

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Un pavimento es una estructura vial, formada por una o varias capas de materiales seleccionados, el cual se construye sobre la sub-rasante. Un pavimento flexible está conformado básicamente por una capa asfáltica apoyada sobre capas compuestas por materiales granulares no tratados o ligados, los cuales a la vez se apoyan sobre la subrasante o terreno natural de cimentación. Dentro del pavimento, la capa asfáltica tiene como función principal ayudar a soportar los esfuerzos que transmiten las cargas vehiculares, y distribuir dichos esfuerzos a la subrasante en magnitudes que sean tolerables por esta.

El Ahuellamiento corresponde a una deformación vertical permanente del pavimento asfáltico que se refleja en el perfil transversal y que se presenta como un surco longitudinal a lo largo del camino bajo las huellas de rodado. Se produce por la acción de cargas debidas al tránsito, y esta deformación aumenta en el tiempo siendo cada vez mayor la profundidad.

En el Proyecto Modelo de deformación permanente para la evaluación de la condición del pavimento, se estableció un modelo de ahuellamiento con fines de auscultación basado en información obtenida de ensayos acelerados a escala natural, mediante la auscultación de pavimentos flexibles con ensayos no destructivos, como deflectometría de impacto y el conocimiento de la cantidad de repeticiones de carga equivalentes, se pretendió estimar el nivel de ahuellamiento que presentaba el pavimento evaluado, con la estimación del nivel de ahuellamiento se esperó que las políticas de mantenimiento y rehabilitación propias de un sistema de administración de pavimentos sean calibradas y aplicadas a su debido tiempo, los resultados del seguimiento del desarrollo de deformaciones plásticas en la pista de pruebas del Lanamme UCR demostraron que el espesor total de las diferentes capas de pavimento colocadas sobre la subrasante tiene un efecto significativo en la resistencia a las deformaciones plásticas en pavimentos flexibles, las deformaciones tienen una tendencia potencial, logrando un

comportamiento asintótico (menor tasa de deformaciones) y deformaciones muy inferiores en los pavimentos con bases tratadas (F. Leiva, 2017).

En el artículo Deformaciones permanentes y fatiga en concreto asfáltico (c.a.), La intención primordial de este artículo fue realizar una revisión y análisis de las variables de mayor influencia en la deformación permanente de la carpeta asfáltica, siendo este criterio de desempeño uno de los más significativos en el diseño de un pavimento tomando como referencia las experiencias registradas en documentos e investigaciones. De igual forma se presenta la comparación de la resistencia a la deformación permanente de mezclas asfálticas en Colombia (de acuerdo a INVIAS, 2007 y México SCT, 2010). Las investigaciones adelantadas en distintas partes del mundo sobre las deformaciones permanentes y fatiga en C.A. (Concreto asfáltico) nos brindan una posibilidad de predecir el comportamiento mecánico de resistencia a las deformaciones permanentes y número de repeticiones de carga, además de poder concebir una deformación permanente en el periodo de diseño de un pavimento, poder pronosticar cual va a ser la deformación acumulada total en 20 años que por lo general son los periodos de diseños de pavimentos en nuestro medio, y es además un reto para el ingeniero poder predecir cuál es la deformación que se va a tener en la estructura de pavimento. Teniendo en cuenta que esto exige conocer y caracterizar en el laboratorio, los materiales de mezcla asfáltica que es la unión del agregado pétreo y el ligante asfáltico además de la BG, SBG y subrasante cumpliendo cada uno los requisitos de calidad de cada una de las capas de la estructura como lo exige el INVIAS. Además, el ingeniero tiene la responsabilidad de diseñar por medio de estrategias de conservación con modelos de deterioro como en la actualidad el banco mundial lo exige como por ejemplo el HMD4. Se puede decir también que la deformación permanente muestra tres fases: la inicial es prácticamente instantánea, se determina en los inicios de ciclos de carga continuamente se da la pauta que puede apreciarse como transitoria, en la que la deformación se almacena progresivamente durante los ciclos de aplicación de la carga; y definitivamente, se tiende a un estado estable en el que deformación es muy pequeña; desde este instante, la concentración de carga ya no tiene consecuencia en la deformación (Pérez, 2015).

Basado en los resultados de pruebas dinámicas de fluencia, el efecto importante del esfuerzo cortante sobre el índice de deformación permanente, según las pruebas que él realizó, un aumento en el esfuerzo cortante de 0.1 a 0.25 MPa (con esfuerzo normal de 0.1 MPa) incrementa el índice de deformación permanente de 0.1 a 10 (un incremento del 100%). Por otra parte, variando el esfuerzo normal de 0.1 a 0.25 MPa (con un esfuerzo cortante constante de 0.1 MPa) no cambia significativamente el índice de deformación permanente (Celard, 1977).

Esta aplicación tiende a hacer del ahuellamiento un indicador a predecir y así controlar esta falla, buscando principalmente la preservación de la velocidad y seguridad, al evitar el fenómeno de hidroneo. Busca analizar las deformaciones en el tiempo y usar esta predicción para estimar la vida útil restante del pavimento usando como criterio el ahuellamiento máximo permisible.

El autor propone la aplicación de modelos de predicción de ahuellamiento para pavimentos flexibles en tramos urbanos y rurales, los modelos de predicción de ahuellamiento, corresponden a expresiones matemáticas que permiten predecir la evolución de este deterioro del pavimento en el tiempo, con base en el conocimiento de las condiciones al momento de la puesta en servicio y al momento de la realización del análisis.

El uso de modelos de predicción de este deterioro en los pavimentos, es muy importante porque nos permite determinar en forma directa el deterioro progresivo del ahuellamiento año a año de los pavimentos, para así tomar acciones y determinar si es más conveniente la alternativa de rehabilitación o mantenimiento en los pavimentos flexibles.

1.2. Situación problemática

El ahuellamiento es uno de los principales mecanismos de falla que ocurren en el pavimento asfáltico y genera muchos problemas en términos de seguridad. El surco se ha proporcionado gradualmente aumentando el número de cargas y, por lo general, aparece como sangrías en la dirección longitudinal de las ruedas. Esta falla se produce

con el tiempo debido a la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes, que se producen en cada carga.

La práctica actual tiende a hacer del ahuellamiento uno de los indicadores a controlar, buscando principalmente la preservación de la velocidad y seguridad, al evitar el fenómeno de hidropneumático. Para tal fin es común recurrir a modelos calibrados para predecir si la estructura puede llegar a presentar un ahuellamiento máximo que pueda ocasionar efectos adversos al funcionamiento del pavimento.

Si no se realiza la predicción del ahuellamiento, los efectos de esta falla estructural en el pavimento, causará el aumento de la deformación permanente que conduce a un incremento de la profundidad del surco, ocasionando serios problemas en las mezclas asfálticas. Este fenómeno puede reducir la capacidad de drenaje del pavimento y conduce a la retención de agua, fenómeno que provoca el hidropneumático y accidentes de tráfico, puede evolucionar a una posible cadena de fallas; como ser (fisura longitudinal → fisura de cocodrilo → bache). Además, la retención de agua puede acelerar el deterioro del pavimento debido a la humedad.

Lo ideal es detectar y evaluar los daños que puede causar el ahuellamiento en los tramos de estudio con la suficiente anticipación, de manera que las reparaciones resultantes correspondan a trabajos de conservación o reparación menor, y no de reconstrucción. De esta forma, se ahorra dinero y recursos, ya que el costo por reparar un pavimento es mucho más elevado que el costo por mantenimiento.

1.2.1. Problema

Después de expresada y analizada la situación problemática podemos expresar el siguiente problema:

- ¿De qué manera al aplicar los modelos de predicción de ahuellamiento, se podrá determinar la condición de esta falla, su grado de severidad y el comportamiento de este deterioro conforme el tiempo en pavimentos flexibles de nuestra región?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

El ahuellamiento es una falla que se manifiesta superficialmente en los pavimentos asfálticos, como consecuencia de la aplicación reiterada de las cargas del tránsito. Consiste en la acumulación de la deformación vertical permanente que se produce en todas las capas que forman la estructura del camino evidenciada en correspondencia con la circulación del tránsito, reduciendo la vida en servicio del pavimento y originando importantes riesgos en la circulación de los usuarios (Delbono,2017).

La angustia se manifiesta por un surco deprimido a lo largo de la trayectoria de la rueda en la superficie del pavimento. La falla se considera como un grave peligro para la seguridad de los vehículos porque el hidroplaneo puede ocurrir en presencia de surcos en tiempo lluvioso, lo que resulta en accidentes de tráfico graves. Además, los vehículos tienden a ser arrastrados hacia el camino de la rodera, lo que dificulta la conducción. Con el aumento del grado de la carretera, la construcción de carreteras de alto grado, la mejora de la gestión del tráfico y el surgimiento del tráfico, la formación de surcos se ha convertido en un tema crítico para el diseño, la construcción, y uso de estructura de pavimento asfáltico. Por lo tanto, además de la estabilidad a altas temperaturas de las mezclas asfálticas, actualmente existe un problema urgente por resolver en el diseño, es decir, cómo predecir la formación de surcos de la estructura del pavimento asfáltico a partir de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas (Lian-sheng,2017).

Para mantener la condición de los pavimentos a un nivel aceptable durante su vida útil, el desempeño futuro de los pavimentos debe predecirse con la mayor precisión posible, el ahuellamiento es uno de los mecanismos de avería (falla) más importantes en los pavimentos asfálticos., la formación de ahuellamiento se ha convertido en el modo dominante de rotura del pavimento flexible.

La factibilidad para medir el ahuellamiento de la superficie pavimentadas del presente proyecto se basará en los manuales técnicos para el diseño de carreteras de la ABC (administradora Boliviana de Carreteras), El procedimiento que se usó en este proyecto para determinar el ahuellamiento es mediante el empleo de una regla patrón y una regla graduada, las que permiten medir la profundidad de ahuellamiento en la superficie de rodadura de un pavimento.

El estudio a ser presentado evalúa tres distintas ecuaciones para predecir el ahuellamiento en el pavimento flexible. Estas han tenido una gran aceptación en las distintas agencias para poder evaluar este típico daño en el asfalto. Estas ecuaciones de predicción de ahuellamiento; fueron desarrolladas en laboratorios en Argentina en la Universidad Nacional de Rosario (Martínez – Pagola), Colombia en la Universidad del Cauca (Benavides) y en Perú en la Universidad del Piura.

1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema

En cuanto a la delimitación temporal los datos que serán considerados para la realización del trabajo propuesto serán enmarcados dentro del periodo de validez de los Manuales técnicos para el diseño de carreteras de la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C), considerando únicamente la temática del método para determinar el ahuellamiento descrito en el VOLUMEN IV. ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES.

Por la naturaleza de los datos y de cómo se obtienen, se aplicarán únicamente para los tramos seleccionados de pavimento flexible, los datos obtenidos solo servirán hasta el primer mantenimiento de los tramos de estudio de este trabajo.

Estos datos de ahuellamiento del pavimento no son aplicables para el análisis de otros tramos rurales, ya que las condiciones climáticas y las condiciones de tráfico y servicialidad del pavimento cambian.

Para la delimitación espacial de este proyecto, se ha seleccionado distintos tramos ya sea urbanos o rurales de la ciudad de Tarija, para así realizar la aplicación de los modelos para predecir el ahuellamiento.

La aplicación del modelo de predicción del ahuellamiento se realizará en los siguientes tramos urbanos y rurales:

Tramos urbanos:

- Calle Sevilla.
- Calle Ramon Rojas.
- Calle María Claret.

Tramos rurales:

- Tramo Guerrahuayco – San Andrés.
- Tramo Monte Centro – cruce San Pedro de Buena Vista.

En la siguiente tabla se muestra las coordenadas de inicio y fin de los tramos seleccionados.

Tabla N° 1 Ubicación geográfica de tramos urbanos

Tramo	Descripción	Prog.	Latitud	Longitud	Altura (m.s.n.m)
Calle Sevilla	inicio	0+000	21°31'50,30'' S	64°44'17,60'' O	1875
	fin	0+366	21°32'01,29'' S	64°44'22,00'' O	1869
Calle Ramon Rojas	inicio	0+000	21°31'56,45'' S	64°44'16,46'' O	1873
	fin	0+511	21°32'04,27'' S	64°44'19,25'' O	1867
Calle María Claret	inicio	0+000	21°32'26,17'' S	64°43'20,43'' O	1861
	fin	0+237	21°33'18,96'' S	64°43'17,63'' O	1862

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 2 Ubicación geográfica de tramos rurales

Tramo	Descripción	Prog.	Latitud	Longitud	Altura (m.s.n.m)
Guerrahuayco-San Andrés	inicio	0+000	21°35'31,68'' S	64°48'49,37'' O	1990
	fin	3+450	21°37'20,46'' S	64°49'03,77'' O	1982
Monte centro - Cruce San pedro de Buena Vista	inicio	0+000	21°28'06,44'' S	64°42'55,73'' O	1955
	fin	2+840	21°29'34,69'' S	64°42'46,54'' O	1938

Fuente: Elaboración propia

1.3. Justificación

En la actualidad la ciudad de Tarija tiene la característica de tener sus calles con diferentes tipos de pavimentos, de los cuales el más predominante es el pavimento flexible, pero muchos de estos presentan deterioro en su superficie, como ser fisuras, baches, deformaciones permanentes. En el cual dentro de estas deformaciones se encuentra el ahuellamiento y los principales factores que determinan la formación de esta falla son la magnitud, frecuencia de aplicación carga y condiciones climatológicas.

El ahuellamiento es uno de los deterioros típicos de los pavimentos flexibles. La presencia de este deterioro aumenta el riesgo a la seguridad del usuario ya que, la acumulación de agua en su depresión, aumenta la probabilidad de ocurrencia de accidentes. A la fecha, el nivel de ahuellamiento se evalúa principalmente utilizando la regla AASHTO de 1,2 m de longitud. Sus resultados son bastante confiables, el rendimiento de la medición es muy bueno y directo.

La presencia del ahuellamiento en el pavimento afecta no sólo la condición estructural del pavimento, sino que también afecta su condición funcional dificultando las condiciones de manejo y la seguridad de los usuarios en condiciones de circulación bajo lluvia, lo que puede provocar un accidente, debido a este potencial riesgo se exigen un control del ahuellamiento.

