mediciones debe n

realizarse con el pavimento húmedo, el agua debe ser aplicada de forma que la capa de agua sobre la que pasan las ruedas tenga una sección transversal uniforme a cualquier velocidad, con un mínimo de salpicaduras y rociado excesivo. (Lopez Valdes & Garnica Anguas, 2002)

#### 2.6.3.4. Equipos que miden ambos coeficientes de fricción (microtextura)

##### Péndulo de fricción TRRL

**Figura 20. Equipo péndulo de fricción.**



Fuente: Resistencia al deslizamiento en pavimentos flexibles: Propuesta de norma Peruana (Barraza Eléspuru, 2004)

El péndulo de fricción TRRL se utiliza para medidas puntuales, es decir, no mide de forma continua. Esto trae como consecuencia que se tenga que obstaculizar el tránsito para su medida. Este equipo mide el coeficiente de fricción para velocidades menores a 50 km/h. Se usa tanto para medir el CFL como el CFT, dependiendo de la ubicación del equipo. (Roco, V., Fuentes, C., & Valverde, S. 2003)

Este recorre una distancia normalizada en la superficie a medir, hasta el reposo. Esta pérdida de energía por la fricción que tiene el pavimento se registra en una escala graduada que tiene incorporado. El coeficiente de fricción es calculado de la siguiente manera: (Roco, Fuentes, & Valverde, 2003)

$$CRD = \frac{Lect.prom}{100} \quad Ecuación 10$$

Dónde:

CRD = Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento,

Lect.prom = Lectura promedio de CDR

### **Péndulo de fricción diva**

Este equipo, fabricado en Cuba, es similar al Péndulo Británico. Es importante recalcar que para obtener una confianza en los resultados se requiere de la buena calibración del equipo antes de iniciar el trabajo. En cada ensayo el CFD se evalúa de la siguiente forma: (Diaz & Eutiquio, 1999)

$$CFC = K \times T_{MB} \frac{Lect.prom}{100} \quad Ecuación 11$$

Dónde:

CFC = Coeficiente de Fricción Corregido.

K = Calibración del equipo de la serie cero (0.94 – 1.05)

T<sub>MB</sub> = Factor por corrección de temperatura

Lect.prom = Lectura promedio de CDR

**Tabla N° 12. Corrección por temperatura**

Temperatura de la superficies (C°)	Factor de corrección
	TMB
20 - 37,5	0,98
37,6 - 52,5	1,00
52,6 - 62,5	1,02
62,6 - 70	1,04

Fuente: Evaluación de la característica superficial del pavimento de carreteras con procedimientos de bajo costo (Diaz & Eutiquio, 1999)

## **2.7. Definición del modelo de índice de fricción internacional**

### **2.7.1. Índice de Fricción Internacional**

“El IFI se describe como una escala de referencia, de aplicación internacional, de la fricción y de la textura del pavimento”

El Índice de fricción Internacional permite comparar, con las mismas características de adherencia y textura, pavimentos que han sido evaluados en cualquier parte del mundo y con cualquier equipo de medida.

Los resultados de este estudio han dado la posibilidad de:

- Establecer correlaciones que permiten referir los resultados de los diferentes equipos a una escala común (IFI).
- Promover el cambio de experiencias de investigación en carreteras en distintos países.
- Poder calcular el grado de fricción que se tendrá a la velocidad deseada.

En el estudio realizado por la AIPCR se ha llegado a la deducción que, para poder relacionar y armonizar las medidas de fricción hechas con los distintos métodos, se necesitan incluir los efectos de la textura de un pavimento. Esto es importante ya que en ningún estudio anterior se había hecho esto.

El IFI viene indicado entre paréntesis por dos números separados por una coma, cuyos parámetros son: (F60 y Sp).

F60 = Valor estimado de la fricción a 60 Km/h.

Sp = Constante de velocidad. Se predice con las medidas de macrotextura.

La fricción (F60) consiste en un número adimensional en que el valor uno significa que existe una adherencia total en el pavimento, y por el contrario, el valor cero indica deslizamiento total. La constante de velocidad (Sp) es un número con unidades de velocidad que se representa por un número positivo sin límites determinados. (AIPCR, 1995)

### **2.7.2. Equipos participantes**

Los equipos participantes fueron numerosos, debido principalmente a que se debía obtener una amplia gama de textura y fricción de los pavimentos.

En las tablas que se muestran a continuación se listan todos los equipos que participaron en el Experimento Internacional. La tabla N° 13 muestra los equipos de medida de fricción con su identificación, tipo de medida, tipo de neumático, tasa de deslizamiento y velocidad en que efectúan la medida.

En la tabla N° 14 se muestra la lista de equipos de medida de textura con su identificación, tipo de medida y velocidad de medida. Los equipos utilizados en la presente tesis son el Péndulo de Fricción, cuya identificación es B7 y el método del círculo de la arena de identificación A8. (AIPCR, 1995)

**Tabla N° 13. Equipos que miden la fricción del pavimento**

ID	Denominación	Tipo de medida	Tipo de neumático	Tasa de deslizamiento	Velocidad Km/h
A12	Rosan (USA)	Zapata	Liso	100	10
A13	DF Tester (J)	Zapata	Liso	100	0-80
A14	British pendulum (US)	Zapata	Liso	100	10
B1-ABS	Stutt (CH)	Deslizamiento optimo	Estriado-P	OPT.	30, 60, 90
B1-LKD	Stutt (CH)	Rueda bloqueada	Estriado-P	100	30, 60, 90
B1-SLP	Stutt (CH)	Bloqueo parcial fijo	Estriado-P	20	30, 60, 90
B2-LKD	Skiddometer (CH)	Rueda bloqueada	Estriado-P	100	30, 60, 90
B2-SLP	Skiddometer (CH)	Bloqueo parcial fijo	Estriado-P	20	30, 60, 90
B3	Skiddometer (CH)	Bloqueo parcial fijo	Con dibujo	20	30, 60, 90
B4E-SLP	Norsemeter (N)	Bloqueo parcial fijo	Liso-A	20	30, 60, 90
B4E-SWP	Norsemeter (N)	Bloqueo parcial variable	Liso-A	0-90	30, 60, 90
B5-ABS	Stutt (A)	Deslizamiento optimo	Estriado-P	OPT.	30, 60, 90
B5-LDK	Stutt (A)	Rueda bloqueada	Estriado-P	100	30, 60, 90
B5-SLP	Stutt (A)	Bloqueo parcial fijo	Estriado-P	20	30, 60, 90
B6-501	Tráiler (US)	Rueda bloqueada	Estriado-P	100	65
B6-524	Tráiler (US)	Rueda bloqueada	Liso-A	100	30, 65, 90
B6-CHP	Tráiler (US)	Máximo en seco	Con dibujo	PEAK	65
B6-ULT	Tráiler (US)	Bloqueada en seco	Liso-A	100	10
B7	British pendulum (CH)	Zapata	Liso	100	10

Fuente: Experimento internacional de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento (AIPCR, 1995)

**Tabla N° 14: equipos que miden la textura del pavimento**

Identificación	Denominación	Tipo de medida	Velocidad (km/h)
----------------	--------------	----------------	------------------

A1	FH texture (US)	RMS	30
A2	VTI mobile profilometer (S)	RMS, ETD, TDMA, MPD	36
A3B	ARAN (CAN)	MPD, RMS	30, 60, 80
A3E	AEPO RST (E.)	Macrotectura	30
A4	CRR mobile profilometer (B)	MPD, RMS	18, 36, 72
A5	CRR stationary profilometer (B)	MPD, RMS	0
A8	ASTM E965 sandpatch (US)	MTD	0
A14	Circulo de arena (US)	BPN	0
B8	Outflow meter (CH)	Outflow time	0
B11E	Outflow meter (US)	Outflow time	0
D2	Geosisa screem (E.)	MTD	60
D3	Rugolaser (F)	SDC, RA, RQ	60
D4	SUMMS (I)	MTD	50
D5	SCRIMTEX (UK)	MTS	50

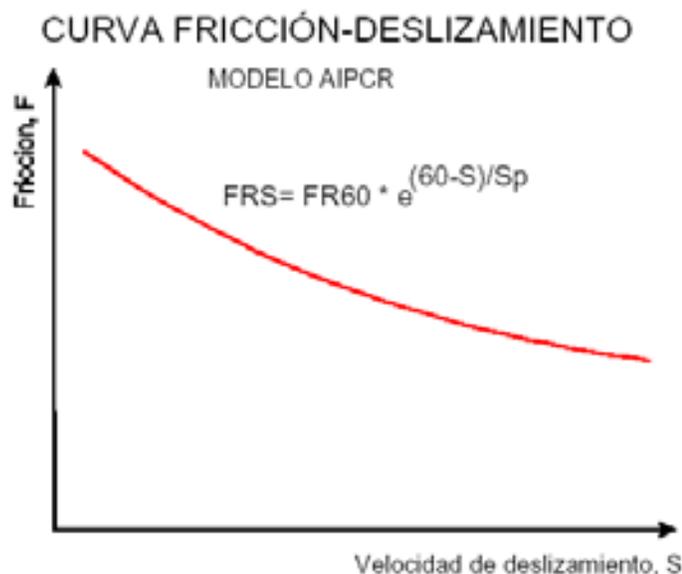
Fuente: Experimento internacional de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento (AIPCR, 1995)

### 2.7.3. Cálculo del Índice de Fricción Internacional propuesto

Como se mencionó anteriormente, el IFI relaciona la fricción de un pavimento con la velocidad de deslizamiento de un vehículo. Para esto se estima una constante de referencia de velocidad ( $S_p$ ) y la fricción a una velocidad de 60 Km/h donde finalmente se obtiene una curva fricción – velocidad de deslizamiento.

El grado de fricción de un pavimento es función de su velocidad. En la figura 21 que se muestra a continuación se representa en forma genérica la curva del modelo:

**Figura 21. Curva Fricción – Deslizamiento para el IFI**



Fuente: Experimento internacional de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento (AIPCR, 1995)

Suponiendo que se evaluara este mismo pavimento con diferentes equipos se obtendrían curvas más alejadas o más próximas a esta. Por tal motivo, para poder comparar uno o varios pavimentos la evaluación está restringida a un único equipo de medición.

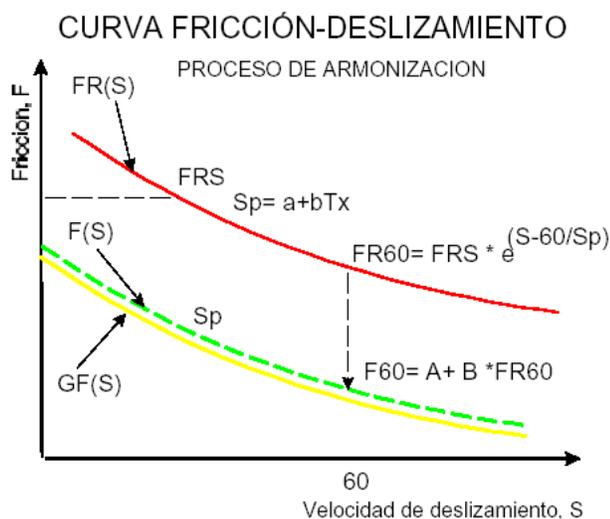
Para poder armonizar los equipos se ideó la curva de referencia o también llamado “Golden Value”.

### **La curva de referencia**

Esta curva representa la función fricción – velocidad de deslizamiento “real” en un pavimento, de tal manera que con los diferentes valores dados por distintos equipos proporcionen como resultado diferentes curvas que luego se ajusten a ésta.

A este procedimiento se le conoce como el proceso de armonización. Si el proceso de armonización ha sido eficaz, en un solo pavimento, las curvas con diferentes equipos estarán muy próximas unas de otras y también lo estarán a la curva de referencia. (AIPCR, 1995)

**Figura 22. Armonización de la curva Fricción – Deslizamiento**



Fuente: Experimento internacional de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento (AIPCR, 1995)

La curva  $GF(S)$  tiene la siguiente ecuación:

$$GF(S) = GF60 \times e^{\frac{60-S}{GS}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

S = Velocidad de medición

$GF(S)$  = Fricción de la curva de referencia a la velocidad S

$GF60$  = Fricción “real” de la curva de referencia a la velocidad de 60 Km/h.

$GS$  = Constante que representa la influencia de la velocidad en la curva de referencia en Km/h.

A continuación se explicará cómo se obtiene el IFI según los criterios establecidos por el Experimento Internacional:

**1º) Realizar los dos tipos de medidas sobre el pavimento a evaluar con los equipos disponibles**

- Fricción (FR).

- Textura (Tx).

**2º) Designación de la pareja de valores**

La pareja de valores (F60, Sp) se designa como el IFI de un pavimento. Estos valores permitirán dibujar la curva de referencia estimada de fricción – velocidad de deslizamiento del pavimento a ensayar.

a) Determinación de la constante de velocidad, Sp:

$$Sp = a + (b \times Tx) \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

Sp = Constante de Velocidad.

Tx = Medida de la macrotextura con el equipo utilizado.

a, b = Constantes de calibración, que dependen del equipo, tomadas de la Tabla N° 24 del Estudio de la PIARC, donde en la presente investigación es la Tabla N° 15. Esta tabla se muestra a continuación:

**Tabla N° 15. Regresión entre la constante de velocidad y la constante de referencia**

Método	Device	V	N	a	b	Max E	Ave E	RMSE	R
RMS	A1	30	69	22,68	285,62	86,20	23,48	29,31	0,902
MPD	A2	34	69	14,24	89,72	77,80	14,78	21,33	0,956
MTD	A3B	60	25	-12,67	119,77	57,90	18,70	25,39	0,920
MEGA	A3E	30	33	32,54	247,93	90,98	21,96	32,78	0,759
MPD	A4	36	69	9,23	83,29	104,41	21,59	30,39	0,897
RMS	A5	0	69	-11,60	113,63	85,38	17,95	25,42	0,930
MTD	A8	0	62	-44,41	2,99	162,51	50,41	60,05	0,397
BPN	A14	0	68	-130,26	3,71	177,74	48,60	61,44	0,451
TIME	B8	80	33	48,13	129,98	69,52	15,45	24,20	0,877
TIME	B11E	80	33	48,13	129,98	69,52	15,45	24,20	0,877
MTD	D2	69	62	-34,97	142,65	128,76	20,01	37,21	0,806
RQ	D3	60	67	14,14	180,66	130,17	19,33	28,71	0,911
MTD	D4	50	58	30,70	148,49	141,45	23,44	34,48	0,814
MTS	D5	50	63	25,83	139,68	151,73	24,40	36,48	0,793

Fuente: Experimento internacional de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento (AIPCR, 1995)

b) Determinación de la constante FR60

La constante FR60 se determina con la siguiente ecuación:

$$FR60 = FR(s) x e^{\frac{S-60}{Sp}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Dónde:

FR60 = Fricción a una velocidad de 60 Km/h.

FR (S) = Fricción a la velocidad de la medición del equipo.

Sp = Constante de velocidad.

S = Velocidad de medición o velocidad relativa de deslizamiento. Se determina la velocidad relativa de deslizamiento S de la siguiente manera:

S = Velocidad del equipo durante el ensayo (V), para equipos con rueda bloqueada.

S = Velocidad del equipo durante el ensayo (V), multiplicada por el tanto por uno de deslizamiento para equipo con rueda parcialmente bloqueada.

S = Velocidad del equipo durante el ensayo (V), multiplicada por el seno del ángulo de deriva de la rueda para equipos con rueda oblicua.

c) Determinación de la fricción de referencia F60

$$F60 = A + (B \times FR60) + (C \times Tx) \quad \text{Ecuación 15}$$

Dónde:

F60 = Fricción de referencia a 60Km/h.

A, B, C = Constantes de calibración, propias de un equipo. Valores tomados de la tabla 25 del informe de la AIPCR, donde en la presente investigación es la tabla N° 16.

FR60 = Fricción a una velocidad de 60 Km/h.

Tx = Medida de la macrotextura con el equipo utilizado.

Es así como la pareja de valores F60 y Sp forman el Índice de Fricción Internacional

(IFI): (F60, Sp)

**Tabla N° 16. Regresión entre la Constante de fricción**

BLANK TIRE		S	N	A	B	C
LKD	D6	60,0	69,0	0,002260	1,007620	0,000000
SLP	C4	10,0	63,0	0,041950	0,848650	0,000000
	C5	43,0	69,0	0,018830	0,867800	0,000000
	D8	9,4	67,0	0,082090	0,910400	0,000000
SFC	C8	12,5	69,0	0,054360	0,770200	0,000000
	C9	12,9	69,0	0,113400	0,729100	0,000000
	C10	20,5	61,0	0,113500	0,745810	0,000000
	D2	20,5	68,0	0,021020	0,927600	0,000000
	D3	20,5	69,0	-0,005940	0,862110	0,000000
RIBBED TIRE						
LKD	B1LKD	60,0	42,0	0,022040	0,500250	0,082158
	B2LKD	60,0	63,0	0,026340	0,504200	0,099195
	C1	60,0	62,0	-0,025340	0,806850	0,067724
SLP	B1SLP	12,0	46,0	0,141070	0,322560	0,073880
	B2SLP	12,0	64,0	0,029680	0,918480	-0,013620
	B3	12,0	68,0	0,039640	0,856180	-0,015890
SLIDER						
	A13-60	60,0	68,0	-0,033650	0,770980	0,000000
	B7	10,0	62,0	0,078000	0,010700	0,000000

Fuente: Experimento internacional de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento (AIPCR, 1995)

### 3º) Obtención de la curva fricción – deslizamiento

Se obtiene con los valores calculados IFI de un pavimento. Con esta curva se permite calcular el valor de la fricción  $F(S)$  a cualquier velocidad de deslizamiento  $S$  según la expresión siguiente: (AIPCR, 1995)

$$F(S) = F60 \times e^{\frac{60-S}{Sp}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

$F(S)$  = Fricción a cierta velocidad.

$F60$  = Fricción de referencia a 60 km/h.

$S$  = Velocidad de circulación.

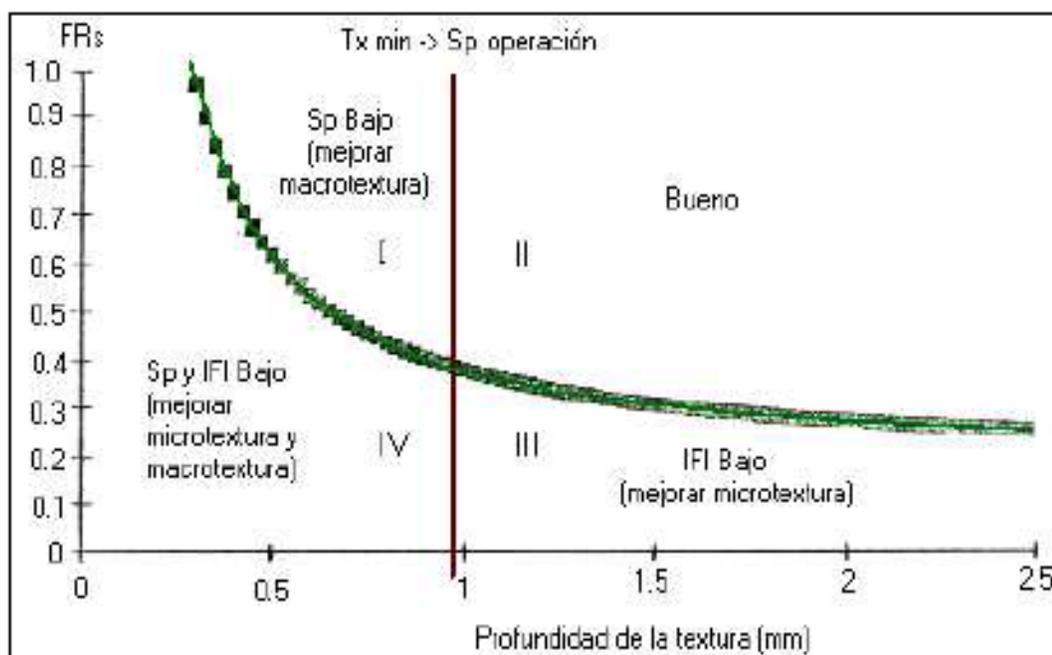
$Sp$  = Constante de velocidad

## 2.7.4. Aplicación de IFI

### 2.7.4.1. México

El modelo de la AIPCR (1995) puede ser utilizado en la administración de pavimentos para establecer niveles de intervención en términos del IFI debido que es una escala común y puede tomarse valores internacionales como punto de partida para crear los valores propios para cada país. La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) generaron gráficas de aceptación o rechazo de la resistencia al deslizamiento en términos de macrotextura y microtextura (2002) como puede observarse en la Figura 23.

**Figura 23. Grafica de aceptación o rechazo e interpretación de las zonas**



Fuente: Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos (Leiva, 2017)

La definición de los valores de fricción (curva F) y de textura (línea T) requiere de la definición de valores de intervención en términos de IFI por parte de los administradores de la conservación de la red. Una vez definidos los valores que conforman el IFI, la constante de velocidad y la fricción a 60 km/h se determina lo siguiente:

La textura mínima a partir del valor de  $S_p$  y las constantes del equipo de medición de textura  $a$  y  $b$

La fricción mínima a partir del valor de textura mínima y las constantes del equipo de fricción  $A$  y  $B$  en caso de una llanta lisa;  $A$ ,  $B$  y  $e$  en caso de una estriada

Para graficar la curva de fricción deben darse valores de fricción de 0 a 2 Como se observa en la Figura 23 la intersección de ambas gráficas genera 4 cuadrantes. La resistencia al deslizamiento puede describirse según la ubicación del par ordenado  $IFI$  de la siguiente forma:

En el primer cuadrante se concluye que la macrotextura debe ser mejorada; esto puede mejorar con la aplicación de un sello o una micro carpeta diseñada correctamente

En el segundo cuadrante se puede decir que el pavimento cumple con una adecuada macrotextura y microtextura.

En el tercer cuadrante se observa que debe mejorarse la microtextura, esto podría resolverse mejorando la calidad del material bituminoso de la carpeta asfáltica

En el cuarto cuadrante se presenta la situación más crítica del pavimento ya que se requiere mejorar tanto la macrotextura como la microtextura. (Leiva, 2017)

## **2.8. Normas internacionales de referencia**

### **2.8.1. España**

La Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento es el encargado de la auscultación de las características superficiales de los pavimentos. Anualmente se realizan mediciones de resistencia al deslizamiento con el fin de conocer la condición de los pavimentos. El Ministerio de Fomento realiza las mediciones de macrotextura a partir del perfilómetro láser (Láser de macrotextura) y el método de la Mancha de arena; para las mediciones de microtextura cuenta con el Péndulo de fricción y el SCRIM.

Los valores mínimos de fricción y macrotextura para una carretera nueva se muestran en el Tabla N° 17, como se observa estos valores están en términos de los equipos estáticos de medición.

**Tabla N° 17. Especificación para la aceptación de carreteras pavimentadas**

Tipo de carpeta	Altura de arena (mm)	Péndulo (mm)
Mezcla bituminosa	0,7	0,65
Hormigón	0,7 a 0,1	.....
Tratamiento superficial textura fina	0,6	0,55
tratamiento superficial textura media	0,8	0,60
tratamiento superficial textura gruesa	> 1,0	0,65

Fuente: Calibración inicial de un modelo de Índice de Fricción Internacional para corredores viales de mayor transito en Costa Rica (Morales Aguilar, 2015)

### 2.8.2. Chile

**Tabla N° 18. Valores mínimos, fricción medida con SCRIM a 50 km/h**

Descripción del sector	SFC
Curva de radio = 100 m Pendientes negativas > 10% Aproximación a intersección Intersecciones Ramales	0,55
Autopistas Autovías Vías rápidas Carreteras convencionales Otros	0,40

Fuente: Calibración inicial de un modelo de Índice de Fricción Internacional para corredores viales de mayor transito en Costa Rica (Morales Aguilar, 2015)

**Tabla N° 19. Valores mínimos de coeficiente de roce medido con Péndulo Ingles**

Tipo de sitios	Coef. De roce
Rotondas Curvas con radios menores a 150 m Aproximación a cruces	0,55
Vías interurbanas Vías urbanas	0,50
Todas las demás	0,40

Fuente: Calibración inicial de un modelo de Índice de Fricción Internacional para corredores viales de mayor transito en Costa Rica (Morales Aguilar, 2015)

### **2.8.3. Argentina**

Se consideran pavimentos especiales desde el punto de vista de la adherencia a las profundidades de textura por encima de 0.50mm medidas con el Círculo de la Arena.

Según el Pliego de Concesiones Viales para calzadas en servicio, está indicado que el coeficiente  $Mu_{65}$  debe ser mayor o igual a 0.40, como valor promedio por kilómetro. El límite que debe ser verificado es de  $0.34Mu$ . Con esto es importante ver cómo cada país usa equipos diferentes y factores diferentes en sus normas.

### **2.8.4. Norma Boliviana ABC**

En Bolivia el manual de carreteras de la Administradora Boliviana de Carreteras ABC V-3 considera deducir que las superficies deben tener:

Suficiente microtextura, la que deberá ser mantenida durante la vida útil de las superficies de rodadura. Por lo tanto, el agregado usado en la capa de desgaste del camino deberá tener una adecuada resistencia al desgaste y al uso, para las condiciones de tránsito que deberá mantener. El criterio principal es el valor de desgaste de la piedra, junto a adecuados estándares para cada tipo de camino y condiciones de tránsito. La microtextura influye directamente en la resistencia al deslizamiento que debe tener la capa de rodadura para que los vehículos circulen sobre el sin riesgo. Esta condición está directamente relacionada con su coeficiente de rozamiento el cual debe ser mayor o igual a 0,45, según mediciones con el péndulo británico.

Suficiente macrotextura: una estructura rugosa es especialmente importante para calzadas que llevan tránsito a alta velocidad. Esta característica deberá ser especificada en términos del método del tratamiento superficial, como por ejemplo:

Peinado del concreto durante la construcción.

Tamaño del agregado de la superficie durante la preparación.

Tasa de desprendimiento o naturaleza del agregado en el asfalto.

Además, el criterio podrá ser especificado midiendo la profundidad de la textura (ensaye círculo de arena o perfilometro laser).

De esta manera, se indica que los requerimientos mínimos para mantener una resistencia al resbalamiento satisfactoria a velocidades de 90 km/h serán: (Fernandez, y otros, 2015)

1,0 mm para superficies bituminosas y 0.5 mm para superficies de pavimento rígido.

0,5 mm para la textura de superficies de concreto.

### 2.8.5. Recomendaciones de la asociación internacional de carreteras AIPCR

**Tabla N° 20. Criterios para calificar la seguridad vial tomando en cuenta los valores profundidad de Textura**

Condición	Calificación	Resultado del diagnostico
$< 0,2$	Muy Fina	Requiere mantenimiento.
$0,2 \leq PT \leq 0,4$	Fina	Sólo para tramos donde raramente se superan los 80 Km/h (áreas urbanas).
$0,4 \leq PT \leq 0,8$	Media	Para tramos normales con velocidades moderadas de 80 a 120 Km/h.
$0,8 \leq PT \leq 1,2$	Gruesa	Para tramos normales con velocidades superiores a 120 Km/h.
$> 1,2$	Muy Gruesa	Para casos especiales con peligro de deslizamiento.

Fuente: Experimento internacional de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento (AIPCR, 1995)

**Tabla N° 21. Criterios para calificar la seguridad vial tomando en cuenta los valores de coeficiente de resistencia al deslizamiento**

Condición	Calificación	Resultado del diagnostico
$CRD \geq 1,50$	Excelente	Superficie muy rugosa y áspera apropiada para el tránsito intenso o altas velocidades incluso con pavimento mojado.
$0,82 \leq CRD \leq 1,5$	Bueno	Superficie con rugosidad y aspereza aceptable para tránsito medio, propician condiciones satisfactorias de seguridad con pavimento mojado a moderadas velocidades de seguridad.
$0,45 \leq CRD \leq 0,82$	Regular	Superficie con rugosidad y aspereza adecuada para intensidades bajas o hasta media con precauciones. Condiciones garantizadas de seguridad sólo con pavimento seco. Se debe evaluar periódicamente el CRD y PT.
$0,21 \leq CRD \leq 0,45$	Malo	Condiciones inseguras de circulación con pavimento mojado y aún incluso con pavimento seco. Superficie con rugosidad y aspereza inadecuadas, con peligro, velocidad limitada y marcado pavimento.
$CRD \leq 0,21$	Pésimo	Circulación insegura con pavimento seco y crítico con pavimento mojado. Se debe reponer las características antideslizantes del pavimento. Establecer señalización vertical y horizontal con medidas extremas de control mientras permanezcan las condiciones inseguras.

Fuente: Experimento internacional de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento (AIPCR, 1995)

## 2.9. Propuestas de mejora

Existen diversos conceptos básicos que deben tenerse en cuenta al analizar el comportamiento de un pavimento. En este sentido es importante tener presente que su estructura sufrirá –con el tiempo– daño y deterioro aun cuando sea adecuadamente diseñado y construido de acuerdo con todas las especificaciones y normas de calidad. Mientras las demás obras de ingeniería tienen una vida indefinida, los pavimentos viales tienen una vida definida; aún con un mantenimiento óptimo alcanzarán un punto de falla. Los pavimentos son probablemente la única estructura de ingeniería que se diseña para que falle dentro de un periodo específico de tiempo.

El modo de deterioro varía sustancialmente, en función de la interacción de varios parámetros, que adicionalmente controlan la rata de deterioro, ellos son:

La estructura (resistencia) del pavimento, incluyendo la subrasante.

El volumen de tráfico y el tipo de cargas.

Políticas de mantenimiento.

En general la falla de un pavimento puede clasificarse como estructural o funcional.

La falla estructural está asociada con la capacidad de carga del pavimento y normalmente se refiere a la fatiga de la estructura. La falla funcional es generalmente definida como la incapacidad del pavimento para proveer una superficie que permita un rodaje confortable, seguro y económico de los vehículos.

Adicionalmente, los modos de deterioro o falla son normalmente divididos en: asociados o no asociados con cargas, siendo los primeros, inducidos por el tráfico en la estructura del pavimento.

Las fallas no asociadas con carga se refieren a las producidas por el medio ambiente y condiciones atmosféricas, calidad de construcción y/o materiales, y problemas especiales, tales como: temperatura y humedad, características de los suelos y materiales y diseños inadecuados de ingeniería. De acuerdo con algunos autores, los tipos de falla de un pavimento son:

Agrietamiento por cargas (fatiga)

Deformación por cargas (ahuellamiento)

Agrietamiento por contracción (termo-fractura)

Deformaciones y grietas no producidas por cargas

Desintegración

Ocasionados por factores no intrínsecos de la estructura

Generalmente las actividades de mantenimiento de pavimentos se agrupan en dos categorías, preventivas y correctivas. El mantenimiento preventivo incluye aquellas actividades realizadas para proteger el pavimento y reducir su tasa de deterioro. Por su parte el mantenimiento correctivo consiste en aquellas actividades ejecutadas para corregir fallas específicas del pavimento o áreas deterioradas. (Jugo B, 1993)

**Tabla N° 22. Tipos de mantenimiento**

Tipo de mantenimiento	Características de las acciones	
	Alcance	Objetivo
A. Menor	Localizado (puntual)	Preventivo Correctivo
B. Mayor	Toda el área	Efectivo Correctivo

Fuente: Manual de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos (Jugo B, 1993)

### **2.9.1. Acciones de mantenimiento y rehabilitación**

Como se indicó, las acciones se clasifican en Mantenimiento Menor y Mantenimiento Mayor. Adicionalmente, se han considerado un grupo de acciones denominadas acciones complementarias, las cuales, principalmente se requieren para corregir problemas en vías urbanas.

Mantenimiento Menor:

Dentro del mantenimiento menor se contemplan acciones aplicadas localmente, entre las cuales se pueden mencionar:

Sellado de

Bacheo

Sello asfáltico localizado

Nivelación localizada

Fresado y texturización localizada

### **El mantenimiento menor preventivo**

Consiste en aquellas acciones que se ejecutan para proteger el pavimento y corregir fallas incipientes en su estado inicial de evolución. El mantenimiento correctivo se refiere a acciones ejecutadas para corregir o reparar fallas que afectan el nivel de servicio del pavimento, o presentan peligro para los usuarios. Si la condición del pavimento alcanza un alto grado de deterioro, las acciones de mantenimiento menor se hacen costosas y poco efectivas, difícilmente pueden mejorar la condición integral de la vía, y solo se logra mantenerla en una condición deficiente a un altísimo costo. Estos dos aspectos, tanto el nivel de calidad; como el costo del mantenimiento menor son indicadores de falla y de que el pavimento requiere acciones de mantenimiento mayor.

### **Mantenimiento mayor**

Las acciones de mantenimiento mayor son aplicadas a un tramo de vía, o al menos a una sección importante de la misma. Son actividades programadas y ejecutadas para el mejoramiento sustancial del pavimento.

Este tipo de mantenimiento se ha clasificado en: efectivo y correctivo, este último se aplica cuando el nivel de servicio de una vía está por debajo del mínimo aceptable desde el punto de vista funcional, o presenta importante debilitamiento estructural. En estos casos, se requieren acciones de mantenimiento mayor para corregir integralmente el problema. Este tipo de acciones se aplican al pavimento clasificado como "malo".

### **Mantenimiento mayor efectivo**

Se aplica antes que la condición del pavimento alcance un estado crítico, condición regular-baja, dentro de la zona "óptima" de rehabilitación.

En esta condición, el pavimento generalmente aún conserva buena parte de su estructura original, y acciones de mantenimiento mayor son altamente recomendables desde el punto de vista económico por las siguientes razones: (a) se requiere poca acción preparatoria, bacheo, etc. (b) un pequeño aporte estructural alarga considerablemente la vida del pavimento (c) rara vez se requieren capas de nivelación (especialmente inconveniente en vías urbanas), (d) los espesores de refuerzo -de requerirse- son reducidos y, (e) los costos de la rehabilitación son considerablemente menores.

Estos aspectos han sido muy estudiados recientemente dentro del marco de los esquemas de Gerencia de Pavimentos. En base a estudios de costos en el ciclo de vida de un pavimento, es invariablemente más económico y ventajoso el aplicar acciones de mantenimiento mayor antes de que la estructura alcance el punto de falla, este punto es el denominado punto "óptimo de rehabilitación". (Jugo B, 1993)

Dentro de las acciones de mantenimiento mayor se han considerado las siguientes:

Tratamientos superficiales

Capas asfálticas

Remoción por fresado

Reciclado

### CAPÍTULO 3. APLICACIÓN PRÁCTICA EN PAVIMENTOS URBANOS DE LA CIUDAD DE TARIJA

#### 3.1. Ubicación de la zona de estudio

Para la aplicación práctica se seleccionó 45 tramos de aproximadamente 100 metros, ubicados dentro del radio urbano de la ciudad de Tarija, entre ellos se tienen 28 tramos de pavimento flexible y 17 tramos de pavimento rígido escogidos aleatoriamente para efectuar la evaluación aplicando el modelo de IFI de la AIPCR.

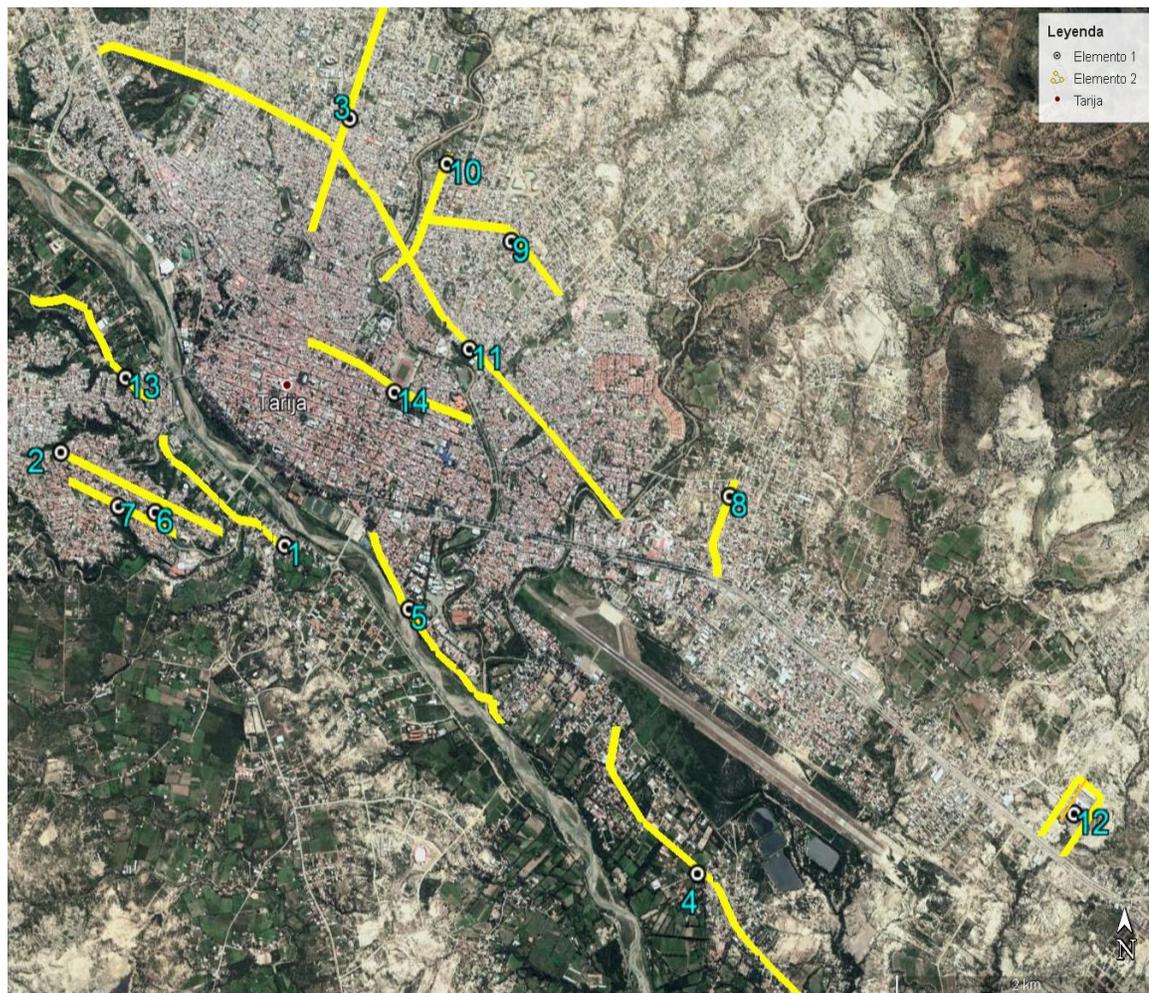
Los tramos de pavimentos flexibles y rígidos se encuentran ubicados en las siguientes avenidas Tabla N° 23 identificando la cantidad de tramos que se evaluara de cada avenida.