Es importante conocer el estado actual del pavimento mediante una evaluación superficial para determinar la cantidad y severidad de las fallas que presente y así poder seleccionar adecuadamente la metodología a usar para la rehabilitación o mantenimiento de la vía, de tal manera que cumpla con su vida útil, que no sea tan elevado su mantenimiento conforme al tiempo y brinde las condiciones más adecuadas para los usuarios.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Aplicar modelos de predicción de ahuellamiento en pavimentos flexibles de nuestra región empleando modelos predictivos de Argentina, Colombia y Perú; de tal manera, se pueda determinar la condición de esta falla, su grado de severidad y el comportamiento de este deterioro conforme el tiempo.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar el ahuellamiento en los diferentes tramos de estudio.
- Obtener el ahuellamiento promedio en cada tramo seleccionado.
- Clasificar el grado de severidad del ahuellamiento.
- Aplicar las ecuaciones de predicción del ahuellamiento y realizar comparaciones analizando sus ventajas y desventajas.
- Justificar y validar el grado de confiabilidad de los modelos de predicción utilizados.
- Analizar los resultados obtenidos del comportamiento del deterioro de pavimentos.
- Plantear alternativas de solución al ahuellamiento en los tramos de estudio.
- Implementar un plan de mantenimiento o acciones a seguir en función a la escala del valor de severidad del deterioro e incluir un presupuesto por tramos.

1.5. Hipótesis

Mediante la predicción del ahuellamiento de pavimentos se determinará la condición, grado de severidad, y comportamiento actual y a futuro del ahuellamiento de los tramos seleccionados, para así poder seleccionar un adecuado plan de rehabilitación o mantenimiento de la carretera.

1.6. Operacionalización de las variables

1.6.1. Variable independiente

Comportamiento del ahuellamiento en los pavimentos asfálticos.

Tabla N° 3 Conceptualización variable independiente

Variable independiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Fuente teórica
Comportamiento del ahuellamiento en los pavimentos asfálticos	Método para determinación de depresión presentes en la superficie del pavimento flexible	Nivel de severidad de ahuellamiento	Clasificación del ahuellamiento	Bajo: Depresión entre 0 y 5 mm.
				Medio: depresión entre 5 y 10 mm.
				Alto: depresión es mayor a 10 mm.

Fuente: Elaboración propia

1.6.2. Variable dependiente

Condición superficial y estructural del pavimento flexible.

Tabla N° 4 Conceptualización variable dependiente

Variable dependiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Fuente teórica
Condición superficial y estructural del pavimento flexible	Determina el estado en el que se encuentra la superficie y estructura de un pavimento flexible	Evaluación superficial	Condición de la superficie del pavimento	Norma ASTM

Fuente: Elaboración propia

1.7. Identificación del tipo de investigación

El trabajo a realizar corresponde a un tipo de investigación aplicada, a un nivel de investigación descriptiva en la que se observa los fenómenos tal como se dan en su contexto natural para luego analizarlos, se determina los ahuellamientos que se presenta en la vía, caracterizándolos de manera cuantitativa y cualitativa.

La información que se obtendrá en este tipo de investigación nos permite conocer a mayor profundidad como están respondiendo los tramos evaluados y nos servirá mucho para optar por una adecuada rehabilitación o mantenimiento si es necesario.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

- **Unidad de estudio**

Pavimentos flexibles.

- **Población**

Ahuellamiento de pavimentos flexibles.

- **Muestra**

La muestra seleccionada de la población para realizar el trabajo es el ahuellamiento de pavimentos flexibles en vías urbanas y carreteras del departamento de Tarija.

- **Selección de las técnicas de muestreo**

El muestreo para el presente trabajo se realizó en segmentos de 100 metros cada kilómetro de los tramos seleccionados en la muestra.

Tabla N° 5 Muestreo del trabajo

Tramos urbanos y rurales	Longitud (m)
Calle Sevilla	366
Calle Ramon Rojas	511
Calle María Claret	237
Tramo Monte Centro – cruce San Pedro de Buena Vista	2840
Tramo Guerrahuayco – San Andrés	3450

Fuente: Elaboración propia

1.9. Métodos y técnicas empleadas

1.9.1. Métodos

Para este proyecto se usará el método empírico y método teórico.

Por parte del método empírico se realizará la observación y medición de las variables mediante los ensayos que están planteados en el VOLUMEN 4. ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES de los manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia.

El contenido de este volumen está constituido por normas y procedimientos que no deben cambiarse bajo ninguna circunstancia. En especial, los ensayos de laboratorio deben ajustarse exactamente a los procedimientos y criterios que se indican. Cualquier alteración de los mismos obliga a anular el resultado obtenido, pues imposibilita su comparación con otras especificaciones y resultados obtenidos de otros ensayos.

El contenido de este manual es una recopilación de normas ya establecidas y desarrolladas por organismos especializados.

1.9.2. Técnicas

Las técnicas de investigación son el conjunto de herramientas, procedimientos e instrumentos utilizados para obtener información y conocimiento. Se utilizan de acuerdo a los protocolos establecidos en cada metodología determinada.

El presente trabajo se maneja dentro de dos técnicas de investigación, documental y de campo.

Es una investigación documental puesto que se realiza apoyándose en fuentes de tipo documental, esto es, en documentos de cualquier especie, basados en principios científicos o de investigación objetiva. Como subtipos de esta investigación están la investigación bibliográfica, donde obtenemos la información reuniéndola de libros; la hemerográfica a partir de artículos y ensayos; y la archivística obtenida, como su nombre lo indica, de archivos, como cartas, oficios, circulares y expedientes.

Es también una investigación de campo, puesto que queremos obtener datos de la realidad y estudiarlos tal y como se presentan, sin manipular las variables. Por esta razón, su característica esencial es que se lleva a cabo fuera del laboratorio, en el lugar de ocurrencia del fenómeno.

1.10. Procesamiento de la información

Análisis con la estadística descriptiva:

1.10.1. La estadística descriptiva

Es el estudio de los métodos para reunir, clasificar, presentar y describir a un conjunto de datos. Se asume que es descriptivo el estudio de un conjunto de datos, cuando simplemente se describen o analizan a los datos.

- **La media aritmética**

En la práctica la medida de posición de mayor uso y más conocida es la Media Aritmética, a la Media Aritmética se la conoce directamente como Media o Promedio, la Media Aritmética es una medida de tendencia central.

$$\bar{X} = M_{(x)} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n} = \frac{\sum X}{n}$$

De un conjunto de datos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ de tamaño n , de una variable o característica X , se denota \bar{X} a su Media aritmética y se define como la suma de todos los valores observados en la Muestra, dividida entre el número total de datos n .

- **La Mediana**

Es otra de las medidas de posición de amplio uso y de fácil comprensión.

La mediana que se denota por $M(X)$ o por \bar{A} se define como el valor central de un conjunto de datos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ de tamaño n , de una variable o característica X , donde los datos están ordenados correlativamente.

Cuando se tiene de un número impar de datos la Mediana será el valor del dato central

$(n+1)/2$; Para un número par de datos se calcula la Media de los datos centrales: $X_{n/2}, X_{n/2+1}$.

- **La Moda**

Otra medida de posición de amplio uso es la Moda, que sin imaginarlo se usa frecuentemente.

En un conjunto de datos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ de tamaño n , de una variable o característica X , la Moda se define como el valor que ocurre con mayor frecuencia, se denota por $Mo(X)$. En algunos conjuntos de datos, la Moda puede no existir, o no ser única en otros casos.

- **El Rango**

El rango es un valor numérico que indica la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de una población o muestra estadística.

Para calcular el rango de una muestra o población estadística utilizaremos la siguiente fórmula:

$$R = X_{max} - X_{min}$$

Donde:

R = es el rango.

X_{máx} = es el valor máximo de la muestra o población.

X_{mín} = es el valor mínimo de la muestra o población estadística.

X = es la variable sobre la que se pretende calcular esta medida.

- **La Varianza**

Es la principal medida de dispersión, es la más precisa y de mayor uso, en especial su uso es más amplio en la Estadística inferencial.

Dependiendo de si los datos corresponden a una población o a una muestra, se obtendrán la Varianza poblacional o la Varianza muestral, cuyas definiciones son ligeramente diferentes.

La Varianza de una población o Varianza poblacional se designa por σ^2 (Sigma cuadrado), la Varianza de una muestra o Varianza muestral se designa por s^2

Para una ordenación de datos: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ La Varianza se calcula como:

Varianza Poblacional
$$\sigma^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N} = \frac{\sum (X - \mu)^2}{N} = \overline{(X - \mu)^2}$$

Varianza Muestral
$$s^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{n \sum X^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}$$

Donde la Media Aritmética de una población y de una Muestra respectivamente son μ, \bar{X} (Su modo de cálculo es el mismo), se toma en cuenta que el total de datos se representa por N, n para una población o muestra respectivamente.

- **Desviación Estándar**

Con base en la Varianza, otra medida de dispersión es la Desviación Estándar, o Desviación Típica. Según se trabaje con una población o con una muestra, se obtendrán la Desviación Estándar poblacional o la Desviación Estándar muestral, cuyas definiciones son ligeramente diferentes.

La Desviación Estándar de una población se designa por σ (Sigma). La Desviación Estándar de una muestra se designa por s . Son las raíces cuadradas de las Varianzas de una población o muestra respectivamente, por tanto:

Para una ordenación de datos: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ La Desviación Estándar se calcula por:

Desviación Estándar Poblacional
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N}} = \sqrt{(X - \mu)^2}; N = \sum_{j=1}^k f_j$$

Desviación Estándar Muestral
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{(X - \bar{X})^2}; n = \sum_{j=1}^k f_j$$

Donde μ, \bar{X} son la Media Aritmética de una población o de una muestra (Poseen el mismo valor).

- **Coefficiente de Variación**

Se llama también Coeficiente de dispersión, es una medida de dispersión relativa, permite efectuar comparaciones entre diversos conjuntos de datos que no necesariamente poseen la misma frecuencia total (Número total de datos).

Para un conjunto de datos, se llama Coeficiente de Variación al cociente de la Desviación Estándar muestral entre su Media Aritmética:

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} * 10$$

Este coeficiente se expresa en porcentaje al multiplicarse por 100. Se considera que un Coeficiente de Variación menor a 50% significa baja dispersión, es decir que la Media Aritmética es una buena representación de un conjunto de datos. Si es mayor al 50% significa alta dispersión, la Media Aritmética en tal caso no es una buena representación.

- **Asimetría**

La asimetría es la medida que indica la simetría de la distribución de una variable respecto a la media aritmética, sin necesidad de hacer la representación gráfica. Los coeficientes de asimetría indican si hay el mismo número de elementos a izquierda y derecha de la media.

Existen tres tipos de curva de distribución según su asimetría:

- **Asimetría negativa:** la cola de la distribución se alarga para valores inferiores a la media.
- **Simétrica:** hay el mismo número de elementos a izquierda y derecha de la media. En este caso, coinciden la media, la mediana y la moda. La distribución se adapta a la forma de la campana de Gauss, o distribución normal.
- **Asimetría positiva:** la cola de la distribución se alarga (a la derecha) para valores superiores a la media.
 - **Curtosis**

La curtosis (o apuntamiento) es una medida de forma que mide cuán escarpada o achatada está una curva o distribución.

Este coeficiente indica la cantidad de datos que hay cercanos a la media, de manera que a mayor grado de curtosis, más escarpada (o apuntada) será la forma de la curva.

Pruebas estadísticas

- **El rango intercuartíl**

El rango intercuartílico es una medida de dispersión de un conjunto de datos que expresa la diferencia o la distancia entre el primer y el tercer cuartil. En otras palabras, el rango intercuartílico es la diferencia entre el penúltimo y el primer cuartil de una distribución utilizado en el diagrama de caja. Generalmente utilizado en el diagrama de caja que utiliza la mediana como medida central.

El rango intercuartil está considerado un estadístico robusto por su baja exposición a valores extremos. Esto es debido a que solo se consideran las observaciones entre el tercer cuartil y el primer cuartil. Todas las observaciones fuera de ese rango quedan excluidas del cálculo y, por tanto, solo se tienen en cuenta las observaciones más cercanas a la mediana, es decir, al segundo cuartil.

La presencia de varios valores extremos entre el primer y el tercer cuartil hará aumentar mucho el rango intercuartílico y también la mediana, pero a una tasa menor. Esta

situación es poco probable dado que los datos muy extremos tienden a ser poco comunes.

1.10.2. Pruebas estadísticas

- **Kolmogórov-Smirnov**

La prueba de Kolmogórov-Smirnov para una muestra es un procedimiento de "bondad de ajuste", que permite medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica. Su objetivo es señalar si los datos provienen de una población que tiene la distribución teórica especificada, es decir, contrasta si las observaciones podrían razonablemente proceder de la distribución especificada.

- **Shapiro-Wilks**

El test de Shapiro-Wilks plantea la hipótesis nula que una muestra proviene de una distribución normal. Elegimos un nivel de significancia, por ejemplo 0,05, y tenemos una hipótesis alternativa que sostiene que la distribución no es normal.

1.10.3. Tratamiento estadístico

En el presente trabajo de aplicación se manejará el método estadístico no probabilístico, sacando valores promedios (Media Aritmética) de las mediciones a realizarse en campo. Cabe mencionar que solo se sacara el valor promedio de las mediciones de ahuellamiento (ahuellamiento promedio), debido a que se mide de manera directa el ahuellamiento del pavimento, no aplicando así otros parámetros de la estadística como la desviación estándar, moda, etc.

Esta media, se interpreta como el valor típico y central de los datos. Si es suficiente representar con un solo número, la media resulta la mejor descripción de los valores observados.

Para analizar la fiabilidad o grado de confiabilidad de los modelos utilizados en el presente estudio se utiliza el coeficiente de determinación que denotamos por R^2 , que

es un indicador de fiabilidad que mide la bondad del ajuste del modelo (Novales,2010). Este cálculo se realizó con el programa estadístico SPSS.

1.11. Alcance del estudio de aplicación

El trabajo a realizar corresponde a un tipo de investigación aplicada, a un nivel de investigación descriptiva.

El alcance de la presente tesis es proponer la aplicación de modelos de predicción de ahuellamiento de distintos tramos de pavimento flexible de la ciudad de Tarija, empleando tres modelos predictivos de Colombia, Argentina y Perú.

Primero se realiza la medición del ahuellamiento de la superficie pavimentadas de los tramos seleccionados del presente proyecto, nos basaremos en los manuales técnicos para el diseño de carreteras de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras). El método que se usara es mediante el empleo de una regla patrón y una regla graduada, las que permiten medir directamente la profundidad de ahuellamiento en la superficie de rodadura de un pavimento.

Este estudio se realizará en los siguientes tramos urbanos y rurales:

Tramos urbanos:

- Calle Sevilla
- Calle Ramon Rojas
- Calle María Claret

Tramos rurales:

- Tramo Guerrahuayco - San Andrés
- Tramo Monte Centro - cruce San Pedro de Buena Vista

La importancia de este estudio reside en encontrar el nivel de severidad del ahuellamiento que existente en los tramos de estudio, para así implementar un plan de mantenimiento o acciones a seguir en función a la escala del valor de deterioro, de esta manera seleccionar el método de reparación o reconstrucción más adecuado para asegurar una reparación duradera.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES SOBRE AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS

2.1. Pavimento

Un pavimento, se define como una estructura vial, formada por una o varias capas de materiales seleccionados, el cual se construye sobre la sub-rasante, y que se debe caracterizar por:

- Resistir las cargas impuestas por el Tránsito vehicular.
- Soportar la acción del medio ambiente.
- Transmitir al suelo de fundación, esfuerzos y deformaciones tolerables.
- Proporcionar la circulación de los vehículos con rapidez, comodidad, economía y seguridad; lo cual conlleva a que sea una estructura durable y, además, que presente una textura adecuada para el tráfico.¹

2.2. Tipos de pavimento

En nuestro medio los pavimentos más conocidos se pueden clasificar en 2 tipos que varían sobre todo según su estructura:

- Pavimentos rígidos
- Pavimentos flexibles

De estos 2 tipos de pavimentos vamos a conocer un poco más del pavimento flexible ya que este tipo de pavimento será el que vamos a estudiar en el presente trabajo.

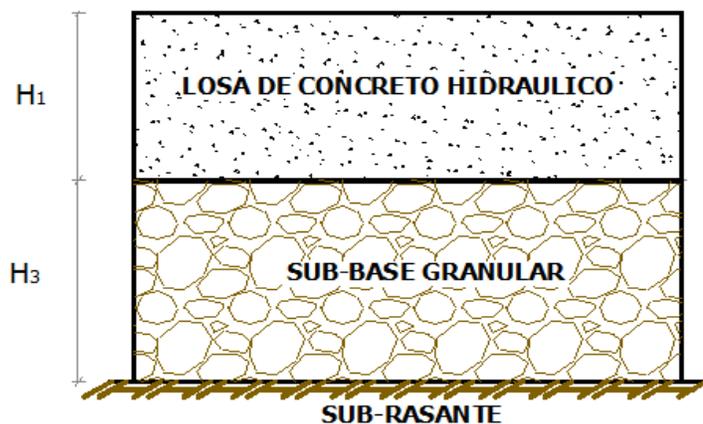
2.2.1. Pavimento rígido

Constituido por una losa de concreto hidráulico de gran rigidez, la cual está apoyada sobre una capa de material seleccionado (Sub-base granular) o sobre la sub-rasante, en el

¹(MAESTRÍA DE INGENIERÍA VIAL VERSIÓN II: Ing. CARLOS ALBERTO BENAVIDES BASTIDAS)

caso de que sea granular; la transmisión de esfuerzos al terreno de soporte, se produce mediante un mecanismo de distribución de tensiones.

Figura N° 1 Sección donde se pueden apreciar las capas del pavimento rígido



Fuente: Ing. Carlos Alberto Benavides Bastidas 2006

2.2.2. Pavimento flexible

Caracterizado por tener en la parte superior, una capa bituminosa, apoyada sobre una o varias capas de gran flexibilidad (Base granular y Sub-base granular), las cuales transmiten los esfuerzos al terreno de soporte, mediante un mecanismo de disipación de tensiones, presiones que van disminuyendo en su magnitud, con la profundidad. Este tipo de pavimento, presenta las siguientes particularidades:

- Las capas granulares, se colocan para disminuir el espesor de la carpeta asfáltica.
- Se considera que los esfuerzos se han disipado, cuando el esfuerzo en un punto cualquiera, es menor que el 10 % de la presión de contacto.
- Las magnitudes normales de los Módulos de las capas de esta clase de estructuras, están alrededor de:

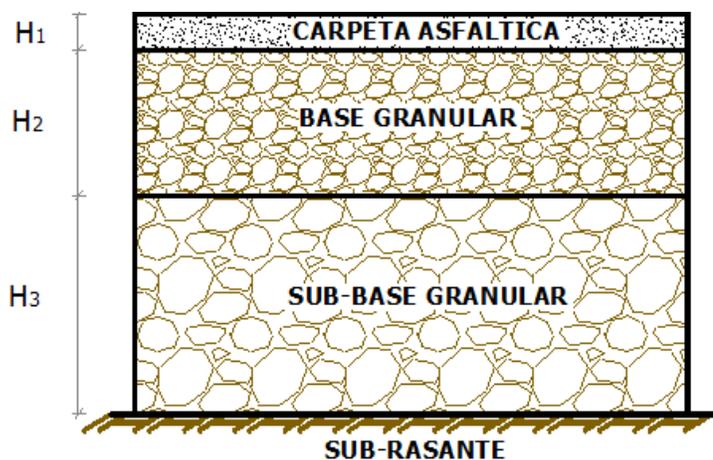
-Carpeta Asfáltica => 25000 Kg/cm²

-Base Granular => 2000 Kg/cm² a 5000 Kg/cm²

-Sub-base granular => 1000 Kg/cm² a 3000 Kg/cm²

- En pavimentos flexibles, apoyados sobre Sub-rasante fina, por ningún motivo, se debe omitir la Sub-base Granular.²

Figura N° 2 Sección donde se pueden apreciar las capas del pavimento flexible



fuelle: Ing. Carlos Alberto Benavides Bastidas 2006

Generalmente un pavimento flexible como se muestra en la figura está formado por cuatro capas que se describen a continuación:

Sub rasante: Es la capa más profunda de toda la estructura que conforman al pavimento. Estos suelos pertenecientes a la sub rasante serán adecuados y estables con CBR igual o mayor a 6%. En el caso que sea menor (sub rasante pobre o inadecuada), corresponde estabilizar los suelos, para lo cual se tendrá que analizar alternativas de solución, como la estabilización mecánica, el reemplazo de suelo, estabilización química de suelo, estabilización con geo-sintéticos, entre otros, eligiendo la alternativa más conveniente en cuanto a lo técnico y económico. Se apoya sobre el terreno natural de fundación.

Sub-base: Es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la carpeta. Además, se utiliza como capa de drenaje y controlador de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del

² (MAESTRÍA DE INGENIERÍA VIAL VERSIÓN II: Ing. CARLOS ALBERTO BENAVIDES BASTIDAS)

pavimento, esta capa puede obviarse. Esta capa puede ser de material granular ($\text{CBR} \geq 40\%$) o tratada con asfalto, cal o cemento.

Base granular: Es la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función de sostener, distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito. Esta capa será de material granular ($\text{CBR} \geq 80\%$) o tratada con asfalto, cal o cemento. A su vez esta capa debe ser de mejor calidad y granulometría que la sub-base.

Carpeta asfáltica: Es la capa superior del pavimento flexible y es colocada sobre la base granular con la finalidad de sostener directamente el tránsito. Asimismo, es la capa de mejor calidad debido a que debe ofrecer características como fricción, suavidad, control de ruido y drenaje.

2.2.2.1. Funciones de las capas del pavimento flexible

Sub-base granular:

- Economía con respecto a la base y al concreto asfáltico.
- Transición entre materiales de distinta calidad.
- Control de deformaciones, absorbiendo los cambios volumétricos de la sub-rasante.
- Debido a su distribución granulométrica, sirve para romper la capilaridad ayudando a mantener un buen drenaje en la estructura.
- Presenta muy poco aporte estructural, debido a las características de forma, textura y gradación de sus partículas.

Base granular:

- Es de gran aporte estructural, debido a las características de gradación y trituración de sus partículas (finos no plásticos).
- Economía con respecto a la carpeta asfáltica.
- Buen drenaje, debido a que presenta pocos finos.
- Sirve como rodadura provisional.

Riego de imprimación:

- Adherir la base granular a la carpeta asfáltica.

- Impermeabilizar la interfase entre la carpeta asfáltica y la base granular.

Carpeta asfáltica:

- Da la resistencia a la tracción en la estructura.
- Al ser “impermeable”, evita que el agua ingrese a la estructura del pavimento, junto con el bombeo y el peralte de la calzada.
- Proporciona una superficie uniforme, estable y segura al tránsito (concepción del usuario).

2.3. Fallas en pavimentos asfálticos

Durante la vida de servicio de un pavimento, causas de diverso origen afectan la condición de la superficie de rodamiento, lo cual compromete su función de ofrecer a los usuarios la posibilidad de un rodaje seguro, cómodo y económico.

Las fallas son el resultado de interacciones complejas de diseño, materiales, construcción, tránsito vehicular y medio ambiente. Estos factores combinados, son la causa del deterioro progresivo del pavimento, situación que se agrava, al no darle un mantenimiento adecuado a la vía.

Existen dos tipos de fallas: estructurales y funcionales. Las primeras, son las que originan un deterioro en el paquete estructural del pavimento, disminuyendo la cohesión de las capas y afectando su comportamiento frente a cargas externas. Las fallas funcionales, en cambio, afectan la transitabilidad, es decir, la calidad aceptable de la superficie de rodadura, la estética de la pista y la seguridad que brinda al usuario.

Para pavimentos flexibles los daños pueden ser agrupados en 4 categorías:

- 1) Fisuras y grietas
- 2) Deformaciones superficiales
- 3) Desintegración de pavimentos o desprendimientos
- 4) Afloramientos y otras fallas

Figura N° 3 Fallas en pavimentos flexibles



Fuente: Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

2.4. Ahuellamiento

El ahuellamiento está dentro del grupo de las deformaciones superficiales de las fallas de los pavimentos flexibles.

El ahuellamiento es un tipo de defecto o falla que se produce en pavimentos asfálticos, cual consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos. Se produce en pavimentos asfálticos sometidos a una combinación de elevados niveles de tránsito, tráfico pesado y/o lento y altas temperaturas de servicio.³

En el caso de las mezclas asfálticas, se ha demostrado que los principales factores que determinan la formación de huellas son la magnitud y frecuencia de la aplicación de carga y las condiciones climatológicas (por ejemplo, la temperatura). Adicionalmente, se ha comprobado que las características reológicas del ligante asfáltico de la mezcla y la

³ (ANÁLISIS DE CASOS DE AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS CHILENAS. SANTIAGO, CHILE. 2002)

granulometría también influyen significativamente en el comportamiento plástico de estos materiales.

En una estructura de pavimento, la magnitud y la frecuencia de aplicación de la carga están directamente relacionadas con su nivel de servicio, con su ocupación vehicular, con la velocidad promedio de los vehículos. La variación de la temperatura altera las características y el comportamiento mecánico del material, disminuyendo la capacidad estructural del pavimento.

Así mismo, la reología del asfalto es determinante en el comportamiento mecánico del material; se ha demostrado que a altas temperaturas o bajo cargas lentas el asfalto se comporta como un líquido viscoso; a bajas temperaturas o bajo cargas rápidas el asfalto se comporta como un sólido elástico; y a temperaturas intermedias, el asfalto se comporta como un material viscoelástico.

Dentro de los parámetros estudiados las repeticiones, es decir las frecuencias del tránsito, son las que tiene mayor injerencia en el ahuellamiento de la capa asfáltica, por lo anterior se resalta que, para frecuencias bajas, se presenta una mayor deformación permanente debido a que la carga pasa mayor tiempo en contacto con la capa de asfalto.

Cuando la mezcla asfáltica está sometida a temperaturas superiores a 35 °C el ahuellamiento aumenta 10 veces por cada 10°C hasta una temperatura de 50 °C. Una vez se alcanza esta temperatura la variación de la función de flujo es diferente, debido a que se sobrepasa la temperatura de ablandamiento del asfalto.

Los estudios de ahuellamiento deben tenerse en cuenta en el diseño de las mezclas asfálticas, siempre que las condiciones de carga y climáticas a las que puede verse sometido un pavimento sean desfavorables. Se desarrolla gradualmente y aparece como una depresión continua en las bandas de circulación de los neumáticos, dificultando la maniobrabilidad de los vehículos y ocasionando una disminución en la seguridad.⁴

⁴ (ESTUDIO DE AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS: PÁEZ DIEGO; PEREIRA HENRY)

Figura N° 4 Ahuellamiento



Fuente: Silvia Caro Spinel (Adocreto, 2001)

2.5. Análisis del fenómeno de ahuellamiento

2.5.1. Definición de deformaciones Plásticas

La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo, esta deformación se puede ser:

- Deformación plástica o irreversible: es la deformación de un material producida al someter dicho material a cargas y sobrepasar el límite elástico, lo cual es causante de un cambio permanente en el material.
- Deformación elástica o reversible: es la deformación de un cuerpo el cual recupera su forma original al retirar las cargas que provocan la deformación.

Las deformaciones plásticas en los pavimentos son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de vehículos, estas depresiones o canales

representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento y es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas.

La deformación plástica se caracteriza por una sección transversal del pavimento que no se encuentra en la posición original de diseño y representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irre recuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga.

2.5.2. Tipos de formación del ahuellamiento

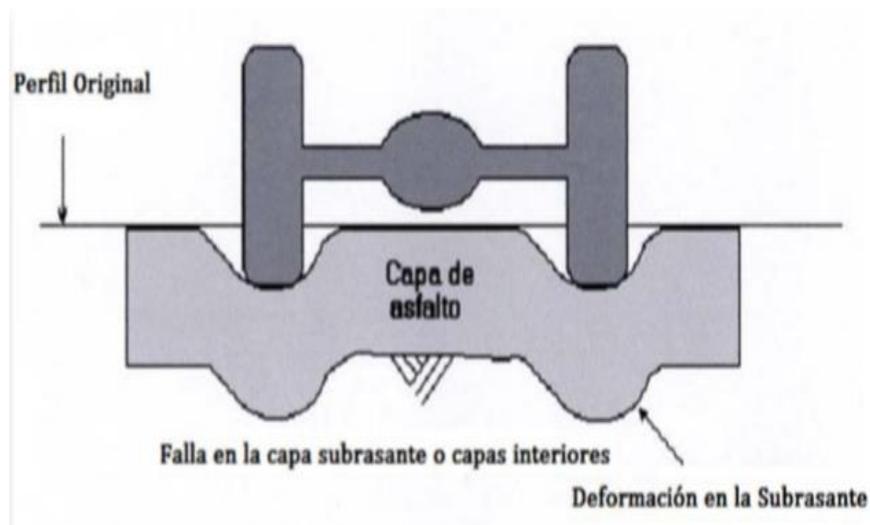
El ahuellamiento se puede clasificar de acuerdo al origen de las deformaciones producidas. Existen dos principales tipos de ahuellamiento: ahuellamiento por fallas en capas inferiores y ahuellamiento por fallas en la carpeta asfáltica, ésta última, de gran interés, debido a que representa el tema principal de este trabajo. Las deformaciones permanentes o ahuellamientos, se pueden apreciar visiblemente como depresiones o canales a lo largo de la trayectoria por donde ruedan los vehículos en el pavimento. La densificación de material es un fenómeno secundario dentro de la formación de ahuellamientos, potencialmente contribuye en menos de 5 mm, en la profundidad de la rodera. Otras causas que influyen en la producción de hundimientos en los pavimentos asfálticos son los espesores delgados de pavimento, pérdida de material en la superficie por donde ruedan los vehículos y deformaciones plásticas en la capa de asfalto.