**Tabla N° 23 Avenidas Evaluadas con el modelo del IFI**

N°	Avenida	N° de Tramos	Pavimento
1	Los Sauces	3	Flexible
2	Julio Arce	4	Flexible
3	Mejillones	2	Flexible
4	San Luis	4	Flexible
5	Edmundo Torrejón	4	Flexible
6	Horacio Ara mayo	2	Flexible
7	José María Avilés	3	Flexible
8	Fray Quebracho	2	Flexible
9	Marcelo Quiroga Santa Cruz	2	Flexible
10	San Bernardo	2	Flexible
11	Circunvalación	11	Rígido
12	Acceso Terminal de buses	2	Rígido
13	Los Parrales	2	Rígido
14	Potosí	2	Rígido

Fuente: Elaboración propia

**Figura 24. Ubicación de las zonas de evaluación**



Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### **3.2. Proceso de estudio**

#### **3.2.1. Características de los tramos en estudio**

Para realizar la medición de la macrotextura y de la fricción del pavimento flexible y rígido, se consideró que los tramos deben ser rectos y no así en curvas, además que se debe realizar una inspección visual para determinar la variación de la condición del pavimento en los tramos a evaluar, porque el objetivo es tener una muestra variada de los pavimentos en cuanto a la condición para obtener datos del estado del pavimento y proponer diferentes mejoras de la capa de rodadura si así lo requiere.

### **3.2.2. Descripción de los tramos en estudio**

La zona de estudio comprende de 8 avenidas en la zona urbana de la ciudad de Tarija, siendo 7 avenidas construidas con pavimento flexible y 1 avenida construida con pavimento rígido.

A continuación, se describe que se consideró para el estudio, entre ellos no todos los tramos tienen la misma separación, y también varía la longitud de los tramos considerando 1 cuadra por tramo y la selección de los tramos para la evaluación se lo realizó de manera aleatoria luego de una inspección visual estimando la condición del pavimento.

Para la ubicación de los puntos de medición se utilizó imágenes del Google Earth para ubicar el primer punto y luego con la ayuda de una cinta métrica se dividió el segmento sometido al estudio.

Para encontrar la longitud de los tramos se utilizó el plano general de la ciudad de Tarija, se determinó la longitud de cada tramo y la longitud total de las avenidas sometidas a la evaluación.

Se realizó 6 lecturas por cada tramo 2 en la huella izquierda, 2 al centro entre la huella izquierda y derecha, y 2 lecturas en la huella derecha- la separación entre cada medida será descrito a continuación de acuerdo a la longitud de los tramos de cada avenida.

#### **3.2.2.1. Av. Los Sauces**

La avenida los Sauces es de pavimento flexible y cuenta con una calzada con dos carriles, siendo uno en cada dirección. Está ubicada en un inicio en el barrio German Bush y finaliza en el barrio San Martín, está constituida por dos carriles de los cuales el de bajada comunica al barrio German Bush a la altura de la avenida la Banda y el de subida comunica con la Universidad Privada Domingo Savio, tiene inicio en la avenida Héroes de la Independencia y su finalización en la avenida la Banda.

Tiene una longitud de 1440 metros, de los cuales se seleccionaron 3 tramos para realizar la evaluación. El tramo 1 entre las progresivas (0+165 – 0+310), donde se realizaron mediciones cada 25 metros. El tramo 2 se ubica entre las progresivas (0+712 – 0+870), igualmente se realizaron las mediciones cada 25 metros y finalmente el tramo 3 se

encuentra entre las progresivas (1+209 – 1+440), donde se realizaron las lecturas cada 35 metros debido a que existe mayor longitud del tramo.

**Figura 25. Detalle de la avenida los Sauces**



Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

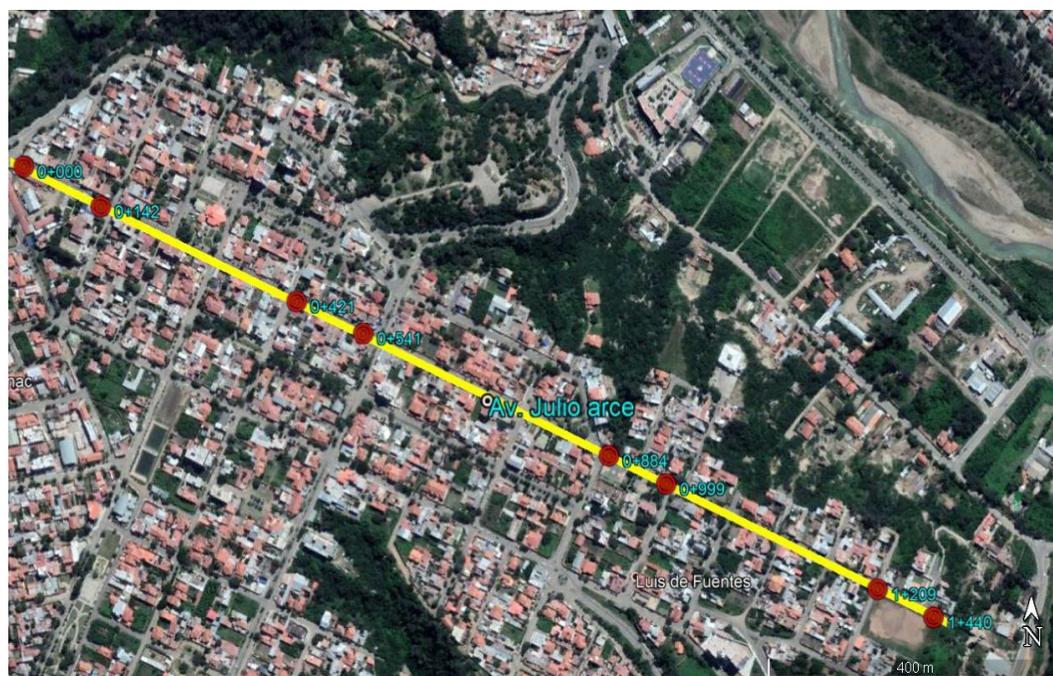
### 3.2.2.2. Av. Julio Arce Castrillo

La avenida Julio Arce Castrillo es de pavimento flexible y se encuentra ubicada en el barrio Senac, está constituida por una calzada con 2 carriles, un carril en cada dirección y su inicio es a partir de la avenida Héroes de la Independencia finalizando en una cancha del barrio Luis de Fuentes en un área verde.

La longitud de la avenida es de 1420 m, de las cuales se seleccionó 4 tramos para realizar las mediciones. El primer tramo esta entre las progresivas (0+000 – 0+142), en este tramo se realizaron las lecturas cada 25 metros. El tramo 2 se encuentra entre las progresivas (0+421 – 0+541), a partir de este tramo hasta el tramo 4 se realizaron las lecturas cada 20 metros, el tramo 3 se ubica en las progresivas (0+884 – 0+999) y finalmente el tramo 4 se encuentra entre las progresivas (1+209 – 1+440).

Esta avenida cuenta con dos tipos de capas de rodadura debido a que en el tramo entre la avenida héroes de la independencia y avenida Los Ceibos tiene un recapamiento debido al desgaste de la capa de rodadura, y a simple vista se nota la diferencia en la capa de rodadura con el tramo siguiente de la avenida.

**Figura 26. Detalle de la avenida Julio Arce Castrillo**



Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### 3.2.2.3. Av. Mejillones

La avenida Mejillones es de pavimento flexibles, se ubica en el barrio Avaroa entre la calle Ayoroa y la avenida el segundo anillo circunvalación, tienen una longitud de 2055 metros, debido a la variación de su ancho de calzada se decidió tomar en cuenta solo 2 tramos al iniciar la avenida mejillones que cuenta con un ancho de calzada constante para realizar las mediciones de campo y anotar las lecturas.

El tramo 1 se ubica entre las progresivas (0+000 – 0+104) de la avenida mejillones, y el tramo 2 se encuentra entre las progresivas (0+114 – 0+215) de la misma, las lecturas se realizaron cada 17 metros entre un punto y otro en los 2 tramos de la avenida mejillones ya que la longitud de los tramos es similar, esta avenida tiene una calzada, con 2 carriles uno en cada dirección de tránsito.

**Figura 27. Detalle de la avenida Mejillones**



Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

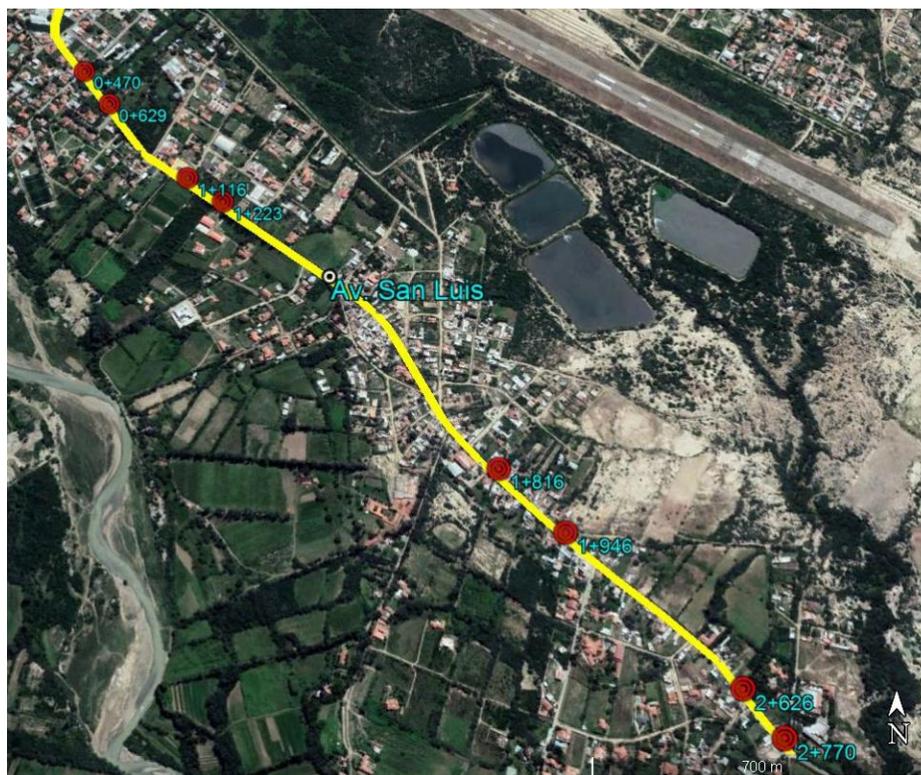
#### **3.2.2.4. Av. San Luis**

La avenida San Luis es de pavimento flexible está constituida por una calzada con 2 carriles, uno en cada dirección, tiene su inicio al final de la avenida Alto de la Alianza en el barrio petrolero y finaliza en el barrio San Luis a la altura del colegio Alemán del Sud, tiene una longitud de 2770 metros y se determinó realizar las mediciones en 4 tramos de esta avenida por la variación de la condición en su superficie luego de la inspección visual.

El tramo 1 se encuentra entre las progresivas (0+470 – 0+629), de las cuales se tomaron las lecturas a cada 25 metros, el tramo 2 se ubica entre las progresivas (1+116 – 1+223) se lectura cada 17 metros, el tramo 3 está entre las progresivas (1+816 – 1+946) donde se realizó las lecturas cada 20 metros y finalmente el tramo 4 se encuentra entre las progresivas (2+626 – 2+770) se realizan las lecturas cada 25 metros. Esta avenida tiene

en la mayor parte de su longitud desnivel entre la calzada y la berma debido a que se realizó un recapamiento.

**Figura 28. Detalle de la avenida San Luis**



Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### 3.2.2.5. Av. Edmundo Torrejón

La avenida Edmundo Torrejón es de pavimento flexible y tiene una longitud de 1800 metros y está constituida por dos calzadas con un total de 4 carriles, 2 carriles en cada dirección del tráfico, además de contar con una mediana tipo jardinera en varios tramos de la avenida. Tiene inicio en la calle Heriberto Trigo Paz y finaliza en el barrio San Gerónimo detrás del regimiento de infantería 20 de Padilla.

Se realizó la lectura de 4 tramos en esta avenida, el tramo 1 se encuentra entre las progresivas (0+086 – 0+190), tramo 2 en las progresivas (0+351 – 0+459), el tramo 3 entre las progresivas (0+508 – 0+613) y por último el tramo 4 ubicado entre las progresivas (0+713 – 0+815), las lecturas se realizaron cada 17 metros en los 4 tramos ya que la longitud es similar.

**Figura 29. Detalle de la avenida Edmundo Torrejón**



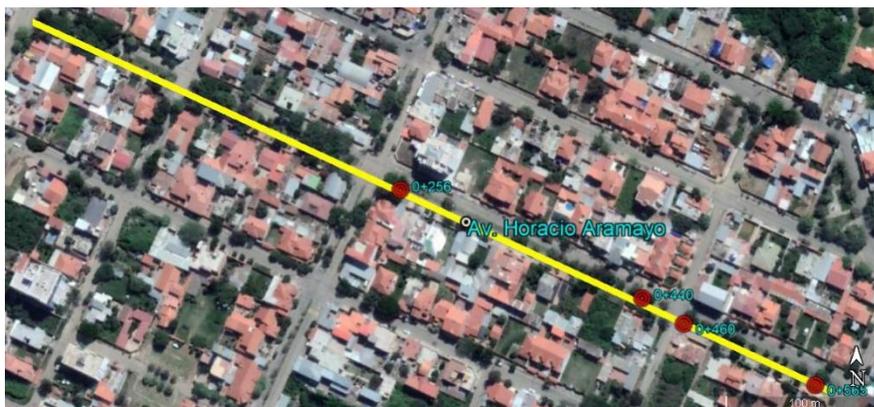
Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### **3.2.2.6. Av. Horacio Aramayo**

La avenida Horacio Aramayo es de pavimento flexible y se encuentra ubicada en el Barrio Luis de Fuentes tiene una longitud de 565 metros, tiene su inicio en la calle hermanos Ruiloba finalizando en la calle Dr. Mario Cossío Cejas, está constituida por dos calzadas con un total de 4 carriles 2 en cada sentido del tráfico y cuenta con una medianera tipo jardinera en toda a longitud de la avenida. Esta avenida tiene pavimento flexible en tres cuadras y las siguientes cuadras se encuentran con una estructura formada por adoquines de hormigón.

Se hizo la lectura de solo 2 tramos de pavimento flexible de esta avenida, donde el tramo 1 se encuentra entre las progresivas (0+256 – 0+440) tomando las lecturas cada 30 metros y el tramo 2 se ubica entre las progresivas (0+460 – 0+565) donde se va realizar las lecturas cada 17 metros.

**Figura 30. Detalle de la avenida Horacio Aramayo**



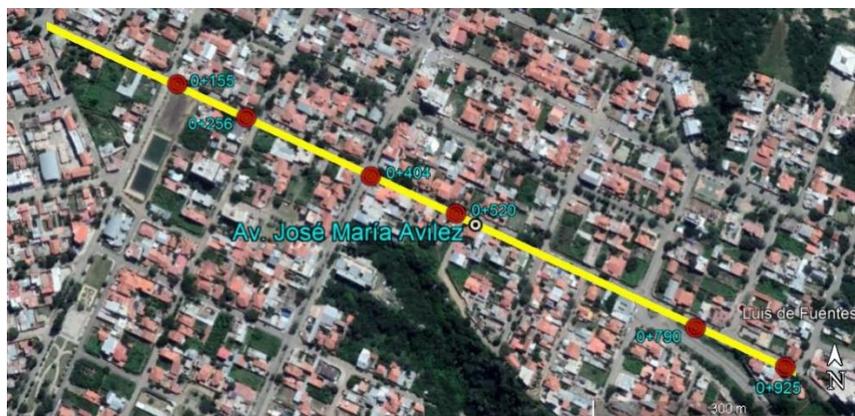
Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### 3.2.2.7. Av. José María Avilés

La avenida José María Avilés es de pavimento flexible y está constituida por una calzada, con 2 carriles uno en cada sentido y tiene una longitud de 925 m. tiene su inicio en la calle Manuel Alvares y finaliza en la calle Carlos Zenteno Cardozo, esta avenida conecta el barrio Senac con el barrio Luis de Fuentes.

Se seleccionaron 3 tramos a ser evaluados en esta avenida, el primer tramo se encuentra en las progresivas (0+155 – 0+256) y la lectura se las realizo cada 17 metros, el tramo 2 se ubica en las progresivas (0+404 – 0+520) y se lectura cada 20 metros y por último el tramo 3 tiene las siguientes progresivas (0+790 – 0+925) se determinó realizar las lecturas cada 22 metros.

**Figura 31. Detalle de la avenida José María Avilés**



Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### 3.2.2.8. Av. Fray Quebracho

La avenida Fray Quebracho es de pavimento flexible y está constituida por una calzada, con 2 carriles uno en cada sentido y tiene una longitud de 1590 m. tiene su inicio en la Avenida Jaime Paz Zamora y finaliza al final del barrio Aeropuerto, esta avenida conecta el barrio Aeropuerto con el barrio Morros Blancos.

Se seleccionaron 2 tramos a ser evaluados en esta avenida, el primer tramo se encuentra en las progresivas (0+000 – 0+136) y la lectura se las realizo cada 17 metros, el tramo 2 se ubica en las progresivas (0+255 – 0+375) y se lectura cada 20.