2.5.2.1. Ahuellamiento por falla en capas inferiores

El ahuellamiento por falla en capas inferiores es causado por un esfuerzo repetido en las capas inferiores denominadas base y sub-base, bajo la capa de asfalto, este tipo de ahuellamiento se puede reducir con el uso de materiales adecuados.

Este tipo de ahuellamiento es considerado un problema estructural, más que de los materiales entre sí, esencialmente, no hay suficiente resistencia en el pavimento para transmitir la fuerza aplicada, reduciéndola a un nivel tolerable; también puede ser causado por un debilitamiento de una de las capas generadas por la intrusión de humedad.

Figura N° 5 Ahuellamiento por falla en la subrasante



Fuente: Juan Pablo Nieto (mayo 2010)

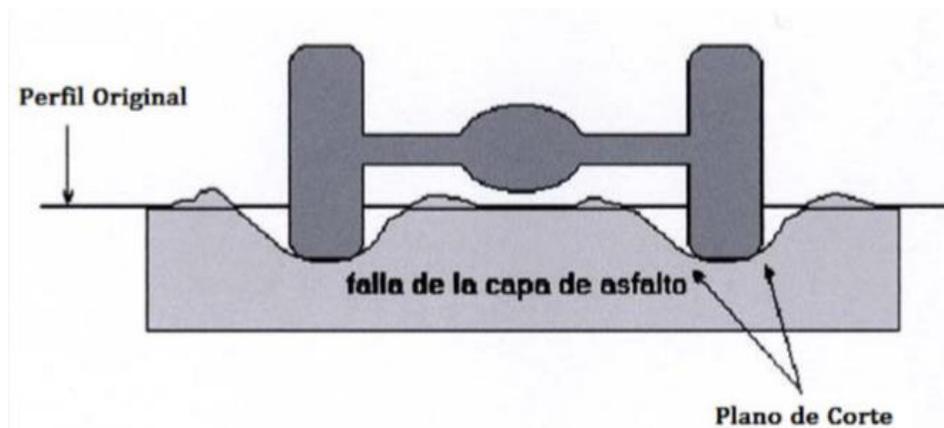
Las cargas de tráfico provocan hundimientos y debilitamiento en la estructura inferior del pavimento; si la capa de pavimento es suficientemente flexible, se deformará por tener espesores delgados; si la estructura del pavimento es muy rígida, ocurrirán fisuras de un lado a otro, en el ancho y a lo largo de la trayectoria del neumático. Algunas veces el ahuellamiento tiende a presentar pendientes pronunciadas con bordes quebrados en ambos lados de la trayectoria de la rueda.

2.5.2.2. Ahuellamiento por falla en la carpeta asfáltica

Ahuellamiento por falla en la carpeta asfáltica es el tipo de ahuellamiento que más preocupa a los diseñadores de mezclas asfálticas, se produce debido a que la carpeta asfáltica no está diseñada para las condiciones a las que es sometida como cargas pesadas, clima, entre otros.

Una mezcla asfáltica débil, va acumulando una pequeña pero permanente deformación plástica, en cada pulso de carga pesada, y eventualmente forma una ruta caracterizada con una inclinación y deslizamiento lateral de la mezcla, el ahuellamiento puede ocurrir en la capa superficial de asfalto o debido a debilitamiento en las capas inferiores de asfalto.

Figura N° 6 Ahuellamiento por fallas en la mezcla asfáltica



Fuente: Juan Pablo Nieto (mayo 2010)

El ahuellamiento en una mezcla débil ocurre típicamente durante el verano, cuando el pavimento se encuentra sometido a altas temperaturas de trabajo, pero este fenómeno no es causado solo por el cambio de temperatura que sufre el pavimento, sino que influye la resistencia de los agregados y el tipo de ligante asfáltico empleado. Los ahuellamientos como se ha dicho antes son la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes y una manera de incrementar la fuerza contra el deslizamiento es no solamente utilizar asfaltos más duros, sino otro que se comporte más como un sólido elástico a altas temperaturas. Así cuando se aplique la carga el material podrá deformarse y volver a su posición original. Otra manera de prevenir los desplazamientos es seleccionar agregados que tengan un alto grado de fricción interna, que sea cúbico, que tenga una superficie rugosa y pueda desarrollar un grado de contacto partícula a partícula. Cuando se le aplica una carga a una mezcla asfáltica, las partículas de los agregados se cierran unidas de tal manera que funcionan como una sola, larga y elástica piedra, y como el asfalto actuará como una banda de goma, volverá a su forma original cuando desaparezca la carga, de esta forma no se acumula una deformación permanente.

2.6. Factores que influyen en la formación de ahuellamiento en carpeta asfáltica

En condiciones normales de operación, las deformaciones producidas por el tránsito son reducidas; ninguna deformación es despreciable, por más pequeñas que sean siempre se van acumulando y al final se traduce en deformaciones observables. Sin embargo,

existen factores que tienden a aumentar la magnitud de deformación de la mezcla asfáltica y eventualmente producen ahuellamiento. Estos factores, que normalmente actúan en conjunto, están relacionados al clima, al tráfico y la susceptibilidad térmica del asfalto, entre otros.

2.6.1. Temperatura medio ambiental

Dentro de las condiciones ambientales que se deben tomar en cuenta están las características climáticas y las condiciones de drenaje.

Con respecto a las características climáticas se debe conocer el régimen de lluvias y las precipitaciones medias anuales, a fin de poder definir la existencia o no de períodos seco y húmedo. Así como también la amplitud térmica diaria, y las máximas medias y mínimas medias anuales correspondientes a cada período.

El ahuellamiento generalmente se produce en verano, dado que las temperaturas altas aumentan el componente plástico de deformación de la mezcla asfáltica, por lo tanto, aumentan las deformaciones remanentes. En ocasiones el ahuellamiento se puede producir en forma parcial en dos o tres estaciones de verano consecutivos (definir claramente los intervalos de tiempo que se consideran para dicha estación).

Es conocido el hecho de que la temperatura medioambiental elevada, reblandece el asfalto de las mezclas en los pavimentos, ocasionando una enorme susceptibilidad a sufrir deformaciones plásticas, debido a que la mezcla presenta un comportamiento muy viscoso, que la hace fluir y desplazarse con mucha facilidad.

La temperatura medioambiental, por lo tanto, es un factor que influye de una manera muy importante en las deformaciones plásticas de los pavimentos, porque permite que una mezcla asfáltica se comporte de manera viscosa o elástica.

Monismith. (1994) observaron que un incremento en la temperatura de prueba de las mezclas asfálticas, genera un decremento en la resistencia a la generación de ahuellamiento.

Por lo anterior es necesario saber el impacto que provoca la temperatura a los asfaltos, y esto se hace por medio de la susceptibilidad térmica la cual varía entre asfaltos aun si los

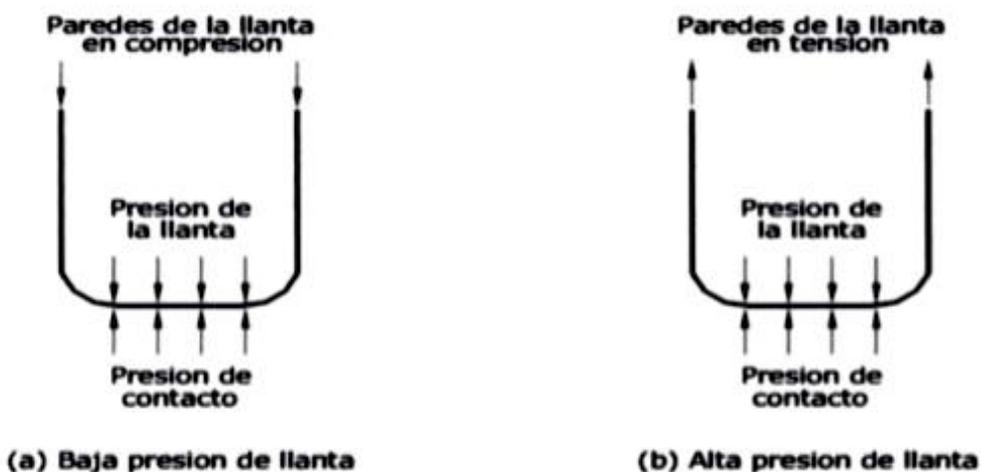
asfaltos tienen la misma consistencia y es importante a la hora de seleccionar un asfalto para conformar la mezcla.

2.6.2. Cargas pesadas

Las cargas pesadas aumentan la magnitud de las deformaciones y por lo tanto aumentan la velocidad de deformación de la mezcla.

Las cargas de los vehículos al pavimento se transmiten a través de las ruedas, en los métodos de diseño mecanicistas es necesario conocer el área de contacto de la llanta con el pavimento, asumiendo que la presión de contacto depende de la presión de inflado del neumático, la presión de contacto es más grande que la presión de la llanta, para presiones bajas de la llanta, debido a que la pared de la misma está en compresión y la suma de las fuerzas verticales de la pared y presión de la llanta, deben ser iguales a la fuerza debido a la presión de contacto; la presión de contacto es más pequeña que la presión de la llanta, para presiones altas de las llantas, debido a que la pared de la llanta está en tensión. Sin embargo, en el diseño de pavimentos, la presión de contacto generalmente se asume igual a la presión de la llanta, debido a que los ejes de carga pesados tienen presiones altas y efectos más destructivos en el pavimento.

Figura N° 7 Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta



Fuente: Juan Pablo Nieto (mayo 2010)

2.6.3. Circulación a bajas velocidades

El tráfico lento disminuye la rigidez del asfalto, por lo que aumenta la componente plástica de deformaciones, es decir, se produce un efecto equivalente a un aumento de la temperatura de servicio. Por otro lado, la circulación a bajas velocidades incrementa el tiempo de aplicación de la carga, haciendo con que el pavimento asfáltico trabaje bajo condiciones de operación extremas.

Por otra parte, una mezcla asfáltica puede ser más o menos resistente a las deformaciones, en función de una serie de factores de diseño, como tipo de asfalto, propiedades del agregado y parámetros de dosificación. A continuación, también se explican brevemente cada uno de estos factores.

Otro aspecto que tenemos que considerar acerca del vehículo es la velocidad, si se utiliza la teoría viscoelástica para el diseño del pavimento, la velocidad está directamente relacionada con la duración de la carga; si se utiliza la teoría elástica, debe seleccionarse adecuadamente el módulo de resiliencia de los materiales para el pavimento, en proporción con la velocidad del vehículo. (Huang, 1993).

Un aumento en el número de repeticiones de carga establece una disminución en la resistencia de los pavimentos a la generación de deformaciones plásticas; es decir, que cuando se incrementa el número de repeticiones de carga, el pavimento es más susceptible a sufrir este tipo de deterioro.

2.6.4. Efecto del tipo de asfalto

La selección del ligante asfáltico debe hacerse principalmente en base al clima, sin embargo, también influyen factores de proyecto, como el nivel de tránsito y las velocidades de circulación. Es por ello que en la actualidad se considera que las especificaciones de los cementos asfálticos por penetración no son suficientes para garantizar un buen desempeño del asfalto.

2.6.5. Forma y textura de los agregados

Tanto la forma como la textura son propiedades que tienen que ver con el origen del agregado. Las partículas rodadas obtenidas de depósitos fluviales normalmente tienen una textura lisa y una forma redondeada, por lo que no son adecuadas para producir mezclas asfálticas, puesto que no proveen suficiente fricción interna para resistir las cargas. Las partículas que se obtienen en plantas de chancado tienen forma angulosa y textura rugosa, producto de la trituración mecánica. Estas partículas proveen grandes fricciones internas que las hacen adecuadas para producir mezclas asfálticas resistentes al ahuellamiento.

2.6.6. Aumento de susceptibilidad debido al agua

El agua es uno de los problemas fundamentales de las obras civiles y las carreteras asfálticas no son la excepción es por ello que las aguas superficiales de toda las carreteras debe de ser rápidamente evacuada y en lo relativo al drenaje subterráneo se deben tomar las precauciones necesarias para contemplar lo de las infiltraciones que pudieran registrarse, se mantengan lo suficientemente alejadas del pavimento, esto se puede lograr proyectando un sistema de drenaje adecuado tanto superficial (longitudinal y transversal) y subterráneo para obtener un buen comportamiento de servicio del camino.

Pero siempre hay una interacción entre el agua y el camino: El agua puede ocasionar un aumento de la susceptibilidad de una mezcla asfáltica a las deformaciones plásticas permanentes. Los efectos del agua pueden ser considerados en la fase inicial de diseño de las mezclas o como una parte del proceso de evaluación de las mezclas. Cuando existe una modificación de la estructura de pavimento de estado seco a húmedo, se presenta una disminución de la resistencia de la mezcla.

Un estudio realizado en la Universidad del Estado de Oregón en E.U.A demuestra que la propensión al ahuellamiento de las mezclas asfálticas se incrementa significativamente si está sujeta a saturación sostenida de agua. Los resultados fueron obtenidos a partir de ensayos de cortante simple en mezclas antes y después de someterlas a la acción del agua.

El polvo mineral juega un papel muy importante en la mezcla para conseguir una resistencia al ahuellamiento es por ello que su interacción y afinidad con el agua determina el comportamiento reológico, impermeabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica.

La finura de polvo mineral y su afinidad con el agua son dos factores que están relacionados en muchos casos, pero también pueden ser bastante independientes.

Cuando el polvo mineral tiene afinidad por el agua puede producirse una degradación, en el tiempo, de la estructura íntima de la mezcla que se pondría de manifiesto por una menor estabilidad, con riesgo de deformaciones inesperadas; y por una clara caída de la resistencia conservada en ensayo de inmersión – compresión. Con este ensayo puede detectarse con aceptable precisión el riesgo de degradación de la mezcla por la acción del agua sobre sus componentes minerales más finos. El riesgo de sensibilidad al agua del mortero de la mezcla.

2.7. Causas que generan el ahuellamiento

Las repeticiones de las cargas del tránsito originan Ahuellamiento como consecuencia de alguno de los factores siguientes:

- Insuficiente estabilidad de las mezclas asfálticas por inadecuada compactación o deficiente dosificación.
- Insuficiente estabilidad de las capas del pavimento o de la subrasante (falla por corte, compresión o desplazamiento lateral material) ya sea por ingreso de agua o deficiente calidad.
- Espesores de pavimento insuficientes (infra diseño estructural) para las repeticiones de carga soportadas.
- Exagerado incremento en las cargas del tránsito.

Este fenómeno del ahuellamiento se puede generar por fallas estructurales o funcionales en el pavimento y ocurre en cualquier capa de la estructura; sin embargo, investigadores como Sousa en (1994) y Chen en (2003), han demostrado y reportado que la mayor parte

del ahuellamiento se genera en la capa asfáltica. De acuerdo con Sousa en (1991), Collop en (1995), White en (2002), Archilla y Madanat en (2006), el fenómeno de ahuellamiento en mezclas asfálticas ocurre por densificación principalmente durante la construcción y por la formación de deformaciones de corte durante la vida útil del pavimento. Hofstra y Klomp (1972) encontraron que la deformación a través de las capas de concreto asfáltico es mayor cerca de la superficie donde se aplican las cargas y gradualmente decrece en las capas de niveles inferiores.

Cuando el ahuellamiento es causado por deformaciones en la mezcla asfáltica, el material asfáltico es desplazado lateralmente a lo largo de la trayectoria de los vehículos en el plano de la mezcla, y el ahuellamiento se forma progresivamente por depresión en el área de carga por donde rueda el neumático o los neumáticos, dejando crestas de mezcla en ambos lados a lo largo de la trayectoria de los vehículos. La superficie dentro de la trayectoria del neumático usualmente está lisa y rica en asfalto.

El ahuellamiento formado tiende a cambiar gradualmente a lo largo de la carretera, pero aun así el pavimento continúa proporcionando el servicio de rodadura a pesar de presentar dicho fenómeno.

La aparición de ahuellamiento, como ya se mencionó, es causado por la insuficiente resistencia ante las cargas generadas en la mezcla asfáltica. La deformación a través de las capas de concreto asfáltico es mayor cerca de la superficie donde se aplican las cargas y gradualmente decrece en las capas de niveles inferiores.

Las mezclas asfálticas están compuestas por partículas de agregados de naturaleza elástica, que son los que deben soportar principalmente las cargas del tráfico y un ligante de naturaleza viscoelástico, que actúa como pegamento manteniendo unido el esqueleto mineral.

El ligante asfáltico no puede resistir las cargas del tráfico, debido a su naturaleza viscosa- elástica puede fluir en función de la carga y su tiempo de aplicación, sin embargo, el ligante debe tener la suficiente cohesión para prevenir el desprendimiento de partículas y para resistir los esfuerzos de corte que se generan en los puntos de contacto entre agregados y que superan la fricción entre los mismos. Si el ligante no es capaz de

sujetar las partículas en su sitio, estas pueden moverse compactando el esqueleto a una configuración más densa

Las mezclas asfálticas pueden tener un comportamiento elástico lineal, elástico no lineal o viscoso en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. A bajas temperaturas el comportamiento es fundamentalmente elástico lineal, y al aumentar la temperatura se empieza a comportar como un material elástico no lineal, apareciendo el comportamiento viscoso a medida que la temperatura continúa aumentando.

En verano a altas temperaturas, la cohesión de la mezcla disminuye y las deformaciones originadas por el tráfico se incrementan; parte de estas deformaciones se dan en la componente viscosa de la mezcla, no siendo recuperables y apareciendo las deformaciones plásticas permanentes.

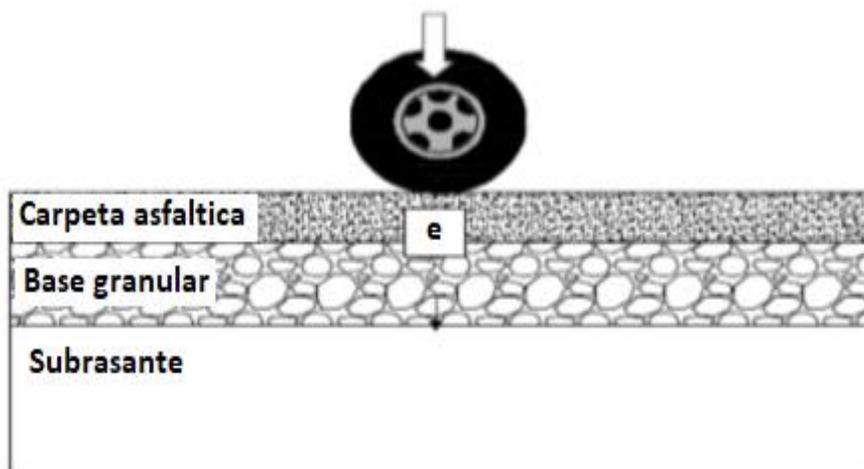
2.7.1. Relación entre la deformación permanente y la práctica del diseño de pavimentos

Los procedimientos de diseño de pavimentos flexibles actuales se basan en limitar el esfuerzo vertical en la parte superior de la subrasante y los esfuerzos de tensión en el fondo de la carpeta asfáltica.

Los valores de los esfuerzos y las deformaciones son controlados incrementando el espesor y la rigidez de cada capa del pavimento, teniendo como resultado una estructura compuesta de capas que de acuerdo con la posición relativa que ocupan en la estructura, poseen un módulo de rigidez que se incrementa hacia la superficie. Esta composición de capas atenúa los esfuerzos producidos por el tránsito, controlan los esfuerzos verticales en la subrasante y mantienen dentro de límites tolerables las deflexiones del pavimento.

Una subrasante rígida posee la capacidad de distribuir mejor los esfuerzos que le son aplicados. Una capa de rodamiento rígida reduce el riesgo de que ocurran deflexiones en la subrasante, pero por otro lado incrementa los esfuerzos de tensión y los de corte, horizontales al fondo de dicha capa. Es por esto que el diseñador debe asegurarse que la resistencia al corte y a la flexión de esta capa sea lo suficientemente alta para resistir estos altos estados de esfuerzos.

Figura N° 8 Esfuerzos y deformaciones en el pavimento



Fuente: Juan Pablo Nieto (mayo 2010)

Desafortunadamente estos métodos no cuantifican completamente el fenómeno del ahuellamiento debido a la deformación de la carpeta asfáltica. Bajo altos niveles de tránsito pesado y espesores de carpeta asfáltica razonablemente altos, la evaluación de la deformación permanente por medio del estado de esfuerzos y deformaciones de la subrasante parece no tener mucho sentido, ya que la mayor parte de la deformación permanente ocurre en la carpeta asfáltica y no en la subrasante.

Se han venido desarrollando recientemente ensayos que permitan evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica, como es el caso de ruedas cargadas, pruebas triaxiales y de creep, entre otras.

2.8. Nivel de severidad del ahuellamiento

La severidad del ahuellamiento es determinada en función a la profundidad media del ahuellamiento.

A continuación, se identifican los tres niveles de severidad del ahuellamiento:

Bajo: la depresión esta entre 0 a 5 mm.

Medio: la depresión esta entre 5 mm a 10 mm.

Alto: depresión es mayor a 10 mm.

Figura N° 9 Ahuellamiento de nivel de severidad bajo



Fuente: Ing. Corros, Urbáez y Corredor, 2009

Figura N° 10 Ahuellamiento de nivel de severidad medio



Fuente: Héctor L. Delbono 2017

Figura N° 11 Ahuellamiento de nivel de severidad alto



Fuente: Silvia Caro Spinel (Asocreto, 2001)

2.9. Equipo para medir el ahuellamiento

Existen diversos equipos para determinar el ahuellamiento; dependiendo de sus características, se suelen clasificar como equipos de alto y de bajo rendimiento.

2.9.1. Equipos de alto rendimiento

El principal equipo de alto rendimientos es el perfilómetro láser.

2.9.1.1. Perfilómetro láser

El perfilómetro láser es un equipo basado en la medida de distancias por medio de láser, preparado para registrar los perfiles longitudinales y transversales de las carreteras, así como para tomar simultáneamente datos de textura. Las mediciones se realizan con el vehículo circulando totalmente integrado en el tráfico.

El equipo permite:

- Obtener distintos índices de regularidad superficial de los firmes, haciendo posible la auscultación sistemática de la red de carreteras.
- Detectar problemas relacionados con la regularidad transversal de los firmes (roderas, zonas de posible formación de charcos, etc.).
- Determinar de manera continua la profundidad de textura.

Figura N° 12 Perfilómetro láser



Fuente: CEDEX Agenda 2020

Dispone de una viga extensible de referencia, en la cual están integrados 15 láseres de medida de 32 kHz. Delante de la viga está situada la cámara de textura con un láser de 64 kHz. También dispone de un equipo autónomo de posicionamiento global (GPS).

Con la viga extendida, en la posición de funcionamiento, es capaz de medir un ancho total de 2,90 m de calzada en una sola pasada, gracias a que sus dos láseres externos están inclinados.

El perfil y la profundidad de textura se pueden obtener simultáneamente o cada uno por separado.

2.9.2. Equipos de bajo rendimiento

Los equipos de bajo rendimiento más característicos son el perfilógrafo transversal, la toma de perfiles por métodos manuales con reglas graduadas y los perfilómetros portátiles.

Los perfilógrafos tienen una rueda sensible, montada al centro del marco que puede mantener libre el movimiento vertical como se nota en la (figura N° 13). La desviación sobre el plano de referencia, establecido por el marco del perfilógrafo, se registra (automáticamente en algunos modelos) en papel según el movimiento de la rueda sensible. Se pueden encontrar en una gran variedad de formas, configuraciones y marcas.

Figura N° 13 Perfilógrafo transversal

Fuente: Piryonesi 2019

También se pueden encontrar perfiladores manuales, como el perfilador de referencia Transverse Profile Beam (Figura N° 14). Estos sistemas son generalmente similares en concepto y generalmente son capaces de recolectar múltiples puntos del perfil utilizando sensores con alta precisión y resolución. Estos dispositivos suelen estar diseñados para aplicaciones de investigación o de nivel forense y, debido a su funcionamiento lento, normalmente no se utilizan para la recopilación de datos a nivel de red.

Figura N° 14 Perfilador

Fuente: Henning 2006

2.9.3. Uso de perfiles y reglas graduadas

Un perfil metálico indeformable, de sección rectangular (ancho mínimo 20 mm y altura mínima 30 mm), de al menos 1,5 m de largo, se coloca en forma perpendicular al eje de la calzada, desde uno de los bordes hacia el centro. Luego se desliza una escuadra, regla o cuña metálica debidamente graduada al milímetro por debajo de este perfil, determinando y registrando la profundidad máxima que alcanza la depresión (ahuellamiento). El procedimiento se debe realizar en las dos huellas de cada carril.

La regla, escuadra o cuña deberá tener una longitud de aproximadamente 1.2 m.

Figura N° 15 Perfil y reglas graduadas



Fuente: Angelone julio 2004

2.10. Procedimiento de evaluación

Cualquiera fuere el método utilizado para determinar el ahuellamiento, se efectúan las medidas con la frecuencia indicada en la especificación de obra por cada huella y por carril; registrando como ahuellamiento representativo del carril el mayor valor medido para las dos huellas. Las medidas se deben informar con la precisión al milímetro.

No se debe medir el ahuellamiento en singularidades, tales como puentes, tapas de alcantarilla u otras que alteren localmente el perfil transversal del carril.

2.11. Método para medir el ahuellamiento en superficies pavimentadas

Los procedimientos normales para estimar y resumir la profundidad del ahuellamiento en las superficies de un pavimento asfáltico. Su propósito es producir estimaciones consistentes de la profundidad del ahuellamiento tanto para apoyar decisiones sobre una nueva nivelación en la rehabilitación de pavimentos como para disponer de información para la administración de pavimentos a nivel de red.

Para medir el ahuellamiento de la superficie pavimentadas del presente proyecto se basó en los manuales técnicos para el diseño de carreteras de la ABC (administradora Boliviana de Carreteras),

2.12. Método para determinar el ahuellamiento con reglas graduadas

Este método usa equipo que se opera manualmente y que tiene como propósito principal la evaluación de la profundidad del ahuellamiento. Estos equipos se caracterizan por llevar a cabo las mediciones por métodos puntuales, es decir haciendo la medición sobre la sección específica que se quiera evaluar.

El procedimiento que se usó en este proyecto para determinar el ahuellamiento es mediante el empleo de una regla patrón y una regla graduada, las que permiten medir la profundidad de ahuellamiento en la superficie de rodadura de un pavimento.

La operación de este dispositivo se basa en la obtención de la profundidad máxima en ambas huellas del pavimento con respecto a una superficie de referencia con un alto nivel de precisión, ya que es una medición directa que se logra tomando la profundidad de las depresiones encontradas en la superficie en el sentido transversal al eje del camino mediante una escala graduada o regla debidamente apoyada.

2.12.1. Equipo y materiales

El equipo estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes y es el siguiente:

- **Regla**

Ancho: Tendrá un ancho mínimo de 19 mm y no más de 75 mm.

Longitud: Con una longitud mínima de 1,50 m para evaluar una rodera por separado, o la suficiente para que abarque todo el ancho de un carril.

Figura N° 16 Regla o perfil metálico



Fuente: Elaboración propia

- **Regla graduada**

Graduada con marcas a cada 1 mm. El ancho de esta será por lo menos de 19 mm. pero no mayor a 75 mm.

Figura N° 17 Regla graduada



Fuente: Elaboración propia

- **Cinta métrica**

Cinta flexible graduada y se puede enrollar, haciendo que el transporte sea más fácil. También se puede medir líneas y superficies curvas. Las cintas se fabrican de diferentes materiales y diferentes longitudes.

Figura N° 18 Cinta métrica



Fuente: Elaboración propia

- **Pintura spray**

La pintura spray, también conocida como pintura en aerosol, es un producto muy particular que sirve para hacer trabajos de pintura rápidos y en superficies de pequeñas dimensiones.

Figura N° 19 Pintura spray



Fuente: Elaboración propia

- **Conos**

Los conos de tráfico (también llamados conos de carretera o conos de seguridad) son conos de plástico de colores brillantes usados en carreteras para avisar a los conductores de zonas en obras o accidentes.

Los conos también se usan en espacios públicos interiores para marcar zonas que se encuentran cerradas a los peatones, como baños fuera de servicio; o para destacar una situación de peligro, como un suelo resbaladizo. También pueden usarse en zonas de juego en colegios para delimitar áreas del campo.