**Figura 32. Detalle de la avenida Fray Quebracho**



Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### 3.2.2.9. Av. Marcelo Quiroga Santa Cruz

La avenida Marcelo Quiroga Santa Cruz es de pavimento flexible y está constituida por una calzada, con 2 carriles uno en cada sentido y tiene una longitud de 2359 m. tiene su

inicio en la avenida San Bernardo y finaliza en la avenida las palmeras, esta avenida conecta los barrios: El Constructor, Pedro Antonio, Flores Luis Espinal y Narciso Camero.

Se seleccionaron 2 tramos a ser evaluados en esta avenida, el primer tramo se encuentra en las progresivas (0+424 – 0+594) y la lectura se las realizo cada 20 metros, el tramo 2 se ubica en las progresivas (0+790 – 0+920) y se lectura cada 20 metros.

**Figura 33. Detalle de la avenida Marcelo Quiroga Santa Cruz**



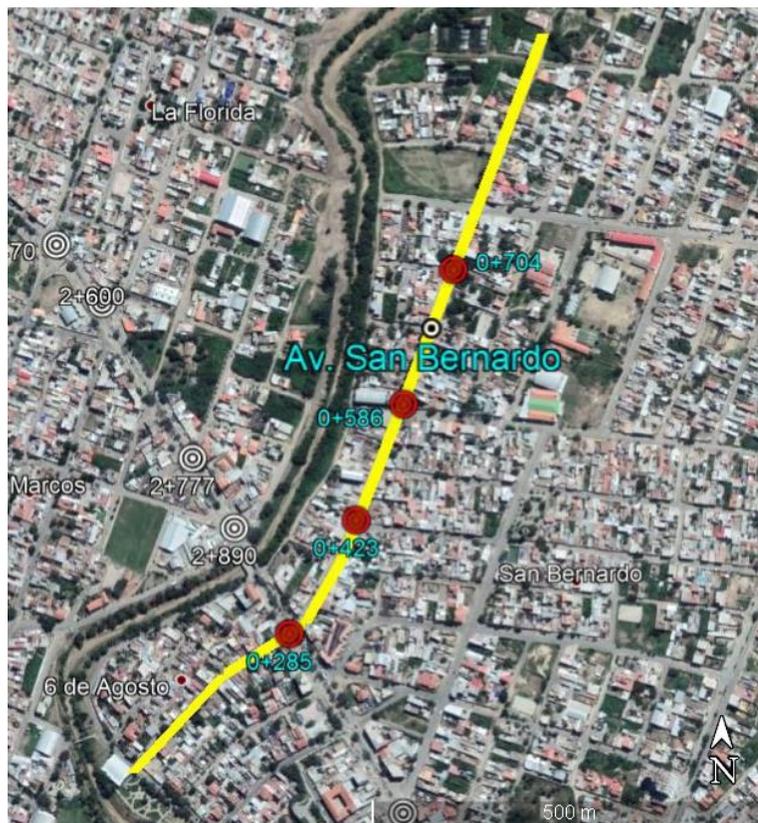
Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### 3.2.2.10. Av. San Bernardo

La avenida San Bernardo es de pavimento flexible y está constituida por una calzada, con 2 carriles uno en cada sentido y tiene una longitud de 1233 m. tiene su inicio en la avenida Circunvalación y finaliza en la calle Teniente Ricardo Estensoro, esta avenida se ubica en el barrio San Bernardo.

Se seleccionaron 2 tramos a ser evaluados en esta avenida, el primer tramo se encuentra en las progresivas (0+285 – 0+4230) y la lectura se las realizo cada 20 metros, el tramo 2 se ubica en las progresivas (0+586 – 0+704) y se lectura cada 20 metros.

**Figura 34. Detalle de la avenida San Bernardo**



Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### 3.2.2.11. Av. Circunvalación

La avenida Circunvalación es una vía construida con pavimento rígido con una longitud de 5,55 km, ubicada entre la avenida Panamericana al norte del mercado campesino y la avenida Fuerza Aérea Boliviana a la altura del barrio aeropuerto.

Está constituida por dos calzadas uno en cada sentido, y cada calzada cuenta con 2 carriles sumando en total 4 carriles 2 en cada dirección, además cuenta con una mediana tipo jardinera de 5 metros de ancho.

Se seleccionaron 11 tramos a ser evaluados en esta avenida, el primer tramo ubicado entre las progresivas (1+393 – 1+518), el segundo tramo se ubica entre las progresivas (2+470 – 2+595), el tercer tramos se ubica entre (2+600 – 2+700), el cuarto tramo se ubica en (2+777 – 2+877), el quinto tramo se ubica entre las progresivas (2+950 – 3+050), el sexto tramo se ubica entre las progresivas (3+050 – 3+150), el séptimo tramo se ubica entre las

progresivas (3+150 – 3+250), el octavo tramo se ubica (en 3+295 – 3+395) el noveno tramo esta entre (3+420 – 3+520), el décimo tramo se encuentra entre (4+560 – 4+660) y el onceavo tramo se encuentra entre las progresivas (5+215 – 5+405)

**Figura 35. Detalle de la avenida Circunvalación**



Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### 3.2.2.12. Avenida Acceso a la terminal de buses

La avenida 1 acceso a la nueva terminal es una vía construida con pavimento rígido con una longitud de 1247 m, ubicada entre la avenida Panamericana al sur y la nueva terminal de buses.

Está constituida por una calzada, cuenta con 2 carriles uno en cada sentido. De esta avenida se seleccionaron 2 tramos para realizar la evaluación del pavimento. El tramo 1 se encuentra entre las progresivas (0 + 000 - 0 + 200), y el tramo 2 entre las progresivas (0 + 754 – 0+898).

**Figura 36. Detalle de la avenida acceso a la terminal buses**



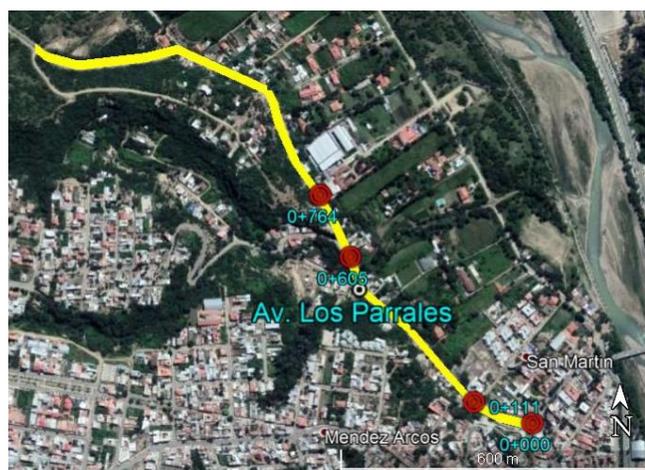
Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### 3.2.2.13. Avenida los Prrales

La avenida Los Prrales es una vía construida con pavimento rígido con una longitud de 2300 m, ubicada entre la avenida Héroes de la Independencia y el barrio Aranjuez.

Está constituida por una calzada, cuenta con 2 carriles uno en cada sentido. De esta avenida se seleccionaron 2 tramos para realizar la evaluación del pavimento. El tramo 1 se encuentra ubicado entre la progresivas (0 + 000 – 0 + 111), mientras que el tramo 2 se ubica entre las progresivas (0 + 605 – 0 + 764)

**Figura 37. Detalle de la avenida los Prrales**



Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### 3.2.2.14. Avenida Potosí

La avenida Potosí es una vía construida con pavimento rígido y se le aplicó un mantenimiento con pavimento flexible, con una longitud de 1498 m, ubicada entre la calle Corrado y la avenida los Membrillos.

Está constituida por una calzada, cuenta con 2 calzadas con 2 carriles en cada sentido además de una mediana de tipo jardinera en toda la longitud de la avenida. De esta avenida se seleccionaron 2 tramos para realizar la evaluación del pavimento rígido. El tramo 1 y el 2, se ubican entre las progresivas (0 + 365 – 0 + 529).

**Figura 38. Detalle de la avenida Potosí**



Fuente: Imagen de google earth, elaboración propia

### 3.3. Proceso de obtención de datos y modalidad de cálculo del IFI

El proceso de obtención de datos es una de las fases más importantes en la evaluación de pavimentos tanto flexible como rígido, los datos obtenidos fueron: Fricción de la superficie del pavimento mediante el uso del equipo de péndulo de fricción portátil, macro textura de la superficie del pavimento aplicando la técnica del círculo de arena, tipos de fallas presentes en la superficie del pavimento y características físicas de las vías en estudio (las cuales se las determino en campo de forma manual), para la modalidad de cálculo se realizará un ejemplo y se presenta en el anexo 3 todos los cálculos respectivos para realizar la evaluación de los pavimentos rígido y flexible.

### 3.3.1. Determinación de las propiedades físicas y geométricas de las vías

La determinación de las propiedades físicas y geométricas de los pavimentos urbanos de la ciudad de Tarija, se determinó en campo, corroborando mediante planos obtenidos de la Honorable Alcaldía de Tarija, teniendo las siguientes características geométricas de cada vía:

**Tabla N° 24. Características geométricas de los pavimentos evaluados**

<b>Avenida</b>	<b>Tramos evaluadas</b>	<b>N° carriles</b>	<b>Ancho de calzada (m)</b>	<b>Tipo de mediana</b>	<b>Ancho de mediana (m)</b>	<b>Longitud (km)</b>
Los Sauces	3	2	8,0	-		1,400
Julio Arce	4	2	8,0	-		1,400
Mejillones	2	2	8,0	-		1,510
San Luis	4	2	7,0	-		2,760
Edmundo Torrejón	4	4	7,0	jardinera	3,0	1,800
Horacio Aramayo	2	4	6.4	jardinera	2,0	0,500
José María Avilés	3	2	8,0	-		0,900
Fray Quebracho	2	2	8,0	-		1,590
Marcelo Q.	2	2	8,0	-		2,359
San Bernardo	2	2	8,0	-		1,233
Circunvalación	11	4	9,0	jardinera	2,0	5,600
Acceso a la terminal de buses	2	2	14,0	-		1,247
Los Parrales	2	2	8,0	-		1,509
Potosí	2	2	7,0	jardinera	2,0	1,498

Fuente: elaboración propia

### 3.3.2. Obtención de datos de campo a través del círculo de arena para macro textura y del péndulo británico para la fricción

Se tomará como ejemplo la primera lectura del tramo 1 de la avenida los Sauces ubicado en la progresiva 0+170 a 5 metros del inicio del tramo.

**Tabla N° 25. Datos de campo del círculo de arena y péndulo británico de la Av. Los Sauces**

Progres.	Círculo de arena D (cm)					Prom.	Péndulo de fricción					Prom.	T. (C°)	lado
0+170	19	18	18	17	19	18,2	53	50	51	52	51	51,4	21	D

Fuente: elaboración propia

**3.3.3. Se verificará el ajuste estadístico mediante la teoría de errores, para determinar el ajuste de los datos.**

**Tabla N° 26. Análisis estadístico de los datos**

Progres.	Círculo de arena					Desviación media dm	Error porcentual	Péndulo de fricción					Desviación media dm	Error porcentual
	Error absoluto							Error absoluto						
	Ea1	Ea2	Ea3	Ea4	Ea5			Ea1	Ea2	Ea3	Ea4	Ea5		
0+170	0,80	0,20	0,20	1,20	0,80	0,64	<b>3,52</b>	1,60	1,40	0,40	0,60	0,40	0,88	<b>1,71</b>

Fuente: elaboración propia

Error máximo según Norma AASHTO M-261-(96) Péndulo de Fricción 10%

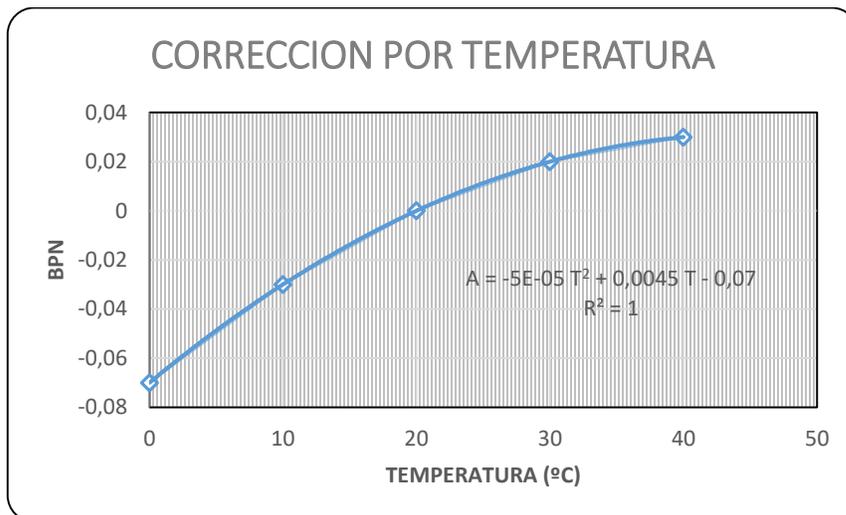
Error máximo según Norma NLT 335/87 ensayo Círculo de Arena 5%

Todos los valores medidos en campo con los dos métodos se ajustan a los valores máximos establecidos según norma.

### **3.3.4. Corrección por temperatura de las lecturas realizadas con el péndulo de fricción**

Se corrige por la temperatura usando la ecuación del gráfico. De acuerdo a los valores medidos del número de péndulo Británico (BPN) a temperaturas establecidas en el manual del equipo. Estos valores estándares de temperatura hacen que la fricción varíe en función del cambio de temperatura del pavimento, incrementando el valor de la fricción en caso de temperaturas elevadas y reduciendo el valor de la fricción en caso de temperaturas bajas.

**Figura 39. Grafica para la corrección por temperatura de la fricción**



Fuente: elaboración propia

**Tabla N° 27. Datos de fricción corregidos por temperatura del pavimento**

Progres.	T(°c)	corr.	Péndulo de Fricción corr.					Prom.	D (cm)	V(ml)
0+170	21	0,002	53,25	50,25	51,25	52,25	51,25	<b>51,65</b>	<b>18,2</b>	25

Fuente: elaboración propia

El valor corregido del péndulo de fricción es de 51,65 y el diámetro del círculo de arena es de 18,2 cm, el volumen utilizado para el ensayo del círculo de arena es de 25 ml.

### 3.3.5. Cálculo del IFI

A continuación se describe el cálculo del IFI (Índice de Fricción Internacional), a través de un modelo sugerido por la AIPCR (Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras), que se desarrolló a partir de un experimento donde se determinaron las constantes y parámetros necesarios para el cálculo del IFI.

Para el cálculo neto es necesario contar con los datos de entrada los cuales se obtienen a partir de las lecturas en cada tramo descrito anteriormente, estos datos son los siguientes:

- 1.- BPN = Numero de Péndulo (determinado directamente del péndulo de fricción).
- 2.- Dm = Diámetro medio del ensayo del círculo de arena.

Luego de obtener los datos de entrada a partir de las lecturas en campo se debe seguir los siguientes puntos para obtener el valor de IFI a partir de los cálculos.

**a) Determinación de la textura media del pavimento, mediante la siguiente ecuación**

$$H = \frac{4 \times V}{\pi \times D^2}$$

Donde:

H= Textura media del pavimento.

V= Volumen de arena utilizado = 25000 mm<sup>3</sup>

D = 18,2 cm (dato obtenido del anterior punto correspondiente al tramo 1 prog. 0+170).

$$H = \left( \frac{4 \times 25 \text{ cm}^3}{\pi \times (18.2 \text{ cm})^2} \right) \times 10 \frac{\text{mm}}{\text{cm}}$$

$$H = 0,961 \text{ mm}$$

**b) Determinación de la constante “Sp”**

$$Sp = a + b \times Tx$$

Dónde:

Sp = Constante de velocidad,

Tx = H o altura de macrotextura del pavimento,

a y b son las Constantes según Norma ASTM E 695 son (a = -11,5981; b = 113,6325).

Aplicando la ecuación se obtiene.

$$Sp = -11,5981 + 113,6325 \times 0,961$$

$$Sp = 97,60 \frac{\text{Km}}{\text{Hr}}$$

**c) Determinación del parámetro “F60”**

$$FR60 = FRs \times e^{\left( \frac{S-60}{Sp} \right)}$$

Donde:

FR60= Fricción de referencia a una velocidad de 60 km/h.

S= Velocidad de operación del equipo = 10 Km/hr.

Sp= Constante de Velocidad (Km/hr) = 97,60

FRs= 51.65 (dato obtenido del anterior punto correspondiente al tramo 1 prog. 0+170).

$$FR60 = 51,65 \times e^{\left(\frac{10-60}{97,60}\right)}$$

$$FR60 = 30,94$$

Se prosigue con el cálculo de F60 con la siguiente ecuación.

$$F60 = A + B \times FR60$$

Donde:

F60 = Estimado de la fricción en la curva idealizada a 60 km/h,

A y B son las constantes según Norma ASTM E 274 son (A = 0,078 y B = 0,0107)

FR60= Fricción de referencia a una velocidad de 60 km/h.

$$F60 = 0,078 + 0,017 \times 30,94$$

$$F60 = 0,409$$

**d) Finalmente se puede calcular la fricción para cualquier velocidad de circulación de los vehículos con el modelo**

$$F(S) = F60 \times e^{\left(\frac{60-S}{Sp}\right)}$$

Dónde:

F(S)= Fricción de una velocidad estimada.