Figura N° 20 Cono de tráfico



Fuente: Elaboración propia

2.12.2. Preparación del sitio de medición

Delimitar la zona para identificar los puntos a medir a intervalos de distancia determinados por el operador del equipo.

2.12.3. Procedimiento de la medición

La medición manual del ahuellamiento con regla es un método de medición estándar ampliamente aceptado. El estándar ASTM E1703M-10, “Método de prueba estándar para medir la profundidad del surco de superficies de pavimento usando un borde recto”, es uno entre varios estándares utilizados en todo el mundo para realizar pruebas manuales con regla.

Siguiendo la norma ASTM, se realizará las medidas del ahuellamiento en segmentos de 100 metros cada 1 kilómetro de los distintos tramos seleccionados.

- **Ubicación de los puntos de inicio**

Ubicar los puntos de inicio del tramo de estudio para así poder empezar a medir los ahuellamientos del tramo de estudio, estos identificarlos con pintura spray, para facilitar la ubicación y relacionar los datos, se registraron las coordenadas GPS precisas del principio y el final de cada sección.

Figura N° 21 Ubicación del punto de inicio



Fuente: Elaboración propia

Siguiendo el procedimiento se realiza mediciones de cada 5 metros de diferencia siguiendo la trayectoria del tramo, como se muestra en la figura N° 21.

- **División de los segmentos del tramo**

Además, los perfiles transversales se midieron con la cinta métrica cada 5 metros de diferencia, se adoptó este sistema como alternativa debido a limitaciones de que el laboratorio de la U.A.J.M.S. estaba cerrado por medidas de seguridad. El procedimiento de medición se muestra en la Figura N° 22.

Figura N° 22 División de los segmentos del tramo



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 23 Medición de segmentos



Fuente: Elaboración propia

- **Colocación de la regla**

Colocar la regla sobre la rodera, perpendicular al eje de la carretera, de tal forma que, al deslizar la regla en dos direcciones, a lo largo de su longitud, las áreas de contacto en el pavimento sean las mismas evitando colocarla sobre las discontinuidades de la superficie del pavimento, como baches o áreas con pérdida de agregado.

El intervalo longitudinal entre las colocaciones sucesivas de la regla será según la precisión requerida por el uso que se les dé a los datos.

Figura N° 24 Colocación de la regla o perfil



Fuente: Elaboración propia

- **Colocación de la regla graduada**

Colocar la regla graduada entre las dos áreas de contacto perpendiculares al plano de referencia creado por la parte inferior de la regla y perpendicular a la pendiente longitudinal del pavimento, como se ilustra en la Figura N° 25. La parte inferior de la regla graduada estará en contacto con el pavimento en el momento de la lectura, evitando colocarla en discontinuidades de la superficie del pavimento, como baches o áreas con pérdida de agregado.

Figura N° 25 Colocación de la regla graduada



Fuente: Elaboración propia

Durante el procedimiento de medición, dos personas trabajaron en conjunto para medir el ahuellamiento para cada trayectoria de la rueda, mientras que una tercera persona registró los valores de los ahuellamientos. De esta manera, las mediciones en cada trayectoria de la rueda podrían completarse dentro de un período de tiempo aceptable.

- **Medición de la profundidad del ahuellamiento**

Observar la distancia entre la superficie inferior de la regla y el pavimento. Las mediciones se determinarán considerando la marca más cercana de la regla graduada al borde de la regla. Se llevará a cabo un número suficiente de mediciones a lo largo de la regla para determinar la distancia mayor entre la regla y el pavimento, cuyo valor es la profundidad del ahuellamiento.

No medir el ahuellamiento en singularidades, tales como puentes, badenes, tapas de alcantarilla u otras, las que alteren localmente el perfil transversal de la pista.

Figura N° 26 Medición de la profundidad del ahuellamiento



Fuente: Elaboración propia

- **Cálculo de la profundidad del ahuellamiento**

Las lecturas individuales de la profundidad de rodera serán correctamente registradas en las hojas de campo, no es necesario realizar ningún cálculo, ya que se están tomando las medidas directamente sobre la superficie de la rodera del pavimento.

Figura N° 27 Formulario tipo de informe de control de ahuellamiento

DATOS DE MEDICION DE LA ALTURA DE AHUELLAMIENTO (mm)

NOMBRE DE LA VIA:
 TRAMO D:
 EVALUADOR:

PROG.	AHUELLAMIENTO (mm)		OBSERVACIONES
	HUELLA EXTERNA	HUELLA INTERNA	
0			
5			
10			
15			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			
55			
60			
65			
70			
75			
80			
85			
90			
95			
100			
105			
110			
115			
120			
125			
130			
135			
140			
145			
150			
155			
160			

Fuente: Manual de carreteras ABC.

En la figura N° 27 se muestra el formulario tipo que define la forma en que debe presentarse el informe. Para el llenarlo se debe proceder como siguiente:

- En la primera columna anote el kilometraje (progresivas) que se realizó la medición.

- En la segunda y tercera anote los ahuellamientos medidos, expresados en milímetros, correspondientes a las huellas interna y externa respectivamente.

2.13. Modelos de predicción del ahuellamiento

El desarrollo de deformaciones plásticas en pavimentos flexibles ha sido un tópico de investigación desde hace varias décadas. Actualmente se cuenta con modelos que permiten predecir este tipo de falla, siendo una práctica común considerarlos en el diseño estructural de pavimentos. Sin embargo, las variables requeridas para dicha predicción son complejas o difíciles de obtener en campo, lo que hace que su aplicación en el proceso de auscultación no sea sencilla. La medición de deflexiones es una técnica de evaluación estructural de pavimentos flexibles cuyo valor puede considerar la competencia del conjunto pavimento.

El incremento en el tráfico vehicular, y del porcentaje de vehículos pesados, así como la incertidumbre asociada a la proyección de estos, hacen que el ahuellamiento sea una de las fallas más frecuentes y severas que afectan los pavimentos. Esta aplicación tiende a hacer del ahuellamiento probable uno de los indicadores a predecir y controlar esta falla, buscando principalmente la preservación de la velocidad y seguridad, al evitar el fenómeno de hidropneumático. Para tal fin es común recurrir a modelos calibrados para predecir un ahuellamiento máximo que pueda ocasionar efectos adversos al funcionamiento del pavimento. Este criterio es comúnmente usado en los métodos de diseño de pavimentos con enfoque mecanicistas-empíricos, sin embargo, pocas investigaciones se han realizado para ofrecer herramientas de seguimiento y predicción del avance de esta falla a lo largo del tiempo.

Existen muchos factores que pueden influir en el desarrollo de deformaciones plásticas en la estructura de pavimentos asfálticos. En los métodos empíricos para predecir esta falla se consideran factores tales como las propiedades de los materiales (ej. módulo resiliente), temperatura ambiental, presión de inflado de la llanta, duración de la carga, número de ciclos, y velocidad de recorrido. El uso de estos parámetros ha dado resultados exitosos. Sin embargo, su aplicabilidad parece limitada al diseño del pavimento, ya que es poco común o necesita de una inversión de tiempo considerable, el

poder contar con toda la información requerida por estos modelos a partir de una estructura de pavimento ya construida.

En la actualidad se han desarrollado nuevas disciplinas para la administración de los pavimentos utilizando modelos de predicción del comportamiento del mismo. Permitiendo la planificación de los trabajos y la optimización de los recursos destinados a la conservación. Estos modelos de predicción para deterioros en los pavimentos son de utilidad para gestionar o administrar la red de pavimentos, identificando las necesidades futuras de mantenimiento y reparación. Permiten además simular el comportamiento de los pavimentos a lo largo de su vida útil. En el caso de los países con una economía en subdesarrollo es de mucha utilidad incorporar modelos creados por organismo internacionales. Los desarrollos de estos modelos pueden iniciarse a partir de modelos empíricos o mecanísticos. En relación a los modelos empíricos tienen como origen datos reales del pavimento existente, como por ejemplo criterios de diseño, datos de tránsito, condiciones climáticas y deterioros presentes al largo de su vida útil.

Por otro lado, los modelos mecanísticos se basan no solo en la información de los pavimentos existentes, sino particularmente en características del comportamiento de las diversas capas y materiales que lo conforman, especialmente propiedades mecánicas y físicas. Es así que de acuerdo a la forma de predicción que presentan los modelos, es posible diferenciar dos tipos de ellos, un modelo agregado o acumulado e incremental.

Los modelos de deterioro acumulados, son aquellos que para predecir un deterioro futuro requieren conocer por completo la historia del comportamiento del pavimento, es decir, se necesita saber de datos tales como la tasa de crecimiento del tránsito a lo largo de la vida del pavimento, tránsito promedio diario al inicio del servicio del pavimento, ejes equivalentes acumulados al momento de la evaluación, nivel de servicio inicial, en muchos casos esto no es posible y por una u otra razón se cuenta sólo con datos parciales. Por otro lado, los modelos de **deterioro de tipo incremental**, no requieren conocer la historia previa para predecir los comportamientos futuros, sino que permiten hacerlo con base en un conjunto de ecuaciones y operaciones lógicas, necesitando conocer sólo el estado actual del pavimento, además de las características estructurales,

climáticas existentes y el tránsito que circula por dicho pavimento en el año de evaluación.

2.14. Ecuaciones de predicción del ahuellamiento

El estudio a ser presentado evalúa tres distintas ecuaciones para predecir el ahuellamiento en el pavimento flexible. Estas han tenido una gran aceptación en las distintas agencias para poder evaluar este típico daño en el asfalto.

Estas ecuaciones de predicción de ahuellamiento fueron desarrolladas en laboratorios en Argentina, Colombia y Perú.

La ecuación de Colombia que fue desarrollada en la Universidad del Cauca (Benavides), la ecuación de la Argentina es de la Universidad Nacional de Rosario (Martínez-Pagola) y La ecuación de Perú que fue desarrollada en la Universidad de Piura.

2.14.1. Ecuación de predicción de ahuellamiento desarrollada en Argentina

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + K + Ah_{\text{medido}} * n$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = Ahuellamiento inicial

K = coeficiente de proyección de ahuellamiento debido al tipo de carga = (0,289)

Ah_{medido} = Ahuellamiento medido en el año de estudio

n = Número de años

2.14.2. Ecuación de predicción de ahuellamiento desarrollada en Colombia

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + \frac{T^4 * (Ah_{\text{medido}} * n)}{100}$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

$Ah_{inicial}$ = Ahuellamiento inicial

T = Coeficiente de proyección de ahuellamiento debido a la composición de la mezcla y de las condiciones experimentales (esfuerzos, frecuencia, temperatura) = (3,170)

Ah_{medido} = Ahuellamiento medido en el año de estudio

n = Número de años

2.14.3. Ecuación de predicción de ahuellamiento desarrollada en Perú

$$Ah_{futuro} = Ah_{inicial} + (M * 10^{k_1 * n^{k_2}}) + Ah_{medido}$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro (mm)

$Ah_{inicial}$ = Ahuellamiento inicial = (2 mm)

M = Constante que está en función del material y del tiempo transcurrido = (0,200)

k_1 = Coeficientes por número de carriles por sentido (un carril por sentido = 0,5)

k_2 = Coeficientes de proyección de ahuellamiento debido a la propiedad del material (temperatura, esfuerzo y contenido humedad) = (1,640)

n = Número de años

Ah_{medido} = Ahuellamiento medido (mm)

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA SOBRE LA PROYECCIÓN DEL AHUELLAMIENTO EN VÍAS URBANAS Y RURALES

3.1. Enfoque de la aplicación

En nuestro país desde las últimas décadas hasta la actualidad la utilización del pavimento flexible ha adquirido un lugar muy importante en la construcción de carreteras debido al comportamiento que este presenta ante la aplicación de cargas sobre su superficie, distribuyendo las mismas en cada una de las capas que constituyen la estructura, desde la base hasta la carpeta asfáltica.

Se ha observado que el pavimento flexible es susceptible a una distinta tipología de daños por acción de la carga de tráfico y las condiciones en las que se encuentra. Un tipo de daño común en el asfalto es el ahuellamiento, causado por el tráfico y los distintos mecanismos que transmite.

El estudio evalúa los distintos factores para el ahuellamiento en el pavimento flexible de distintos tramos ya sea urbanos o rurales, para así realizar la aplicación de modelos para predecir el ahuellamiento.

La aplicación del modelo de predicción del ahuellamiento se realizará en los siguientes tramos urbanos y rurales:

Tramos urbanos:

- Calle Sevilla
- Calle Ramon Rojas
- Calle María Claret

Tramos rurales:

- Tramo Guerrahuayco – San Andrés
- Tramo Monte Centro – cruce San Pedro de Buena Vista

3.2. Ubicación del área de estudio

Los tramos en estudio se encuentran en el departamento de Tarija, provincia (Cercado).

Figura N° 28 Ubicación geográfica de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

Las coordenadas de los tramos son las siguientes:

3.2.1. Coordenadas de los tramos urbanos

- Calle Sevilla:

Este tramo tiene una longitud de 366 metros que empiezan en la progresiva 0+000 en la intersección con la calle Bolívar, se encuentra en el barrio El Molino, distrito 1 de la ciudad de Tarija y finaliza en la progresiva 0+366 en la intersección con la avenida Víctor Paz Estensoro, en el mismo barrio El Molino.

Figura N° 29 Ubicación del tramo calle Sevilla



Fuente: Elaboración propia

Inicio tramo:

Latitud: 21°31'50,30'', Sur

Longitud: 64°44'17,60'', Oeste

Altitud: 1875 m.s.n.m

Fin tramo:

Latitud: 21°32'01,29'', Sur

Longitud: 64°44'22,00'', Oeste

Altitud: 1869 m.s.n.m

Y en las siguientes coordenadas UTM:

Inicio tramo:

X: 319913,02 m, Este

Y: 7617951,06 m, 20 K, Sur.

Fin tramo:

X: 319851,61 m, Este

Y: 7617781,51 m, 20 K, Sur.

- **Calle Ramon Rojas:**

Este tramo tiene una longitud de 511 metros, que empieza en la progresiva 0+000 en la intersección con la avenida Domingo Paz, se encuentra en el barrio El Molino, distrito 1 de la ciudad de Tarija y finaliza en la progresiva 0+511 en la intersección con la avenida Víctor Paz Estensoro, en el mismo barrio El Molino.

Figura N° 30 Ubicación del tramo calle Ramon Rojas



Fuente: Elaboración propia

Se encuentra en las siguientes coordenadas geográficamente:

Inicio tramo:

Latitud: 21°31'56,45'', Sur

Longitud: 64°44'16,46'', Oeste

Altitud: 1873 m.s.n.m.

Fin tramo:

Latitud: 21°32'04,27'', Sur

Longitud: 64°44'19,25'', Oeste

Altitud: 1867 m.s.n.m.

Y en las siguientes coordenadas UTM:

Inicio tramo:

X: 320009,56 m, Este

Y: 7617932,14 m, 20 K, Sur.

Fin tramo:

X: 319931,93 m, Este

Y: 7617690,73 m, 20 K, Sur.

- Calle María Claret:

Este tramo tiene una longitud de 237 metros que empiezan en la progresiva 0+000 en la intersección con la calle Ciro Trigo, se encuentra en el barrio Virgen de Fátima, distrito 5 de la ciudad de Tarija y finaliza en la progresiva 0+237 en la intersección con la avenida Belgrano.

Figura N° 31 Ubicación del tramo calle María Claret



Fuente: Elaboración propia

Se encuentra en las siguientes coordenadas geográficamente:

Inicio tramo:

Latitud: $21^{\circ}32'26,17''$, Sur
 Longitud: $64^{\circ}43'20,43''$, Oeste
 Altitud: 1861 m.s.n.m.

Fin tramo:

Latitud: $21^{\circ}33'18,96''$, Sur
 Longitud: $64^{\circ}43'17,63''$, Oeste
 Altitud: 1862 m.s.n.m.

Y en las siguientes coordenadas UTM:

Inicio tramo:

X: 321631,71 m, Este
 Y: 7617036,03 m, 20 K, Sur.

Fin tramo:

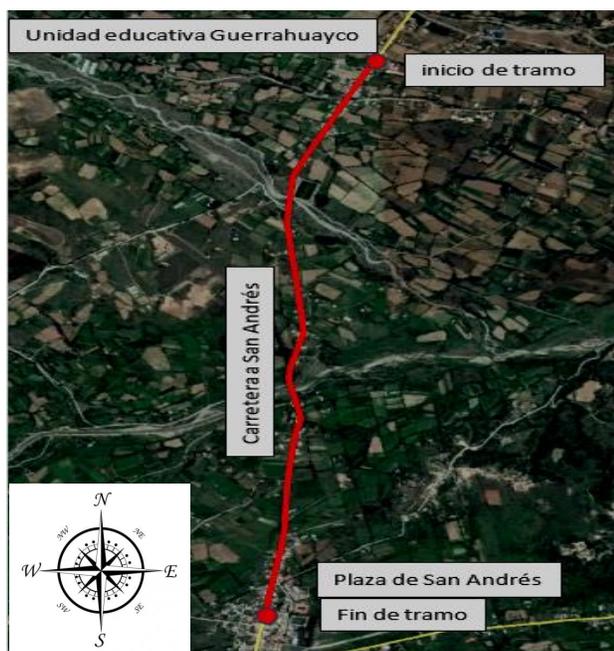
X: 321707,00 m, Este
 Y: 7617258,56 m, 20 K, Sur.

3.2.2. Coordenadas de los tramos rurales

- **Tramo Guerrahuayco – San Andrés**

Dicho tramo tiene una longitud de 3450 metros que empiezan en la progresiva 0+000 en la unidad educativa Guerrahuayco y finaliza en la progresiva 3+450 en la Plaza principal de San Andrés.

Figura N° 32 Ubicación del tramo Guerrahuayco - San Andrés



Fuente: Elaboración propia

Se encuentra en las siguientes coordenadas geográficamente:

Inicio tramo:

Latitud: 21°35'31,68'', Sur

Longitud: 64°48'49,37'', Oeste

Altitud: 1990 m.s.n.m.

Fin tramo:

Latitud: 21°37'20,46'', Sur

Longitud: 64°49'03,77'', Oeste

Altitud: 1982 m.s.n.m.

Y en las siguientes coordenadas UTM:

Inicio tramo:

X: 312233,24 m, Este

Y: 7611223,12 m, 20 K, Sur

Fin tramo:

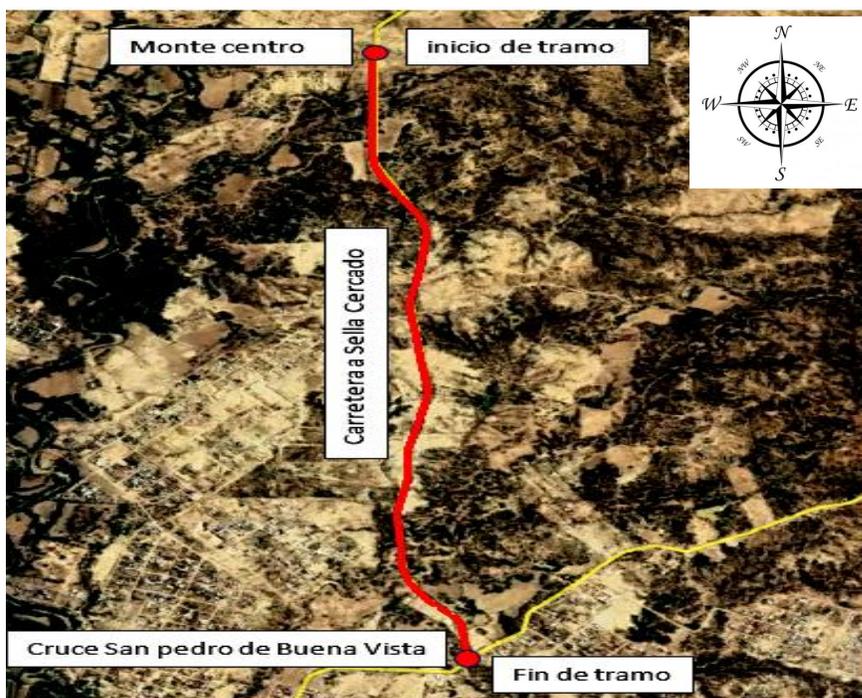
X: 311834,84 m, Este

Y: 7607948,22 m, 20 K, Sur

- **Tramo Monte Centro - cruce San Pedro de Buena Vista**

El tramo tiene una longitud de 2840 metros que empiezan en la progresiva 0+000 en la comunidad de Monte Centro, pasa por la comunidad monte sud y como también por el barrio Japón y finaliza en la progresiva 2 + 840 al final de la calle Colon y el cruce de San pedro de Buena Vista

Figura N° 33 Ubicación del tramo Monte Centro – cruce San Pedro de Buena Vista



Fuente: Elaboración propia

Se encuentra en las siguientes coordenadas geográficamente:

Inicio tramo:

Latitud: 21°28'06,44'', Sur

Longitud: 64°42'55,73'', Oeste

Altitud: 1955 m.s.n.m.

Fin tramo:

Latitud: 21°29'34,69'', Sur

Longitud: 64°42'46,54'', Oeste

Altitud: 1938 m.s.n.m.

Y en las siguientes coordenadas UTM:

Inicio tramo:

X: 322254,89 m, Este

Y: 7625031,56 m, 20 k, Sur

Fin tramo:

X: 322549,15 m, Este

Y: 7622320,52 m, 20 k, Sur

3. Características de los tramos de estudio

Los tramos en estudio son los siguientes:

3.3.1. Tramos urbanos

- **Calle Sevilla.**

Este tramo en estudio se encuentra ubicado en el distrito 1, en el barrio El Molino, de la zona urbana de la ciudad de Tarija, siendo una vía que concentra el tráfico que se dirige de la calle Bolívar y esta procede a la avenida Jaime Paz Zamora. Es un tramo de vía conectora de sentido único de circulación.

En la figura N° 34, se muestra el sentido del tránsito de la calle Sevilla; las flechas de color azul indican el sentido del flujo de la vía de Noreste a Suroeste desde la calle Bolívar hasta la avenida Jaime Paz Zamora.

Según la información recopilada de la alcaldía de la ciudad de Tarija, esta calle se asfalto el año 1993 en el periodo del alcalde Oscar Zamora Medinacelli tiene una capa de rodadura de carpeta asfáltica de 5 cm.

En la siguiente tabla se muestra el paquete estructural que presenta el tramo urbano de la Calle Sevilla

Tabla N° 6 Paquete estructural que presenta el tramo calle Sevilla

Tramo	Espesor de la carpeta asfáltica	Espesor de la capa base	Espesor de la capa sub base	Espesor de la sub rasante mejorada
Calle Sevilla	5 cm	20 cm	20 cm	20 cm

Fuente: Alcaldía Municipal de Tarija

El Gobierno Municipal de Cercado con el plan de asfalto en el centro de la ciudad con el fin que mejore el aspecto de las calles ejecuto el trabajo de bacheo en todo el casco viejo de la ciudad de Tarija en el año 2018, donde la primera fase inició en la calle Sevilla.

Al recorrer este tramo de estudio, se pudo identificar que presenta sectores con pavimento antiguo y pavimento nuevo (bacheo de edad del pavimento de dos años).

Figura N° 34 Sentido del tráfico de la calle Sevilla



Fuente: Elaboración propia

- **Calle Ramon Rojas.**

Este tramo en estudio se encuentra ubicado entre los distritos 1 en la zona urbana de la ciudad de Tarija, esta calle es la que conecta y concentra el tráfico que se dirige desde la avenida Domingo Paz, otras calles aledañas a esta y procede hacia la avenida Jaime Paz Zamora, es un tramo de vía conectora de sentido único de circulación.

En esta calle no se tomó en cuenta el tramo que se encuentra entre la calle Corrado y la avenida Domingo Paz, por que presenta un pavimento articulado con adoquines.

En la figura N° 35 se puede evidenciar el sentido del flujo del tráfico de esta calle las flechas de color azul indican el sentido de la vía que parte desde la avenida Domingo Paz y procede hacia la avenida Jaime Paz Zamora.

Según la información recopilada de la alcaldía de la ciudad de Tarija, esta calle se asfalto el año 1993 en el periodo del alcalde Oscar Zamora Medinacelli tiene una capa de rodadura de carpeta asfáltica de 5 cm.

En esta calle también se ejecutó el trabajo de bacheo en el año 2018, donde se realizó en la primera fase del trabajo de bacheo en todo el casco viejo de la ciudad de Tarija.

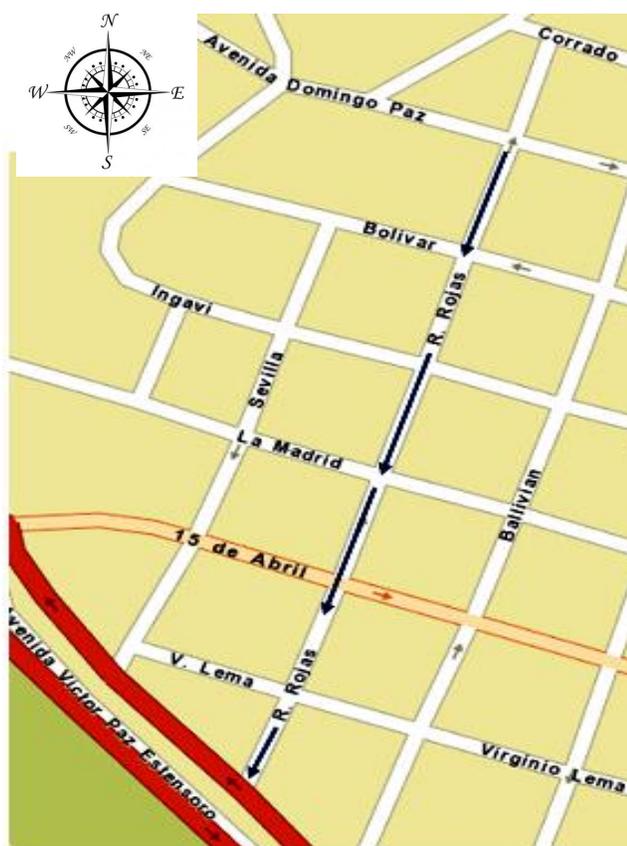
En la siguiente tabla se muestra el paquete estructural que presenta el tramo urbano de la Calle Ramon Rojas

Tabla N° 7 Paquete estructural que presenta el tramo calle Ramon Rojas

Tramo	Espesor de la carpeta asfáltica	Espesor de la capa base	Espesor de la capa sub base	Espesor de la sub rasante mejorada
Calle Ramon Rojas	5 cm	20 cm	20 cm	20 cm

Fuente: Alcaldía Municipal de Tarija

Figura N° 35 Sentido del tráfico de la calle Ramon Rojas



Fuente: Elaboración propia

- Calle María Claret.

Este tramo en estudio se encuentra ubicado en el distrito 5 en la zona urbana de la ciudad de Tarija, esta calle es la que conecta y concentra el tráfico que se dirige desde la calle Ciro Trigo, junto con otras calles aledañas como se puede evidenciar en la figura N° 36, las flechas rojas muestran la dirección del flujo vehicular que procede hacia la avenida Belgrano, es un tramo de vía conectora de sentido único de circulación.

Según la información recopilada de la alcaldía de la ciudad de Tarija, esta calle se asfalto el año 1995 en el periodo del alcalde Oscar Zamora Medinacelli tiene una capa de rodadura de carpeta asfáltica de 5 cm.

En la siguiente tabla se muestra el paquete estructural que presenta el tramo urbano de la Calle María Claret

Tabla N° 8 Paquete estructural que presenta el tramo calle María Claret

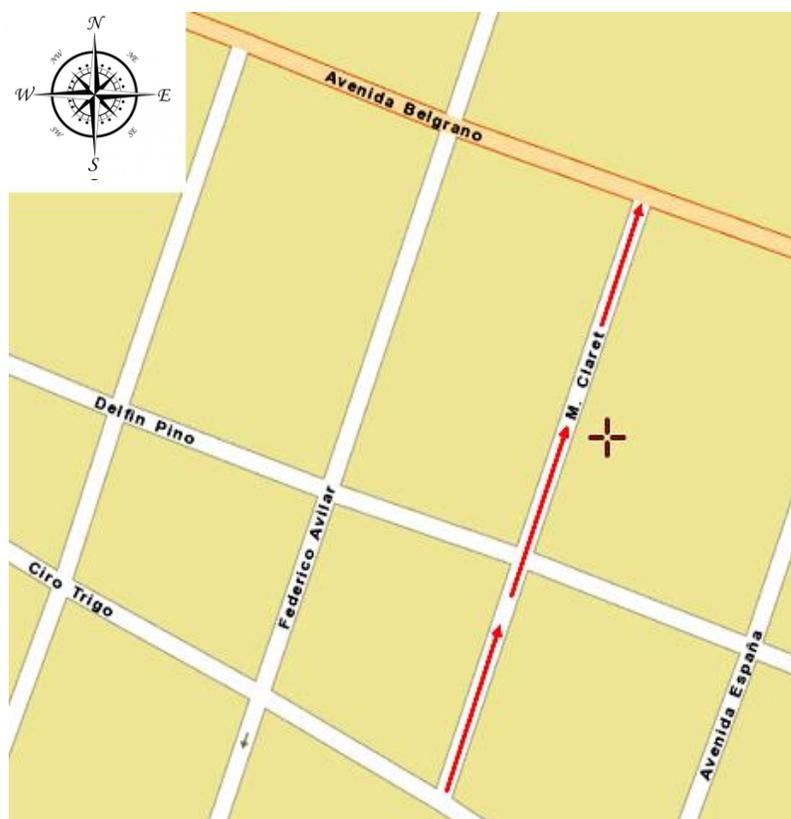
Tramo	Espesor de la carpeta asfáltica	Espesor de la capa base	Espesor de la capa sub base	Espesor de la sub rasante mejorada
Calle María Claret	5 cm	20 cm	20 cm	20 cm

Fuente: Alcaldía Municipal de Tarija

Al recorrer este tramo de estudio, se pudo identificar que presenta pavimento antiguo.