F60 = Estimado de la fricción en la curva idealizada a 60 km/h,

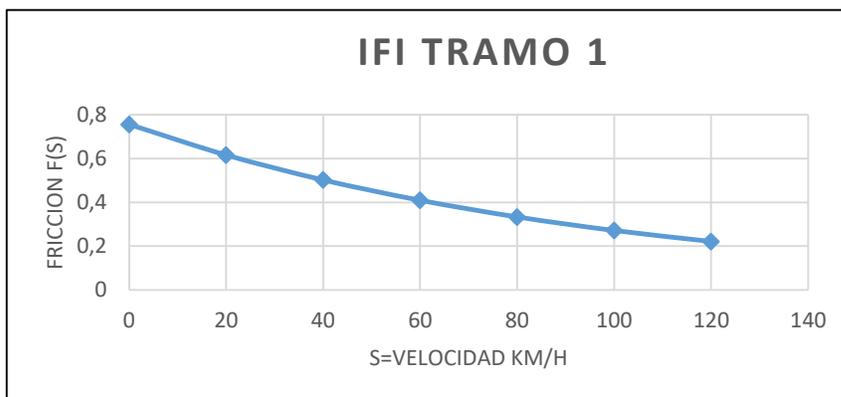
S= Velocidad de operación del equipo

Sp= Constante de Velocidad (Km/hr)

**Tabla N° 28. Valores para graficar la curva “Fricción vs Velocidad”**

0	20	40	60	80	100	120
<b>F(0)</b>	<b>F(20)</b>	<b>F(40)</b>	<b>F(60)</b>	<b>F(80)</b>	<b>F(100)</b>	<b>F(120)</b>
0,756	0,616	0,502	0,409	0,333	0,271	0,221

Fuente: Elaboración propia

**Figura 40. Variación de la fricción en función de la velocidad**

Fuente elaboración propia

**3.4. Proceso de obtención de datos y modalidad de cálculo del PCI**

Para la obtención de datos y cálculo del PCI se debe utilizar la siguiente tabla:

**Tabla N° 29. Hoja de registro y cálculo del PCI**

METODO PCI								CROOUIS		
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO										
HOJA DE REGISTRO										
NOMBRE DE LA VIA										
Avenida Los Sauces.										
EJECUTOR :										
Lopez Torrez Antony Eduard										
TRAMO :	1	SECCION :	1	UNIDA DE PRUEBA	1					
FECHA :		AREA DE PRUEBA	225							
1.- Piel de cocodrilo		8.- Agrietamiento reflejo de juntas		15.- Ahuellamientos						
2.- Exudacion o Sangrado		9.- Caída extrema via/hombrera		16.- Deformacion por empuje						
3.- Grietas de contraccion		10.- Agrietamiento Long. Y Trans		17.- Grietas de deslizamiento						
4.- Bombeo y hundimiento		11.- Baches y zanja reparada		18.- Hinchamiento						
5.- Corrugacion		12.- Agregados Pulidos		19.- Disgregacion y Desintegracion						
6.- Depresiones		13.- Huecos								
7.- Agrietamiento de Borde		14.- Acceso puentes- rejillas dren.								
FALLA Y SEVERIDAD	CANTIDAD							TOTAL	DENSIDAD %	VALOR DEDUCIDO
13 M	1							1	0,444	21
10 L	1,76	2,15						3,91	1,738	1
N°	VALOR DEDUCIDO							TOTAL	q	CDV
1	21	0,26						21,3	2	13
2	21	0,26						21,3	1	17
HDV = 21		m = 8,26		1 x 0,26						
CDVs =		17		PCI = 83						

Fuente: Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos Colombia (2006)

Donde primero se debe anotar la información del tramo a ser evaluado, seguidamente se anotan las fallas observadas y medidas en el pavimento de acuerdo al número de falla y severidad que presenta cada una.

Finalmente se procede al cálculo del PCI, utilizando ábacos de cada tipo de falla para determinar el valor deducido, y se utiliza un Abaco de ecuaciones para corregir el valor deducido mediante ecuaciones ya graficadas.

En la tabla anteriormente descrita se tiene que:

$$m = 1 + \frac{9}{98} \times (100 - HDV)$$

Donde:

HDV = Valor deducido máximo de todas las fallas presentes.

m = número de ecuaciones determinado por la ecuación.

$$PCI = 100 - CDVs$$

Donde:

CDVs = valor deducido corregido máximo de todas las ecuaciones.

PCI = Es la condición del pavimento evaluado y se determina con la siguiente ecuación.

### 3.5. Resultados de IFI para cada tramo en estudio

El resumen de los valores calculados de F (60) y Sp para la metodología IFI de los pavimentos se presentan en la tabla N° 30.

**Tabla N° 30. Resumen de cálculos del IFI**

Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Los sauces	Huella derecha	0,409	97,60
	Entre las do huellas	0,392	75,33
	Huella izquierda	0,433	72,04
Tramo 1	Huella derecha	0,341	65,90
	Entre las dos huellas	0,548	97,60
	Huella izquierda	0,427	78,85
Promedio		0,425	81,22

Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Los sauces	Huella derecha	0,486	140,90
	Entre las do huellas	0,535	122,83
	Huella izquierda	0,519	119,65
Tramo 2	Huella derecha	0,498	105,22
	Entre las dos huellas	0,473	140,90
	Huella izquierda	0,510	92,94
Promedio		0,504	120,40
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Los sauces	Huella derecha	0,505	167,83
	Entre las do huellas	0,528	129,65
	Huella izquierda	0,409	95,22
Tramo 3	Huella derecha	0,347	73,63
	Entre las dos huellas	0,371	70,44
	Huella izquierda	0,377	92,94
Promedio		0,423	104,95
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Julio Arce	Huella derecha	0,464	72,04
	Entre las do huellas	0,545	90,78
	Huella izquierda	0,451	67,38
Tramo 4	Huella derecha	0,334	57,94
	Entre las dos huellas	0,440	67,38
	Huella izquierda	0,331	51,24
Promedio		0,428	67,79
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Julio Arce	Huella derecha	0,239	41,92
	Entre las do huellas	0,272	47,26
	Huella izquierda	0,203	33,85
Tramo 5	Huella derecha	0,291	49,20
	Entre las dos huellas	0,373	61,81
	Huella izquierda	0,262	51,24
Promedio		0,274	47,55

Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Julio Arce	Huella derecha	0,246	39,54
	Entre las do huellas	0,281	45,33
	Huella izquierda	0,288	41,13
Tramo 6	Huella derecha	0,252	38,06
	Entre las dos huellas	0,287	41,92
	Huella izquierda	0,269	40,33
Promedio		0,271	41,05
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Julio Arce	Huella derecha	0,248	35,22
	Entre las do huellas	0,313	45,33
	Huella izquierda	0,277	39,54
Tramo 7	Huella derecha	0,314	46,24
	Entre las dos huellas	0,327	47,26
	Huella izquierda	0,252	35,90
Promedio		0,288	41,58
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Mejillones	Huella derecha	0,262	48,17
	Entre las do huellas	0,337	59,19
	Huella izquierda	0,275	49,20
Tramo 8	Huella derecha	0,316	47,26
	Entre las dos huellas	0,334	50,22
	Huella izquierda	0,287	45,33
Promedio		0,302	49,90
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Mejillones	Huella derecha	0,266	47,26
	Entre las do huellas	0,328	55,56
	Huella izquierda	0,286	50,22
Tramo 9	Huella derecha	0,291	44,42
	Entre las dos huellas	0,371	53,40
	Huella izquierda	0,288	50,22
Promedio		0,305	50,18

Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. San Luis	Huella derecha	0,337	68,85
	Entre las do huellas	0,343	55,56
	Huella izquierda	0,431	86,47
Tramo 10	Huella derecha	0,289	48,17
	Entre las dos huellas	0,394	70,44
	Huella izquierda	0,406	92,94
Promedio		0,367	70,41
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. San Luis	Huella derecha	0,317	56,81
	Entre las do huellas	0,365	53,40
	Huella izquierda	0,413	67,38
Tramo 11	Huella derecha	0,256	41,13
	Entre las dos huellas	0,368	59,19
	Huella izquierda	0,256	45,33
Promedio		0,329	53,87
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. San Luis	Huella derecha	0,278	45,33
	Entre las do huellas	0,403	59,19
	Huella izquierda	0,304	46,24
Tramo 12	Huella derecha	0,252	33,85
	Entre las dos huellas	0,269	37,26
	Huella izquierda	0,219	32,04
Promedio		0,287	42,32
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. San Luis	Huella derecha	0,506	140,90
	Entre las do huellas	0,680	158,06
	Huella izquierda	0,533	119,65
Tramo 13	Huella derecha	0,421	107,83
	Entre las dos huellas	0,546	113,51
	Huella izquierda	0,453	92,94
Promedio		0,523	122,15

Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Edmundo Torrejon  Tramo 14	Huella derecha	0,515	82,60
	Entre las do huellas	0,606	82,60
	Huella izquierda	0,484	88,63
	Huella derecha	0,425	75,33
	Entre las dos huellas	0,529	95,22
	Huella izquierda	0,425	75,33
Promedio		0,497	83,29
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Edmundo Torrejon  Tramo 15	Huella derecha	0,436	67,38
	Entre las do huellas	0,562	88,63
	Huella izquierda	0,544	116,58
	Huella derecha	0,504	88,63
	Entre las dos huellas	0,564	82,60
	Huella izquierda	0,558	105,22
Promedio		0,528	91,50
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Edmundo Torrejón  Tramo 16	Huella derecha	0,464	80,67
	Entre las do huellas	0,541	77,04
	Huella izquierda	0,471	73,63
	Huella derecha	0,453	80,67
	Entre las dos huellas	0,547	88,63
	Huella izquierda	0,394	68,85
Promedio		0,478	78,25
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Edmundo Torrejón  Tramo 17	Huella derecha	0,462	77,04
	Entre las do huellas	0,545	82,60
	Huella izquierda	0,450	84,53
	Huella derecha	0,528	77,04
	Entre las dos huellas	0,496	73,63
	Huella izquierda	0,550	97,60
Promedio		0,505	82,07

Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Horacio Aramayo  Tramo 18	Huella derecha	0,378	61,81
	Entre las do huellas	0,288	41,13
	Huella izquierda	0,211	32,04
	Huella derecha	0,294	49,20
	Entre las dos huellas	0,197	29,65
	Huella izquierda	0,231	35,22
Promedio		0,266	41,51
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Horacio Aramayo  Tramo 19	Huella derecha	0,382	63,17
	Entre las dos huellas	0,251	34,54
	Huella izquierda	0,286	43,63
	Huella derecha	0,324	50,22
	Entre las dos huellas	0,251	35,90
	Huella izquierda	0,236	35,22
Promedio		0,288	43,78
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. José María A.  Tramo 20	Huella derecha	0,312	61,81
	Entre las dos huellas	0,413	73,63
	Huella izquierda	0,345	66,47
	Huella derecha	0,398	88,63
	Entre las dos huellas	0,392	61,24
	Huella izquierda	0,393	66,92
Promedio		0,376	69,78
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. José María A.  Tramo 21	Huella derecha	0,363	72,04
	Entre las dos huellas	0,379	64,54
	Huella izquierda	0,349	62,83
	Huella derecha	0,350	60,44
	Entre las dos huellas	0,420	63,29
	Huella izquierda	0,394	68,85
Promedio		0,376	65,33

Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. José María A.	Huella derecha	0,399	65,10
	Entre las dos huellas	0,381	59,76
	Huella izquierda	0,322	48,29
Tramo 22	Huella derecha	0,339	47,26
	Entre las dos huellas	0,461	63,97
	Huella izquierda	0,414	57,94
Promedio		0,386	57,05
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Fray Quebracho	Huella derecha	0,340	53,40
	Entre las dos huellas	0,281	40,33
	Huella izquierda	0,252	38,74
Tramo 23	Huella derecha	0,269	44,42
	Entre las dos huellas	0,203	30,22
	Huella izquierda	0,236	35,90
Promedio		0,264	40,50
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Fray Quebracho	Huella derecha	0,252	43,63
	Entre las dos huellas	0,313	46,24
	Huella izquierda	0,273	43,63
Tramo 24	Huella derecha	0,240	33,85
	Entre las dos huellas	0,251	36,58
	Huella izquierda	0,216	33,29
Promedio		0,257	39,54
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Marcelo Quiroga S. C.	Huella derecha	0,270	45,33
	Entre las dos huellas	0,255	41,13
	Huella izquierda	0,261	43,63
Tramo 25	Huella derecha	0,251	42,72
	Entre las dos huellas	0,281	51,24
	Huella izquierda	0,230	41,13
Promedio		0,258	44,20

Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Marcelo Quiroga S. C.  Tramo 26	Huella derecha	0,295	45,33
	Entre las dos huellas	0,282	41,13
	Huella izquierda	0,202	31,35
	Huella derecha	0,286	49,20
	Entre las dos huellas	0,193	29,65
	Huella izquierda	0,226	35,22
Promedio		0,247	38,65
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. San Bernardo  Tramo 27	Huella derecha	0,261	46,24
	Entre las dos huellas	0,254	42,72
	Huella izquierda	0,242	41,13
	Huella derecha	0,251	40,33
	Entre las dos huellas	0,402	68,85
	Huella izquierda	0,246	46,24
Promedio		0,276	47,59
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. San Bernardo  Tramo 28	Huella derecha	0,301	48,17
	Entre las dos huellas	0,250	41,13
	Huella izquierda	0,237	33,85
	Huella derecha	0,272	41,92
	Entre las dos huellas	0,243	34,54
	Huella izquierda	0,296	44,42
Promedio		0,267	40,67
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Circunvalación  Tramo 29	Huella derecha	0,333	69,76
	Entre las dos huellas	0,286	46,35
	Huella izquierda	0,242	38,85
	Huella derecha	0,448	103,06
	Entre las dos huellas	0,315	50,67
	Huella izquierda	0,258	38,51
Promedio		0,314	57,87

Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Circunvalación	Huella derecha	0,348	51,81
	Entre las dos huellas	0,429	77,94
	Huella izquierda	0,320	52,49
Tramo 30	Huella derecha	0,257	38,51
	Entre las dos huellas	0,275	45,56
	Huella izquierda	0,231	35,10
Promedio		0,310	50,24
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Circunvalación	Huella derecha	0,290	52,38
	Entre las dos huellas	0,349	49,65
	Huella izquierda	0,372	53,40
Tramo 31	Huella derecha	0,376	68,85
	Entre las dos huellas	0,394	58,17
	Huella izquierda	0,416	72,15
Promedio		0,366	59,10
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Circunvalación	Huella derecha	0,325	43,85
	Entre las dos huellas	0,299	49,42
	Huella izquierda	0,291	40,90
Tramo 32	Huella derecha	0,493	78,51
	Entre las dos huellas	0,394	79,88
	Huella izquierda	0,376	73,63
Promedio		0,363	61,03
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Circunvalación	Huella derecha	0,252	35,90
	Entre las dos huellas	0,269	42,15
	Huella izquierda	0,232	34,76
Tramo 33	Huella derecha	0,330	47,83
	Entre las dos huellas	0,338	51,92
	Huella izquierda	0,298	46,35
Promedio		0,287	43,15

Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Circunvalación	Huella derecha	0,239	39,88
	Entre las dos huellas	0,222	34,99
	Huella izquierda	0,266	41,47
Tramo 34	Huella derecha	0,298	49,88
	Entre las dos huellas	0,299	43,63
	Huella izquierda	0,255	40,90
Promedio		0,263	41,79
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Circunvalación	Huella derecha	0,472	102,83
	Entre las dos huellas	0,451	87,94
	Huella izquierda	0,436	104,65
Tramo 35	Huella derecha	0,473	110,10
	Entre las dos huellas	0,536	144,19
	Huella izquierda	0,457	116,58
Promedio		0,471	111,05
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Circunvalación	Huella derecha	0,497	117,83
	Entre las dos huellas	0,449	78,51
	Huella izquierda	0,487	109,76
Tramo 36	Huella derecha	0,551	133,28
	Entre las dos huellas	0,585	122,83
	Huella izquierda	0,524	137,37
Promedio		0,515	116,60
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Circunvalación	Huella derecha	0,250	35,45
	Entre las dos huellas	0,301	38,74
	Huella izquierda	0,176	25,22
Tramo 37	Huella derecha	0,282	39,88
	Entre las dos huellas	0,406	53,40
	Huella izquierda	0,196	27,95
Promedio		0,268	36,77

Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Circunvalación	Huella derecha	0,457	73,97
	Entre las dos huellas	0,530	77,04
	Huella izquierda	0,316	43,63
Tramo 38	Huella derecha	0,520	84,53
	Entre las dos huellas	0,418	60,33
	Huella izquierda	0,432	73,97
Promedio		0,445	68,91
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Circunvalación	Huella derecha	0,380	94,31
	Entre las dos huellas	0,318	63,40
	Huella izquierda	0,285	54,42
Tramo 39	Huella derecha	0,315	69,76
	Entre las dos huellas	0,367	88,63
	Huella izquierda	0,299	66,47
Promedio		0,327	72,83
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Acceso a la terminal de buses	Huella derecha	0,226	32,26
	Entre las dos huellas	0,322	42,72
	Huella izquierda	0,193	27,72
Tramo 40	Huella derecha	0,255	36,24
	Entre las dos huellas	0,354	46,24
	Huella izquierda	0,215	30,67
Promedio		0,261	35,98
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Acceso a la terminal de buses	Huella derecha	0,244	35,22
	Entre las dos huellas	0,275	42,15
	Huella izquierda	0,227	34,76
Tramo 41	Huella derecha	0,322	47,83
	Entre las dos huellas	0,334	51,92
	Huella izquierda	0,298	46,35
Promedio		0,283	43,04

Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Los Parrales	Huella derecha	0,373	80,90
	Entre las dos huellas	0,252	40,79
	Huella izquierda	0,257	43,63
Tramo 42	Huella derecha	0,440	88,97
	Entre las dos huellas	0,308	49,20
	Huella izquierda	0,262	39,65
Promedio		0,315	57,19
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Los Parrales	Huella derecha	0,360	53,40
	Entre las dos huellas	0,394	65,90
	Huella izquierda	0,299	47,38
Tramo 43	Huella derecha	0,282	42,38
	Entre las dos huellas	0,248	39,65
	Huella izquierda	0,246	37,15
Promedio		0,305	47,64
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Potosí	Huella derecha	0,281	38,63
	Entre las dos huellas	0,293	49,08
	Huella izquierda	0,314	46,01
Tramo 44	Huella derecha	0,472	75,79
	Entre las dos huellas	0,398	77,26
	Huella izquierda	0,386	75,33
Promedio		0,357	60,35
Avenida y Tramo	Lado del ensayo	IFI	
		F 60	Sp
Av. Potosí	Huella derecha	0,334	60,67
	Entre las dos huellas	0,395	63,17
	Huella izquierda	0,376	56,92
Tramo 45	Huella derecha	0,330	53,85
	Entre las dos huellas	0,381	57,49
	Huella izquierda	0,409	68,29
Promedio		0,371	60,07

Fuente: Elaboración propia

### 3.6. Graficas de aceptación o rechazo como valuator de una carretera, estableciendo si requiere o no mejoramiento de la micro o macrotextura

Consideran los valores mínimos de fricción y textura según el manual de Carreteras V4A de la ABC son: Altura de arena igual 1mm para pavimento flexible, 0,5 mm para pavimento rígido y BPN del péndulo británico igual a 0,45 para ambos casos. Se procedió a calcular la constante de velocidad y el parámetro de fricción para expresar en valores de IFI los datos obtenidos del manual de carreteras de la ABC.

Además se tiene que  $a = -11,598$ ,  $b = 113,63$ ,  $A = 0,078$  y  $B = 0,0107$

Se procede al cálculo de los parámetros del IFI según la norma Boliviana para pavimentos:

#### Calculo de la gráfica de aceptación o rechazo para pavimento flexible

Determinación de la constante de velocidad.

$$Sp = a + (b \times Tx) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$Sp$  = Constante de velocidad.

$a$  = Constante de la norma = -11,598.

$b$  = Constante de la norma = 113,632.

$Tx$  = Textura del pavimento (mm) = 1.

$$Sp = 102 \text{ km/h}$$

Determinación de la fricción de referencia.

$$FR60 = FR(S) \times e^{(S-60)/Sp} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$FR60$  = Fricción de referencia a 60 km/h.

$FR(S)$  = Fricción obtenida en campo = 0,45.

$S$  = Velocidad de operación del equipo (km/h) = 10.

$Sp$  Constante de velocidad (km/h) = 102.

$$FR60 = 27,567$$

Determinación de la fricción a 60 km/h.

$$F60 = A + B \times FR60 \quad \text{Ecuacion 3}$$

$$Tx_{min} = (Sp - a)/b$$

Donde:

F60 = Fricción a 60 km/h.

A = Constante de la norma = 0,078.

B = Constante de la norma = 0,107.

FR60 = Fricción de referencia a 60 km/h = 27,567.

$$F60 = 0.373$$

Los valores mínimos de IFI requeridos según la norma Boliviana serán:

$$IFI = (0,373; 102)$$

Determinación de la curva “F” y la línea “T”, para la gráfica de aceptación o rechazo, obtenida despejando Tx de la constante de velocidad y así tener la textura mínima con la cual se grafica la línea “T”, como se muestra a continuación:

$$Tx_{min} = 1 \text{ mm}$$

Para obtener la curva “F”, se introduce la ecuación 1 y 2 en la ecuación 3, obteniendo:

$$F60 = A + B \times FR_{min} \times e^{\frac{S-60}{a+bTx}} \quad \text{Ecuación 3}$$

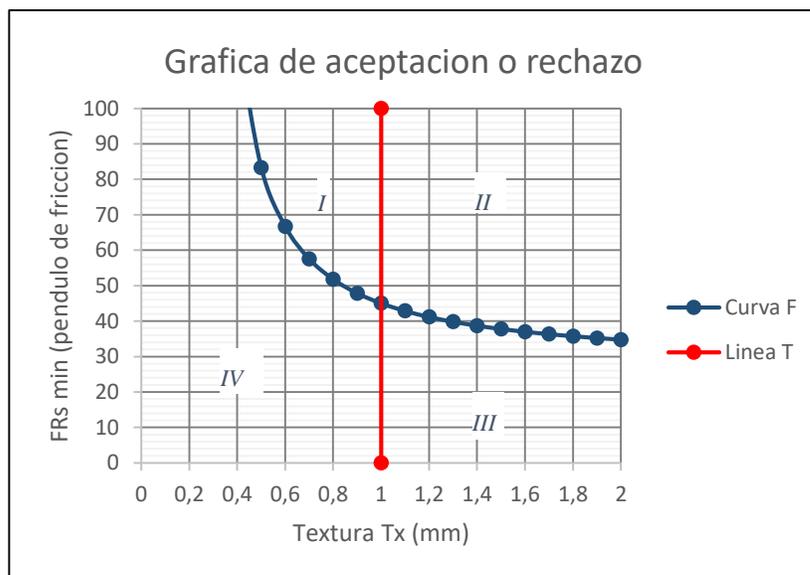
De la ecuación 3 se debe despejar la FRmin y así obtener la ecuación de la curva “F”

$$FR_{min} = \frac{\left[ (F60 - A) \times e^{\frac{S-60}{a+bTx}} \right]}{B}$$

Finalmente se deben dar valores de macro textura para obtener valor de fricción mínimos para realizar la gráfica de aceptación o rechazo.

**Figura 41. Grafica de aceptación o rechazo para pavimento flexibles de la AIPCR**

Tx	Frmin
0,0	0,37
0,1	0,00
0,2	2464,25
0,3	254,60
0,4	120,73
0,5	83,29
0,6	66,71
0,7	57,54
0,8	51,78
0,9	47,85
1,0	45,00
1,1	42,84
1,2	41,16
1,3	39,80
1,4	38,69
1,5	37,77
1,6	36,98
1,7	36,31
1,8	35,72
1,9	35,21
2,0	34,76



Fuente: elaboración propia

### Calculo de la gráfica de aceptación o rechazo para pavimento rígido

Determinación de la constante de velocidad.

$$Sp = a + (b \times Tx) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Sp = Constante de velocidad

a = Constante de la norma = -11,598

b = Constante de la norma = 113,632

Tx = Textura del pavimento (mm) = 1

$$Sp = 45,22 \text{ km/h}$$

Determinación de la fricción de referencia.

$$FR60 = FR(S) \times e^{(S-60)/Sp} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

FR60 = Fricción de referencia a 60 km/h

FR(S) = Fricción obtenida en campo = 0,45

S = Velocidad de operación del equipo (km/h) = 10

Sp Constante de velocidad (km/h) = 45,22

$$FR60 = 14,893$$

Determinación de la fricción a 60 km/h.

$$F60 = A + B \times FR60 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

F60 = Fricción a 60 km/h

A = Constante de la norma = 0,078

B = Constante de la norma = 0,107

FR60 = Fricción de referencia a 60 km/h = 14,893

$$F60 = 0,237$$

Los valores mínimos de IFI requeridos según la norma Boliviana serán:

$$IFI = (0,237; 45,22)$$

Determinación de la curva “F” y la línea “T”, para la gráfica de aceptación o rechazo, obtenida despejando Tx de la constante de velocidad y así tener la textura mínima con la cual se grafica la línea “T”, como se muestra a continuación:

$$Tx_{min} = (Sp - a)/b$$

$$Tx_{min} = 0,5 \text{ mm}$$

Para obtener la curva “F”, se introduce la ecuación 1 y 2 en la ecuación 3, obteniendo:

$$F60 = A + B \times FR_{min} \times e^{\frac{S-60}{a+bTx}} \quad \text{Ecuación 3}$$

De la ecuación 3 se debe despejar la FRmin y así obtener la ecuación de la curva “F”

$$FR_{min} = \frac{\left[ (F60 - A) \times e^{\frac{S-60}{a+bTx}} \right]}{B}$$

Finalmente se deben dar valores de macro textura para obtener valor de fricción mínimos para realizar la gráfica de aceptación o rechazo.

**Figura 42. Grafica de aceptación o rechazo para pavimento rígido de la AIPCR**

Tx	Frmin
0,0	0,20
0,1	0,00
0,2	1331,32
0,3	137,55
0,4	65,22
0,5	45,00
0,6	36,04
0,8	27,98
1,0	24,31
1,2	22,24
1,4	20,90
1,6	19,98
1,8	19,30
2,0	18,78



Fuente: elaboración propia

### 3.7. Análisis de resultados finales de la evaluación con el IFI y el PCI

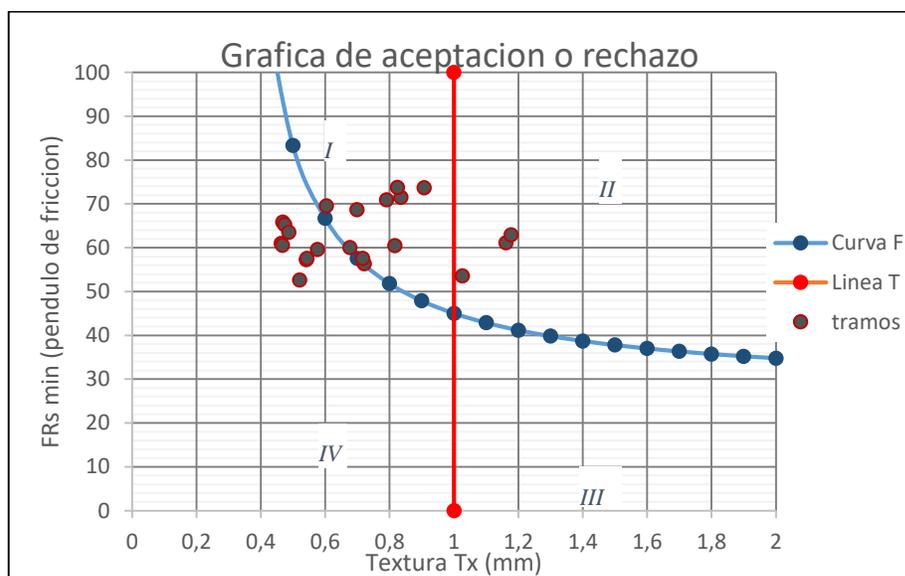
Los cálculos del IFI se encontraran en el Anexo 3 y los cálculos del PCI se encontraran en el Anexo 4 del presente estudio.

#### Resultados de la evaluación de los pavimentos flexibles y rígidos

Al realizar la evaluación del pavimento mediante el modelo de IFI se determinó la gráfica de aceptación o rechazo recomendada por la AIPCR, en la que se grafican los valores de fricción y textura recomendados por el manual de la ABC creando la curva F que nos da los valores mínimos de fricción en función de los parámetros del IFI ( $F_{60}$  y  $S_p$ ), además de graficar una limitante línea T en función de la macrotextura mínima requerida según el manual de la ABC tanto para pavimentos rígidos y flexibles.

Luego de graficar la curva F y línea T que nos sirven de referencia para evaluar la macrotextura y la fricción del pavimento, se procede a graficar de los valores de fricción y textura promedios obtenidos en cada tramo evaluado, que se presentan en las figuras 43 y 44.

**Figura 43. Grafica de valores de fricción y textura de pavimentos flexibles**



Fuente: elaboración propia

En la figura 43, se puede observar la ubicación de los 28 tramos de pavimentos flexibles evaluados en la gráfica de aceptación o rechazo. Donde los tramos evaluados se sitúan en

3 cuadrantes de la gráfica, los cuales nos determinan el estado de la superficie del pavimento.

Los tramos situados en el primer cuadrante de la gráfica nos indica que la superficie de pavimento requiere mejorar la macrotextura, esto podrá ser posible mejorando con la colocación de un riego de sello o una micro carpeta con el diseño adecuado que permita desalojar el volumen de agua que se presente por la precipitación específica de ese lugar.

Los tramos ubicados en el segundo cuadrante de la gráfica, (siguiendo las manecillas del reloj) entramos que según nuestros límites de  $F60$  y  $S_p$ , encontraremos los puntos que cumplen con una adecuada micro y macrotextura para cumplir las necesidades de nuestra carretera en cuanto a la seguridad del tránsito del vehículo.

Los tramos situados en el cuarto cuadrante, se presenta la situación más crítica de la superficie pavimento, ya que se requiere mejorar ambas, micro y macrotextura poniendo en riesgo el tránsito seguro de los vehículos, en este punto para la mejora del pavimento se debe realizar un recapado o capa de sello con agregado, en la superficie del pavimento flexible.

De acuerdo a los requerimientos mínimos del manual de la Administradora Boliviana de Carreteras para pavimentos flexibles se tiene un valor de fricción de 0.45 como mínimo, y un valor de macrotextura para pavimentos flexibles de 1 mm de altura, valores que según la AIPCR pertenecen a fricción regular adecuada para intensidades bajas o hasta media con precauciones, y una textura gruesa para tramos normales con velocidades superiores a 90 km/hr. Se determinó el siguiente IFI mínimo que deben presentar los pavimentos flexibles de la ciudad de Tarija.

IFI (0,373; 102)

De acuerdo al IFI mínimo calculado con las consideraciones del manual de la ABC para pavimentos flexibles se presenta la tabla N° 31 con su análisis de los tramos.

La evaluación del IFI en los pavimentos nos da un parámetro importante para controlar la seguridad que deben tener los usuarios que circulación en sus vehículos en los distintos pavimentos de la ciudad de Tarija, en caso de no cumplir con las exigencias mínimas del

manual de la ABC se debe realizar diferentes propuestas de solución para mantener los pavimento siempre en buen estado beneficiando a los usuarios.

**Tabla N° 31. Valores de IFI y requerimiento de pavimentos flexibles**

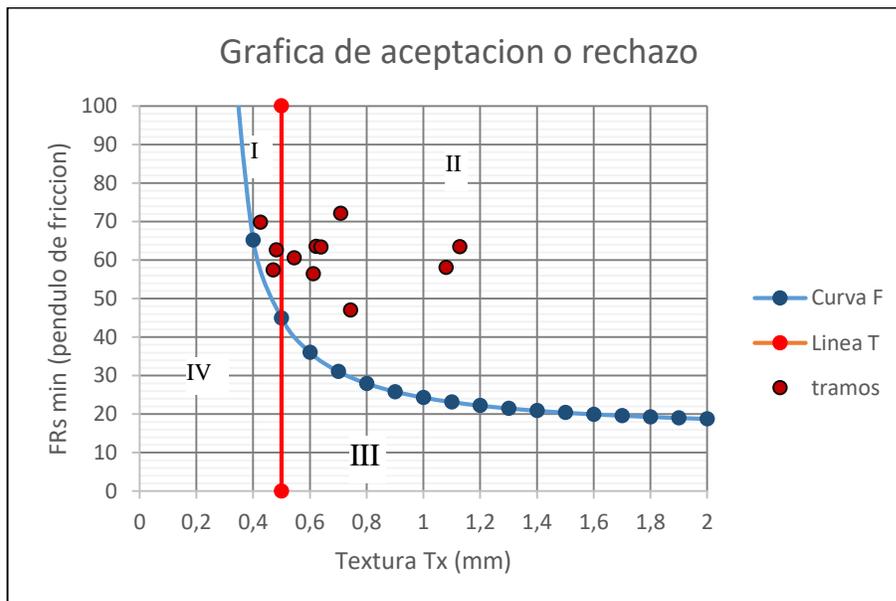
Resultado de la evaluación IFI (pavimento flexible)						
N°	Avenida	Tramo	f(60)	Sp	Vmax	Requiere el pavimento
1	Los Sauces	1	0,425	81,22	72,47	mejorar macrotextura
2	Los Sauces	2	0,504	120,40	99,80	adecuada micro macrotextura
3	Los Sauces	3	0,423	104,95	69,73	adecuada micro macrotextura
4	Julio Arce	4	0,428	67,79	68,12	mejorar macrotextura
5	Julio Arce	5	0,274	47,55	45,32	mejorar micro macrotextura
6	Julio Arce	6	0,271	41,05	47,52	mejorar micro macrotextura
7	Julio Arce	7	0,288	41,58	49,38	mejorar micro macrotextura
8	Mejillones	8	0,302	49,90	49,54	mejorar micro macrotextura
9	Mejillones	9	0,305	50,18	49,73	mejorar micro macrotextura
10	San Luis	10	0,367	70,41	59,63	mejorar micro macrotextura
11	San Luis	11	0,329	53,87	52,03	mejorar micro macrotextura
12	San Luis	12	0,287	42,32	48,20	mejorar micro macrotextura
13	San Luis	13	0,523	122,15	103,65	adecuada micro macrotextura
14	Edmundo T.	14	0,497	83,29	83,99	mejorar macrotextura
15	Edmundo T.	15	0,528	91,50	91,18	mejorar macrotextura
16	Edmundo T.	16	0,478	78,25	78,10	mejorar macrotextura
17	Edmundo T.	17	0,505	82,07	86,18	mejorar macrotextura
18	Horacio A.	18	0,266	41,51	46,21	mejorar micro macrotextura
19	Horacio A.	19	0,288	43,78	48,41	mejorar micro macrotextura
20	José María A.	20	0,376	69,78	61,93	mejorar macrotextura
21	José María A.	21	0,376	65,33	61,73	mejorar macrotextura
22	José María A.	22	0,386	57,05	60,30	mejorar macrotextura
23	Fray Q.	23	0,264	40,50	45,36	mejorar micro macrotextura
24	Fray Q.	24	0,257	39,54	45,84	mejorar micro macrotextura
25	Marcelo Q. S.	25	0,258	44,20	43,02	mejorar micro macrotextura
26	Marcelo Q. S.	26	0,247	38,65	43,89	mejorar micro macrotextura
27	San Bernardo	27	0,276	47,59	45,72	mejorar micro macrotextura
28	San Bernardo	28	0,267	40,67	45,56	mejorar micro macrotextura

Fuente: elaboración propia

Los 28 tramos de pavimento flexible evaluado con el modelo de IFI tienen requerimientos para mejorar la macro o microtextura, al compararlo con el IFI mínimo como se muestra en la tabla N° 31.

- Los tramos 2, 3 y 13 son pavimentos que presentan una superficie de rodadura con valores de fricción y macrotextura aceptables de acuerdo a los requerimientos mínimos del manual de la Administradora Boliviana de Carreteras ABC, que cumplen con el objetivo de brindar un servicio seguro a los usuarios que transitan estas calles con sus vehículos, obteniendo una buena adherencia y una aceptable evacuación de agua en condiciones mojadas del pavimento.
- Los tramos 1,4,14,15,16,17,20,21 y 22 son pavimentos que presentan una superficie de rodadura con valores de fricción F60 aceptables obteniendo una buena adherencia entre el pavimento y los neumáticos, permitiendo el tránsito seguro de los usuarios, sin embargo estos pavimentos en condiciones mojadas tienen bajo desalojo del agua permitiendo que se forme una película de agua peligrosa que impide el contacto de la llanta del vehículo con el pavimento, debido a su bajo valor de  $S_p$  teniendo que considerar la mejora de la macrotextura del pavimento.
- Los tramos 5,6,7,8,9,10,11,12,18,19,23,24,25,26,27 y 28 son pavimentos que presentan una superficie de rodadura en condiciones críticas en cuanto a la seguridad que deben brindar a los usuarios que transitan con sus vehículos en estas avenidas, debido principalmente a la baja fricción F60 que no permite una adherencia adecuada entre el pavimento y la llanta del vehículo ocasionando deslizamientos, sumado a esto un valor bajo de  $S_p$  que nos indica que estos pavimentos presentan grandes riesgos cuando están mojados ya que la película de agua no permitirá un buen contacto entre llanta del vehículo y el pavimento.

**Figura 44. Grafica de valores de fricción y textura de pavimentos rígidos**



Fuente: elaboración propia

En la figura 44, se puede observar la ubicación de los 11 tramos de pavimentos rígidos evaluados en la gráfica de aceptación o rechazo, se ubican en el primer y segundo cuadrante determinando el estado de la superficie del pavimento.

Los tramos situados en el primer cuadrante de la gráfica nos indican que la superficie de pavimento requiere mejorar la macrotextura, esto podrá ser posible mejorando con la técnica del raspado Grinding mediante la aplicación de un patrón discreto de ranuras, mediante la aplicación de discos diamantados.

Los tramos ubicados en el segundo cuadrante de la gráfica, (siguiendo las manecillas del reloj) entramos que según nuestros límites de F60 y Sp, encontraremos los puntos que cumplen con una adecuada micro y macrotextura para cumplir las necesidades de nuestra carretera en cuanto a la seguridad del tránsito del vehículo.

Teniendo en cuenta las exigencias mínimas del manual de la ABC, de fricción de 0.45 y una altura de textura de 0.5 mm para pavimentos rígidos, que según las recomendaciones de la AIPCR estos valores pertenecen a una fricción regular adecuada para bajas intensidades o hasta media con precauciones de vehículos. Y una textura media para

tramos normales con velocidades moderadas de 80 a 120 km/h, se calculó un IFI mínimo para pavimentos rígidos de:

$$\text{IFI} (0.237; 45.22)$$

En la tabla N° 32 se presentan los valores de IFI calculados con los datos de campo obtenidos de los 11 tramos, y su requerimiento al compararlo con el IFI mínimo recomendado por el manual de la ABC.

**Tabla N° 32. Valores de IFI y requerimiento del pavimento rígido**

Resultado de la evaluación IFI (pavimento rígido)						
N°	Avenida	Tramo	F(60)	Sp	Vmax	Requiere el pavimento
29	Circunvalación	29	0,314	57,87	77,46	adecuada micro macrotectura
30	Circunvalación	30	0,310	50,24	73,17	adecuada micro macrotectura
31	Circunvalación	31	0,366	59,10	85,30	adecuada micro macrotectura
32	Circunvalación	32	0,363	61,03	88,12	adecuada micro macrotectura
33	Circunvalación	33	0,287	43,15	68,72	mejorar macrotectura
34	Circunvalación	34	0,263	41,79	64,16	mejorar macrotectura
35	Circunvalación	35	0,471	111,05	136,32	adecuada micro macrotectura
36	Circunvalación	36	0,515	116,60	143,49	adecuada micro macrotectura
37	Circunvalación	37	0,268	36,77	65,05	mejorar macrotectura
38	Circunvalación	38	0,445	68,91	100,12	adecuada micro macrotectura
39	Circunvalación	39	0,327	72,83	81,88	adecuada micro macrotectura
40	N. terminal	40	0,261	35,98	63,01	mejorar macrotectura
41	N. terminal	41	0,283	43,04	68,37	mejorar macrotectura
42	Los Parrales	42	0,315	57,19	78,54	adecuada micro macrotectura
43	Los Parrales	43	0,305	47,64	71,95	adecuada micro macrotectura
44	Potosí	44	0,357	60,35	82,62	adecuada micro macrotectura
45	Potosí	45	0,371	60,07	85,10	adecuada micro macrotectura

Fuente: Elaboración propia

En el caso de los pavimentos rígidos se puede observar en la tabla N° 32 y la figura 43 los distintos valores de IFI y su requerimiento para brindar un tránsito seguro y confortable.

- Los tramos 33, 34, 37, 40 y 41 se ubican en el primer cuadrante de la gráfica de aceptación o rechazo, donde los valores de la fricción son aceptables y permiten una buena adherencia entre la llanta del vehículo y la superficie del pavimento brindando seguridad a los usuarios principalmente cuando el pavimento está seco, sin embargo cuando las

condiciones cambian y los pavimentos se encuentran mojados, la macrotextura de la superficie presenta un riesgo debido a que no tiene suficiente altura de textura que permita el desalojo del agua produciendo una película delgada del agua que impide el contacto de la llanta con el pavimento, en este caso se debe mejorar la macrotextura de la superficie del pavimento o circular a velocidades más bajas que las estipuladas en el diseño.

- Los tramos 29,30,31,32,35,36,38,39,42,43,44 y 45 se ubican en el segundo cuadrante de la gráfica de aceptación o rechazo, aprobando que la superficie del pavimento rígido cuenta con las condiciones necesarias de fricción y textura para el seguro uso de las vías en condiciones secas y mojadas.

Para complementar la evaluación de la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos urbanos de la ciudad de Tarija se pretendió realizar la evaluación de la condición del pavimento PCI y así poder brindar diferentes propuestas de mejoras en función de la textura del pavimento y de las fallas existentes en el mismo.

En las tablas N° 33 y 34 se presenta la condición de los pavimentos tanto rígido y flexibles a partir de la evaluación con el PCI y así poder determinar una relación para la propuesta de mejora de los pavimentos evaluados.

Las tablas nos muestran el valor numérico del PCI y su condición del pavimento según los tipos de fallas encontrados en los diferentes tramos evaluados.

El resultado de la evaluación PCI de los pavimentos flexibles se presenta en la tabla N° 33, donde se puede observar las distintas condiciones en la que se encuentran los pavimentos.

**Tabla N° 33. Resultados de la evaluación PCI de pavimentos Flexibles**

<b>Resultados de la evaluación PCI (pavimento flexible)</b>				
<b>N°</b>	<b>Avenida</b>	<b>Tramo</b>	<b>PCI</b>	<b>Condición del pavimento</b>
1	Los Sauces	1	83	muy buena
2	Los Sauces	2	36	mala
3	Los Sauces	3	39	mala
4	Julio Arce	4	80	excelente
5	Julio Arce	5	83	excelente
6	Julio Arce	6	89	muy buena
7	Julio Arce	7	100	muy buena
8	Mejillones	8	76	muy buena
9	Mejillones	9	35	mala
10	San Luis	10	85	muy buena
11	San Luis	11	65	buena
12	San Luis	12	40	mala
13	San Luis	13	33	mala
14	Edmundo T.	14	100	excelente
15	Edmundo T.	15	100	excelente
16	Edmundo T.	16	100	excelente
17	Edmundo T.	17	100	excelente
18	Horacio A.	18	76	muy buena
19	Horacio A.	19	49	regular
20	José María A.	20	69	buena
21	José María A.	21	63	buena
22	José María A.	22	73	muy buena
23	Fray Q.	23	65	buena
24	Fray Q.	24	49	regular
25	Marcelo Q.	25	63	buena
26	Marcelo Q.	26	59	buena
27	San Bernardo	27	76	muy buena
28	San Bernardo	28	40	mala

Fuente: elaboración propia

- Los tramos 4, 14, 15,16 y 17 se encuentran con una condición excelente en el que no se presentan fallas que deban ser intervenidas en estos momentos, el pavimento se encuentra en buen estado y brinda las condiciones necesarias para el tránsito.
- Los tramos 1, 5, 6, 8, 10,18, 22 y 27 están en muy buenas condiciones teniendo que tomar en cuenta algunas medidas de corrección de las fallas presentes si es necesario.

- Los tramos 11, 20, 21, 23, 25 y 26 tienen una condición buena del pavimento, en este punto ya se debe comenzar a pensar en un mantenimiento menor rutinario para que las fallas no se agraven y además evitar gastos innecesarios cuando el pavimento se encuentre en mal estado.
- El tramo 19 y 24 se encuentra el pavimento en condición regular determinando así que se debe realizar un mantenimiento menor para corregir el estado de las fallas y que permita el buen funcionamiento del pavimento.
- Y el pavimento en malas condiciones como los de los tramos 2, 3, 9, 12 ,13 y 28 deben tener un mantenimiento mayor debido a que el pavimento ya está fallado y no tiene la capacidad de brindar un tránsito debido a los vehículos.

**Tabla N° 34. Resultado de la evaluación PCI de pavimento rígido**

<b>Resultados de la evaluación PCI pavimento rígido</b>				
<b>N°</b>	<b>Avenida</b>	<b>Tramo</b>	<b>PCI</b>	<b>Condición del pavimento</b>
29	Circunvalación	29	93	excelente
30	Circunvalación	30	41	regular
31	Circunvalación	31	64	bueno
32	Circunvalación	32	80	muy bueno
33	Circunvalación	33	85	excelente
34	Circunvalación	34	54	regular
35	Circunvalación	35	77	muy bueno
36	Circunvalación	36	57	regular
37	Circunvalación	37	35	malo
38	Circunvalación	38	48	regular
39	Circunvalación	39	75	muy bueno
40	N. Terminal	40	100	Excelente
41	N. Terminal	41	90	Excelente
42	Los Pinales	42	42	regular
43	Los Pinales	43	34	malo
44	Potosí	44	80	muy bueno
45	Potosí	45	51	regular

Fuente: Elaboración propia

En el caso del pavimento rígido se tiene la misma evaluación de la condición del pavimento flexible.

-En este pavimento se debe realizar otros tipos de mejoramiento de los pavimentos que presentan fallas graves que los califiquen en condición de malo o regular como es el caso

de los tramos 2, 6, 8, 9 y 10, que deben ser tratados con mayor dificultad debido a que el pavimento ya no se encuentra en condiciones de brindar un buen funcionamiento.

-En el caso del pavimento en condiciones buenas, muy buena y excelente se debe realizar los tratamientos menores que son rutinarios y que no afectan la funcionalidad del pavimento como lo es en los tramos 1, 3, 4, 5, 7 y 11.

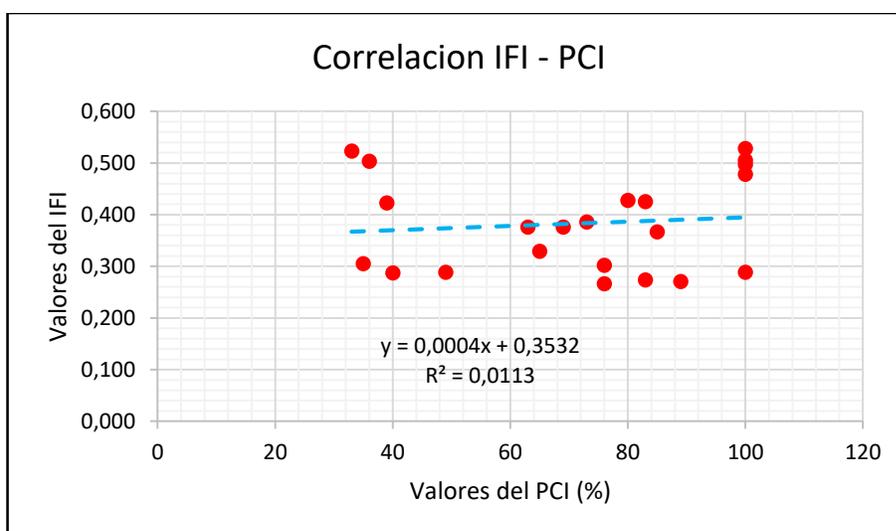
### 3.8. Propuestas de mejora según la evaluación con el IFI y el PCI

Según los resultados obtenidos en el punto anterior se determinó la evaluación de los pavimentos urbanos tanto flexible como rígido y se pretende dar una propuesta de solución tomando en cuenta ambos índices (IFI y PCI).

Para realizar la correlación se usara la regresión lineal y así poder encontrar el coeficiente de correlación, en los pavimentos flexibles se utilizaron los 22 tramos medidos para el IFI y el PCI. Para la correlación entre el IFI y el PCI para pavimentos rígidos solo se tomara en cuenta 11 tramos.

Se graficaron los 25 puntos para pavimento flexible y los 20 puntos para pavimento rígido de fricción vs PCI y se pudo obtener una gráfica de dispersión como se muestra en las siguientes figuras con diferentes ajustes.

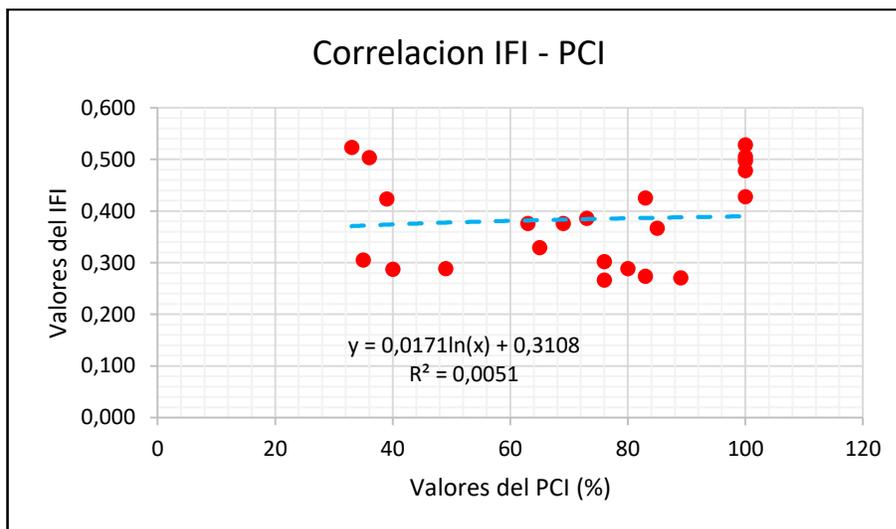
**Figura 45. Curva de correlación entre el IFI y el PCI para pavimentos flexibles con ajuste lineal**



Fuente: elaboración propia

Coeficiente de correlación = 0,106

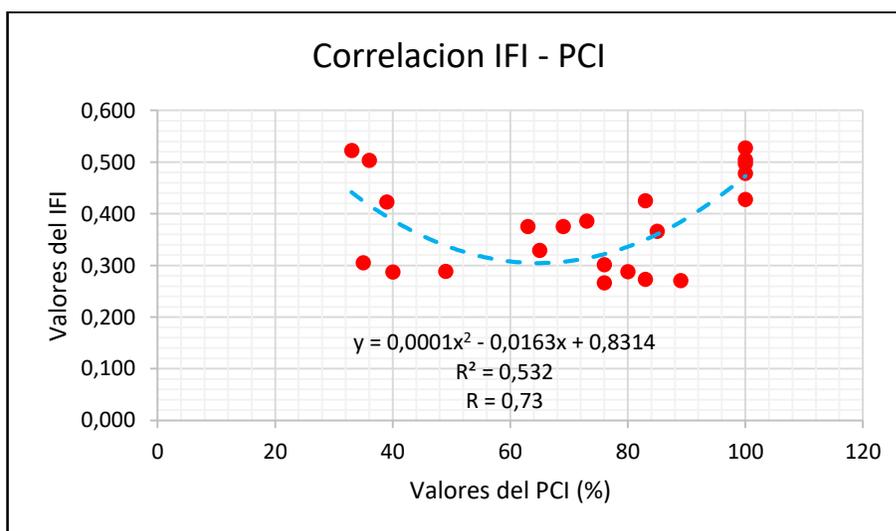
**Figura 46. Curva de correlación entre el IFI y el PCI para pavimentos flexibles con ajuste logarítmico**



Fuente: elaboración propia

Coeficiente de correlación = 0,148

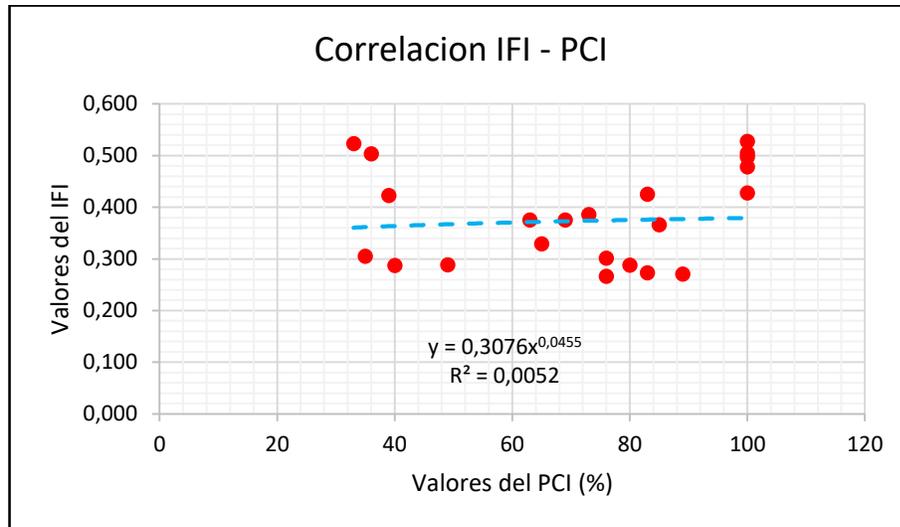
**Figura 47. Curva de correlación entre el IFI y el PCI para pavimentos flexibles con ajuste polinómico**



Fuente: elaboración propia

Coeficiente de correlación = 0,73

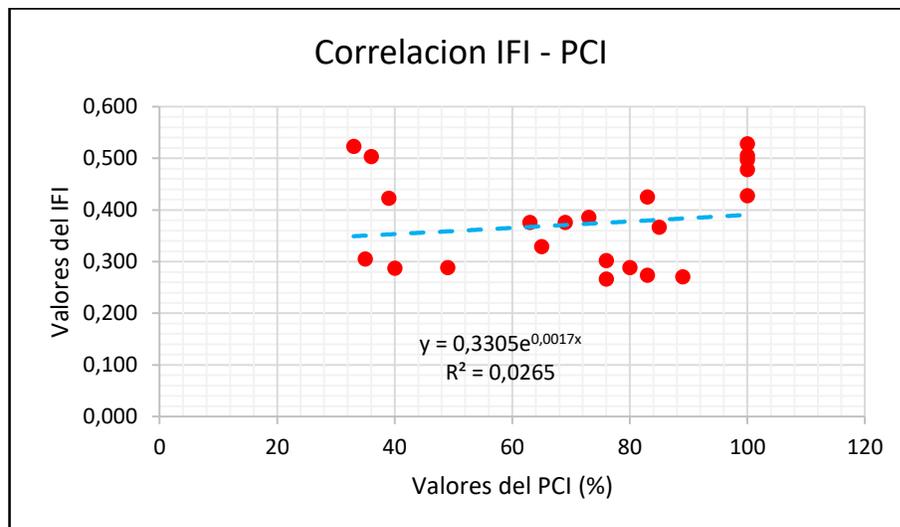
**Figura 48. Curva de correlación entre el IFI y el PCI para pavimentos flexibles con ajuste potencial**



Fuente: elaboración propia

Coefficiente de correlación = 0,153

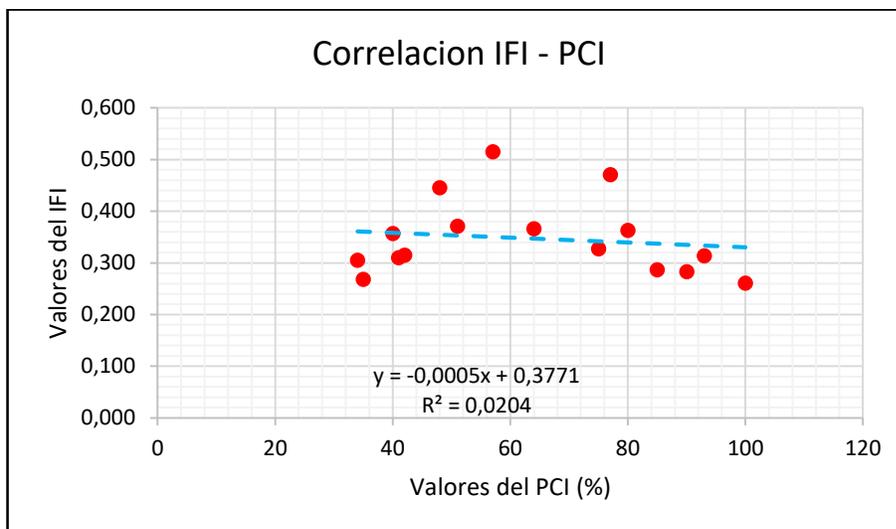
**Figura 49. Curva de correlación entre el IFI y el PCI para pavimentos flexibles con ajuste exponencial**



Fuente: elaboración propia

Coefficiente de correlación = 0,246

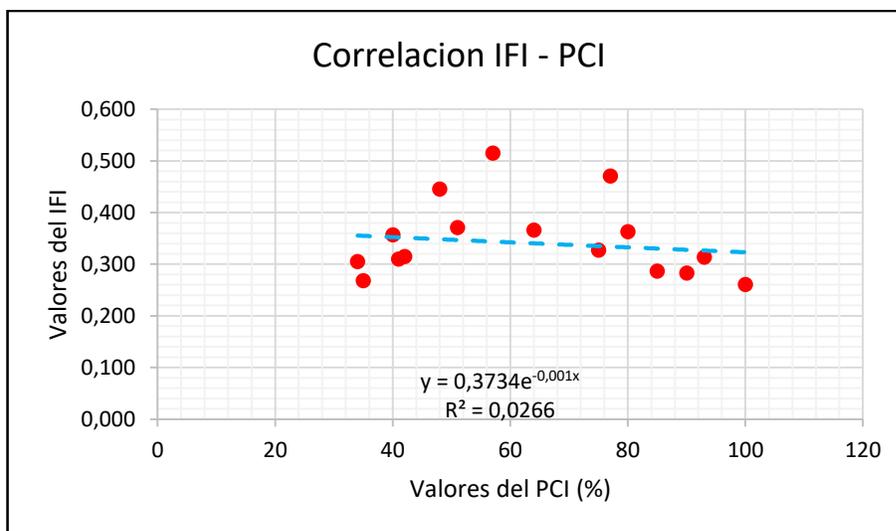
**Figura 50. Curva de correlación entre el IFI y el PCI para pavimentos rígidos con un ajuste lineal**



Fuente: elaboración propia

Coefficiente de correlación = 0,14

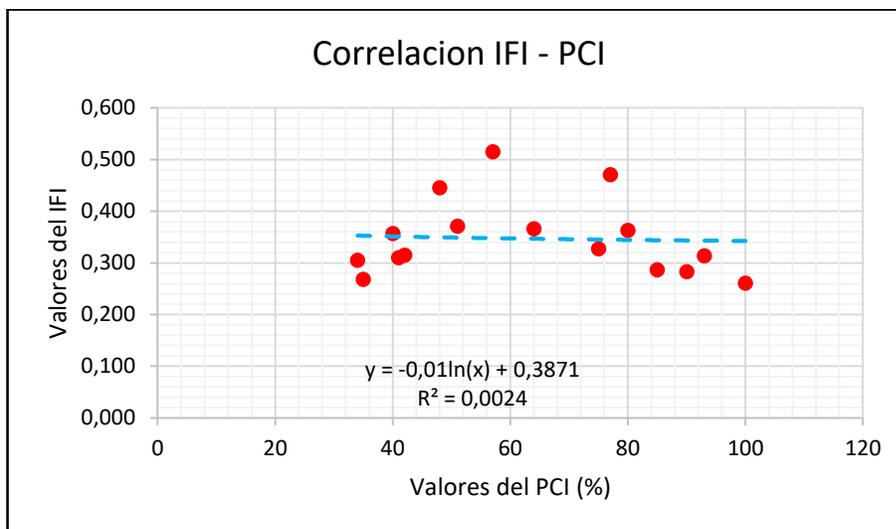
**Figura 51. Curva de correlación entre el IFI y el PCI para pavimentos rígidos con un ajuste exponencial**



Fuente: elaboración propia

Coefficiente de correlación = 0,16

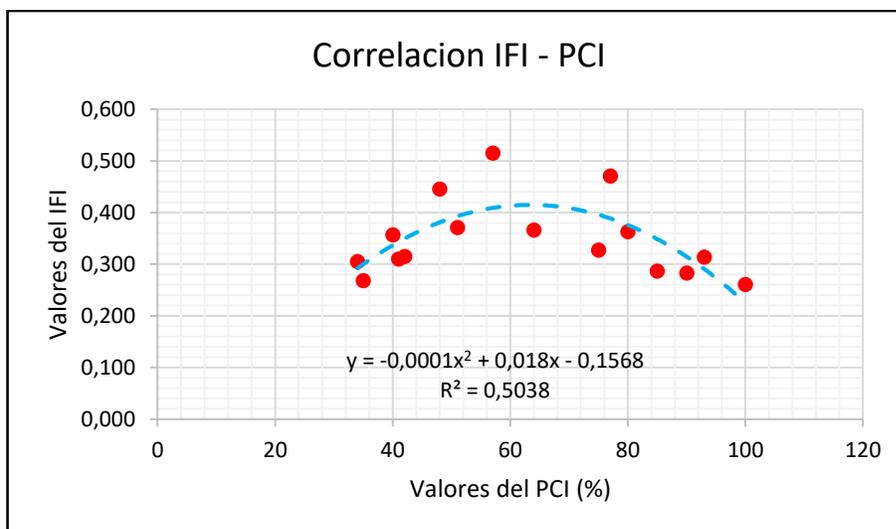
**Figura 52. Curva de correlación entre el IFI y el PCI para pavimentos rígidos con un ajuste logarítmico**



Fuente: elaboración propia

Coefficiente de correlación = 0,049

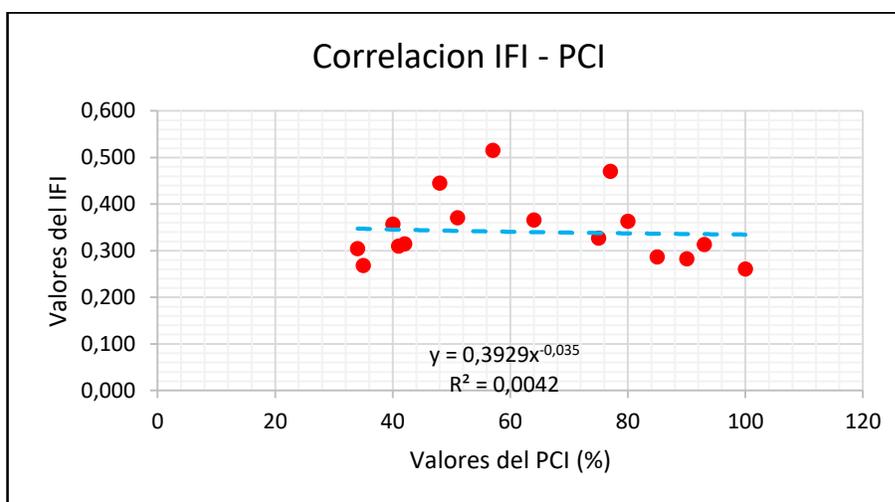
**Figura 53. Curva de correlación entre el IFI y el PCI para pavimentos rígidos con un ajuste polinomio**



Fuente: elaboración propia

Coefficiente de correlación = 0,71

**Figura 54. Curva de correlación entre el IFI y el PCI para pavimentos rígidos con un ajuste potencial**



Fuente: elaboración propia

Coefficiente de correlación = 0,065

Para realizar la interpretación de los resultados de los diferentes gráficos de correlación que existe entre el IFI y el PCI se usara la tabla N° 31 de correlación de Pearson.

Se determinó que el mejor ajuste para realizar una correlación entre las dos variables (IFI y PCI) es la regresión polifónica, en la cual se logra obtener un valor de coeficiente de correlación de:

Coefficiente de correlación = 0,71 para pavimentos rígidos.

Coefficiente de correlación = 0,73 para pavimentos flexibles.

**Tabla N° 35. Rangos de correlación y su significado**

Valor	Significado
-1,00	Correlación negativa grande y perfecta
-0,90 a 0,99	Correlación negativa muy alta
-0,70 a -0,89	Correlación negativa alta
-0,40 a -0,6 9	Correlación negativa moderada

-0,20 a -0,39	Correlación negativa baja
-0,01 a -0,19	Correlación negativa muy baja
0,00	Correlación nula
0,01 a 0,19	Correlación positiva muy baja
0,20 a 0,39	Correlación positiva baja
0,40 a 0,69	Correlación positiva moderada
0,70 a 0,89	Correlación positiva alta
0,90 a 0,99	Correlación positiva muy alta
1,00	Correlación positiva grande perfecta

Fuente: Szmidt, E., & Kacprzyk, J. (2010)

De acuerdo a la tabla N° 35, el valor de los pavimentos flexibles se ubica en el rango de 0,70 – 0,84 considerándose una correlación positiva alta.

Para los pavimentos rígidos el valor se ubica en el rango de 0,7 – 0,84 considerándose una correlación positiva alta.

### **Propuesta de mejora para pavimentos flexibles**

Para la condición mala del pavimento flexible según la evaluación PCI que son los tramos 2, 3, 9, 12 y 13 se propone realizar acción de mantenimiento mayor como las capas de sello con agregado, debido a que el pavimento ya presenta fallas graves que dificultan la circulación de los vehículos, este tipo de recapado además de suplir la mala condición del pavimento, permite mejorar la fricción debido a que se utiliza agregados de especial dureza y resistencia al pulimiento y se debe cumplir el requisito mínimo de textura, el IFI no se toma en cuenta ya que el pavimento llegó a su punto de falla y debe ser cambiado totalmente.

Para los pavimentos que se encuentran en la zona regular a buena según el PCI que son los tramos 11, 19, 20, 21, según la evaluación del IFI estos pavimentos requieren principalmente la mejora de la macrotextura por lo que se propone la mejora de un mantenimiento menor específicamente un frezado o texturizado localizado, que debe

realizarse la remoción con el cilindro rotatorio de un espesor entre 3 y 10 mm con la finalidad de mejorar la macrotextura y la fricción del pavimento además de un mantenimiento menor para mejorar la condición del pavimento como un bacheo o sellado de juntas según las fallas que presente el pavimento..

El caso de la condición del pavimento está en la calificación muy buena o excelente como lo son los tramos 1, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 14, 15, 16, 17, 18 y 22 solo requieren mantenimiento menor de sellado de juntas y bacheos, en el caso de estos pavimentos se requiere la mejora de macrotextura y en pocos casos la fricción siendo viable realizar un texturizado localizado, que debe realizarse la remoción con el cilindro rotatorio de un espesor entre 3 y 10 mm, y así poder brindar la seguridad necesaria a los usuarios que circulan sus vehículos en estos pavimentos.

### **Propuesta de mejora para pavimentos Rígidos**

En cuanto a los pavimentos rígidos igual no se pudo determinar una correlación entre el PCI y el IFI debido principalmente a que en las losas varían en la elaboración del texturizado, siendo que un tramo se determinaba texturas buenas y malas que no permitían realizar un ajuste adecuado del IFI, en cuanto a la fricción de los tramos medidos no variaba en su totalidad ya que una losa tiene mayor resistencia que un pavimento flexibles teniendo mayor tiempo de vida útil. Para la mejorar las propiedades de macrotextura en los tramos 27, 28 y 31 se puede usar una técnica de raspado como el Grinding que permite recuperar la macro textura mediante la aplicación de un patrón discreto de ranuras, mediante la aplicación de discos diamantados. Para los tramos que presentan un PCI regular bueno y malo se debe realizar un mantenimiento menor mediante sellado de juntas o bacheos con cemento asfáltico, y en el caso del tramo 31 se debe reemplazar la losa debido a que su condición es crítica y afecta mucho en la funcionalidad del pavimento.

## **CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. Conclusiones**

Evaluar la resistencia al deslizamiento es muy importante, ya que de este parámetro depende la seguridad y comodidad de los usuarios al circular con vehículos en los diferentes pavimentos urbanos de la ciudad de Tarija.

- Se logró recopilar información sobre el Índice de Fricción Internacional IFI, que es un parámetro que nos sirve para determinar el grado de seguridad y de conformidad de los usuarios, se originó a partir de los experimentos de la Asociación Internacional Permanente de Carreteras AIPCR, y está tomando roles cada vez de más importancia al momento de evaluar los pavimentos por su funcionalidad.
- Considerando los valores establecidos en el manual de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), estos deben cumplir en los diferentes tipos de pavimentos para poder brindar una superficie de rodadura satisfactoria para los vehículos (siendo así el valor de 0.5mm la macrotextura y 0,45 el coeficiente de fricción para pavimentos rígidos y 1mm la macrotextura y 0,45 el coeficiente fricción para pavimentos flexibles).
- Se realizó las mediciones de 45 tramos, de los cuales 28 son de pavimento flexible y 17 de pavimento rígido. Las mediciones fueron realizadas mediante el ensayo del círculo de arena y el ensayo del péndulo de fricción Británico, permitiendo obtener los valores de diámetro del círculo de arena para calcular la altura de la textura del pavimento en milímetros y los valores del número del péndulo Británico (BPN), con el cual se encuentra la fricción del pavimento a una velocidad de 10 km/h. Estas medidas son los parámetros de entrada para poder calcular el IFI en los pavimentos urbanos de la ciudad de Tarija.
- Al obtener las medidas de diámetro del círculo de arena se procede a obtener la altura de la macrotextura del pavimento y con este valor poder calcular la constante de velocidad  $S_p$ , y las medidas del BPN del péndulo de fricción se las usa de manera directa para obtener junto con la constante de velocidad el parámetro FR60 (fricción de referencia a una velocidad de 60 km/h), y finalmente obtener el parámetro F60 que es el valor de la fricción del pavimento a una velocidad de 60 Km/hr. Se encontraron

los valores de la constante de velocidad  $Sp$  y del parámetro de fricción  $F60$  para los 45 tramos evaluados de pavimentos urbanos de la ciudad de Tarija expresándolos en el formato del IFI ( $F60; Sp$ ).

- Al obtener los valores de IFI de los 45 tramos evaluados en la ciudad de Tarija se logró graficar la curva “Fricción – Velocidad de deslizamiento” y obtener el valor de la velocidad máxima de circulación de los vehículos para cada tramo, introduciendo el valor de IFI establecido por la ABC en la ecuación de la curva Fricción – velocidad de deslizamiento de los 45 tramos evaluados.
- Se encontró la correlación entre el IFI y el PCI evidenciando que tienen una relación polinómica no lineal, obteniéndose valores del coeficiente de correlación en una escala positiva alta como se menciona a continuación:

Coeficiente de correlación (pavimento flexible) = 0,73

Coeficiente de correlación (pavimento rígido) = 0,71

- Se determinó la gráfica de aceptación o rechazo para los valores de IFI, dicha grafica nos permite evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos comparando los valores medidos en campo con los valores establecidos en la ABC.
- Los pavimentos flexibles en su mayoría necesitan una mejora en la superficie de rodamiento tanto textura como la fricción, como lo es en el caso de los tramos 5,6,7,8,9,10,11,12,18,19,23,24,25,26,27 y 28 donde el pavimento requiere una mejora de macrotextura y microtextura, evidenciando el mal estado superficial del pavimento. En otras circunstancias se encuentran los tramos 1, 4, 14, 15, 16, 17, 20,21 y 22 que solo requieren una mejora de la macrotextura superficial, que interviene principalmente en el drenaje del agua, poniendo en riesgo a los usuarios en condiciones del pavimento mojado. Finalmente los tramos 2,3 y 13 tienen una adecuada macrotextura y microtextura obteniendo un pavimento seguro y confortable. Por lo que se puede verificar que la superficie de rodadura de los pavimentos en la ciudad de Tarija en su mayor parte no cumplen los parámetros mínimos establecidos en el manual de la ABC, atentando principalmente a la seguridad de los usuarios.

Los pavimentos rígidos a diferencia de los anteriores tienen una menor exigencia en cuanto a textura con relación a los pavimentos flexibles, motivo por el cual la mayoría de las superficies de rodadura evaluados cumplen con los requisitos mínimos establecidos en el manual de la ABC, tal es el caso de los tramos 29,30,31,32,35,36,38,39,42,43,44 y 45 que cuentan con una adecuada macrotextura y microtextura, y solo los tramos 33,34,37,40 y 41 requieren una mejora de la macrotextura poniendo en riesgo a los usuarios cuando el pavimento esta mojado.

- La propuesta de mejora se la realizo en base a la correlación entre el IFI y el PCI, siendo esta alta pero al no ser lineal se propone mejorar la superficie del pavimento en función de los dos parámetros de IFI y PCI.

Y se propuso realizar 4 tipos de mejora, 3 para pavimento flexible y 1 para pavimentos rígidos.

La primera para la condición del pavimento en mal estado con un IFI que no cumple los requisitos mínimos de la norma, realizar acción de mantenimiento mayor como las capas de sello con a agregado.

La segunda propuesta está destinada a los pavimentos que requieren mejorar solo la macrotextura según el IFI y que tienen un rango de regular a bueno en el PCI, se propone la mejora de un mantenimiento menor específicamente un frezado o texturizado localizado.

Y finalmente para los pavimentos en buen estado solo se requiere de mantenimiento menor como sellado de juntas moderadas y severas y bacheos.

Para pavimentos rígidos se propone mejorar la superficie del pavimento con bacheo de cemento asfaltico y sellado de juntas con cemento asfaltico.

#### 4.2. Recomendaciones

- Se recomienda operar correctamente el péndulo británico de fricción, las mediciones y los resultados de la práctica dependerán de la buena operación que se realice con el equipo de medición.
- Se debe evitar realizar el ensayo en condiciones ambientales desfavorables, en días lluviosos o días con mucho viento que afectan en la lectura de los datos del péndulo británico de fricción y el círculo de arena, principalmente por la des calibración de los equipos.
- Al momento de realizar la práctica contar con los instrumentos necesarios que brinden la seguridad al operador, y evitar así percances con los conductores de los vehículos tales como señalización de tránsito, cascos, guantes, botas, ropa con brillantinas.
- Es aconsejable realizar mediciones de microtextura (péndulo de fricción) y macrotextura (círculo de arena) de los pavimentos urbanos de la ciudad de Tarija, en distintas épocas del año considerando la variabilidad del tráfico de vehículos.
- Se recomienda que las mediciones futuras de fricción siempre estén acompañadas con una medida de macrotextura; esto con el fin de determinar la condición de las dos variables y en caso de existir algún problema de resistencia al deslizamiento, determinar cuál de los dos tipos de textura debe ser tratado.
- Existe un valor de IFI para cada punto donde se mida la microtextura y la macrotextura. Por lo tanto debe establecerse un criterio para obtener el IFI por tramos para determinar las condiciones de las carreteras.
- Se recomienda la utilización de valores mínimos de IFI para la aceptación de nuevas carreteras tomando en cuenta que el IFI integra la macrotextura y microtextura del pavimento, no es aconsejable estudiar estos parámetros por separado.