El Gobierno Municipal de Cercado con el plan de asfaltos ejecuto el trabajo de sellado de grietas de esta calle en el año 2017.

Figura N° 36 Sentido del tráfico de la calle María Claret



Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Tramos rurales

- Tramo Guerrahuayco – San Andrés

Este tramo en estudio es una de las vías turísticas del municipio de Cercado, que conecta con lugares promocionados por la Alcaldía. San Andrés, es un lugar recreativo dentro de un paisaje único, que se encuentra dentro de la Reserva Biológica de Sama.

Es un tramo de vía estructurante de doble sentido de circulación, Al borde de la carretera están los cordones y a escasos metros las construcciones que se van levantando en el lugar. Estas edificaciones son construidas a escasos metros de la carretera, dos como máximo, cuando la norma municipal refiere que deben ser veinte como mínimo.

Por un lado, es una vía de alto tráfico, por otro una calle residencial. “Esta doble función trae una serie de conflictos que convirtió a la vía en una amenaza de vida para las personas que habitan la zona

Según la información recopilada de Servicio Departamental de Caminos Tarija (SEDECA), este tramo de carretera fue pavimentado el año 2005, se realizó un bacheo localizado el año 2014, y a la fecha está en estudio para realizar un recapado. Tiene un ancho de 3,5 metros por eje obteniendo 7 metros de ancho de la vía además bermas de 1 metro con cunetas revestidas en ambos márgenes, la capa de rodadura es una carpeta asfáltica de 7 cm.

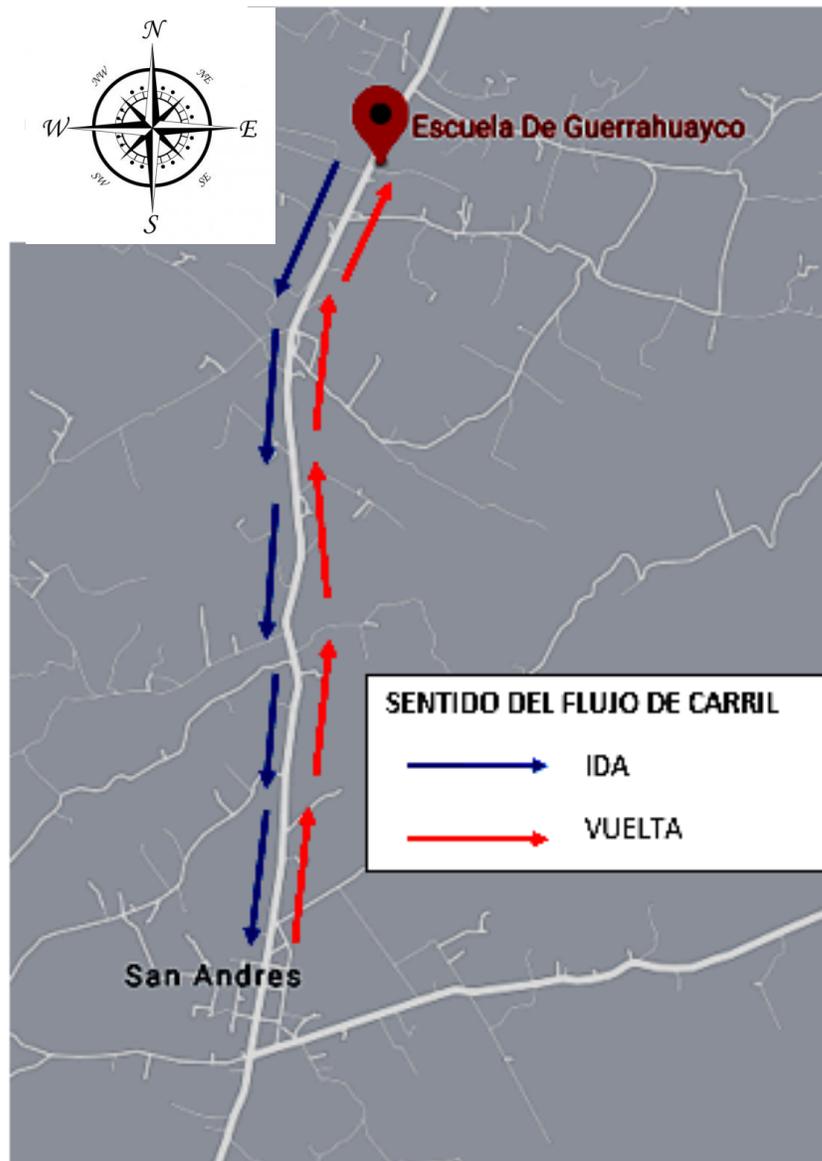
En la siguiente tabla se muestra el paquete estructural que presenta el tramo Guerrahuayco – San Andrés:

Tabla N° 9 Paquete estructural que presenta el tramo Guerrahuayco – San Andrés

Tramo	Espesor de la carpeta asfáltica	Espesor de la capa base	Espesor de la capa sub base	Espesor de la sub rasante mejorada
Guerrahuayco – San Andrés	7 cm	25 cm	25 cm	25 cm

Fuente: Alcaldía Municipal de Tarija

Figura N° 37 Sentido del tráfico del tramo Guerrahuayco – San Andrés



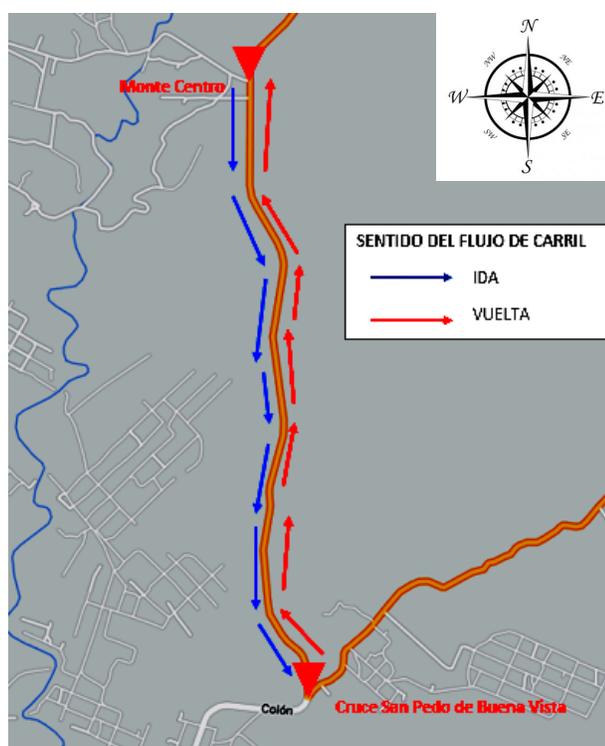
Fuente: Elaboración propia

- Tramo Monte Centro - cruce San Pedro de Buena Vista.

Este tramo en estudio se encuentra ubicado al noreste de la provincia cercado siendo una zona rural de la ciudad de Tarija, este tramo es una vía que concentra el tráfico que se dirige y procede a la comunidad de Sella Cercado y Méndez. Es un tramo de vía estructurante de doble sentido de circulación.

Este tramo es una de las principales alternativas para los turistas, habitantes de la zona o cualquier persona que quiera llegar al municipio de San Lorenzo en la provincia Méndez, como también a las comunidades de Sella, Monte Centro y Monte Cercado. Se volvió un tramo muy transitado en los últimos años ya que es una alternativa menos transitada para llegar al municipio de San Lorenzo el cual es muy visitado por turistas y toda la población tarijeña, como también para llegar a las comunidades de la zona. Lastimosamente en dicho tramo se puede observar que presenta muchas fallas que afectan de manera directa a los habitantes de la zona como también a las personas que toman esa ruta para visitar al municipio de San Lorenzo, que a medida que pasa el tiempo se vuelve un lugar cada vez más visitado.

Figura N° 38 Sentido del tráfico del tramo Monte Centro - cruce San Pedro de Buena Vista



Fuente: Elaboración propia

Según la información recopilada de la alcaldía de la ciudad de Tarija, este tramo de carretera tiene un ancho de vía de seis metros y la capa de rodadura es una carpeta asfáltica de 6 cm.

En la siguiente tabla se muestra el paquete estructural que presenta el tramo cruce de Monte Centro – San Pedro de Buena Vista:

Tabla N° 10 Paquete estructural que presenta el tramo Monte Centro – cruce San Pedro de Buena Vista

Tramo	Espesor de la carpeta asfáltica	Espesor de la capa base	Espesor de la capa sub base	Espesor de la sub rasante mejorada
Monte Centro – San Pedro de Buena Vista	6 cm	25 cm	20 cm	20 cm

Fuente: Alcaldía Municipal de Tarija

3.4. Caracterización del ahuellamiento

El ahuellamiento se define como la consolidación progresiva o el desplazamiento de materiales bajo cargas repetidas en las capas de pavimento de asfalto o en la base subyacente (Roberts et al., 1996). La forma distorsionada de la superficie de un pavimento con ahuellamiento es consecuencia de las deformaciones permanentes presentes en cada capa de pavimento y subrasante. Si bien existe cierto consenso sobre la definición y los mecanismos que causan el ahuellamiento, no se ha desarrollado un método universalmente aceptado para caracterizar y cuantificar el ahuellamiento.

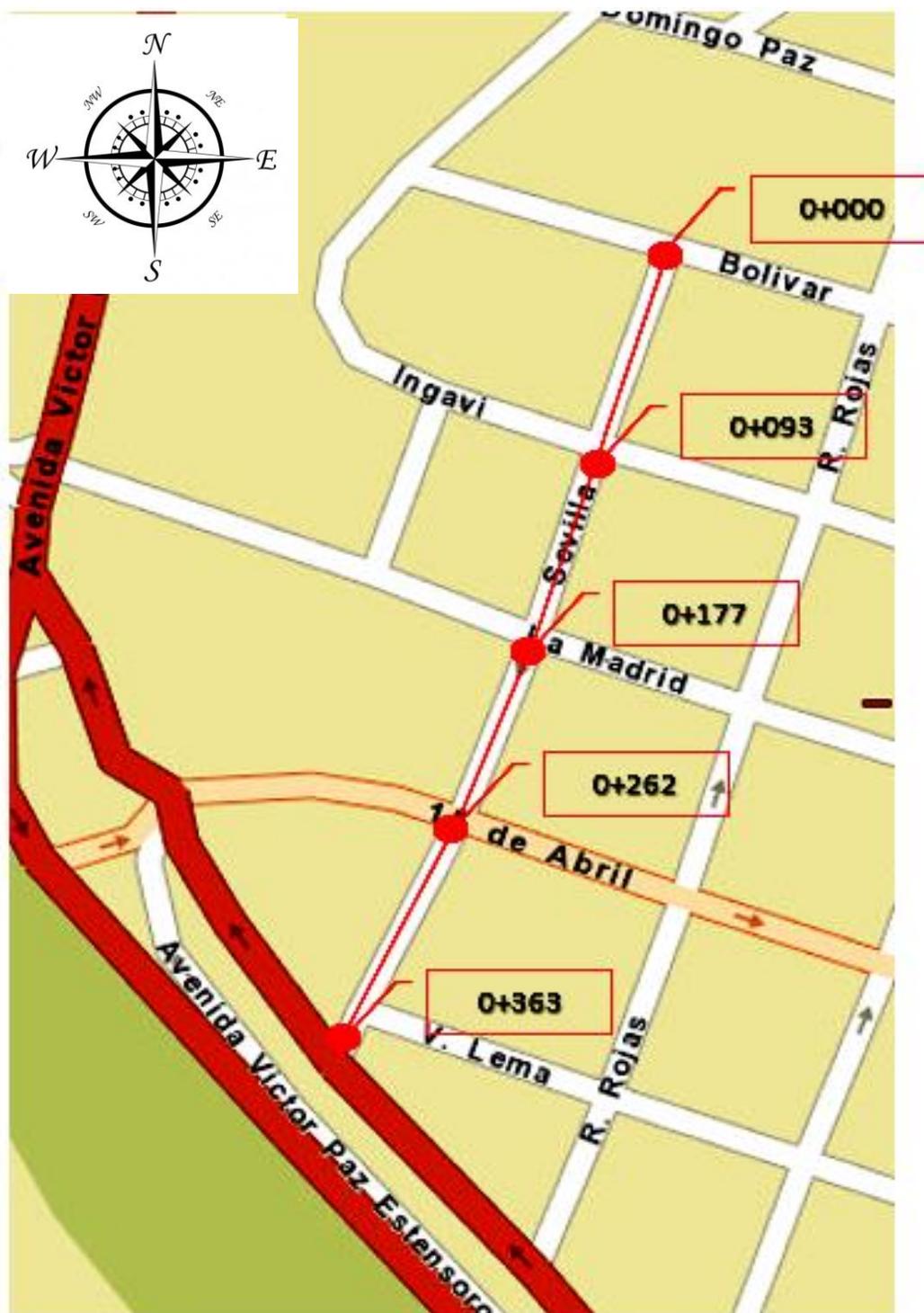
Los métodos manuales se usaban tradicionalmente para la recopilación de datos de ahuellamiento hasta que se desarrollaron métodos automatizados confiables. Los métodos manuales también se siguen utilizando perfiles transversales para evaluaciones automatizadas de instrumentos como la opción preferida.

3.5. Medición del ahuellamiento

La medición del ahuellamiento de este proyecto se realizó siguiendo los pasos ya descritos en el Capítulo II.

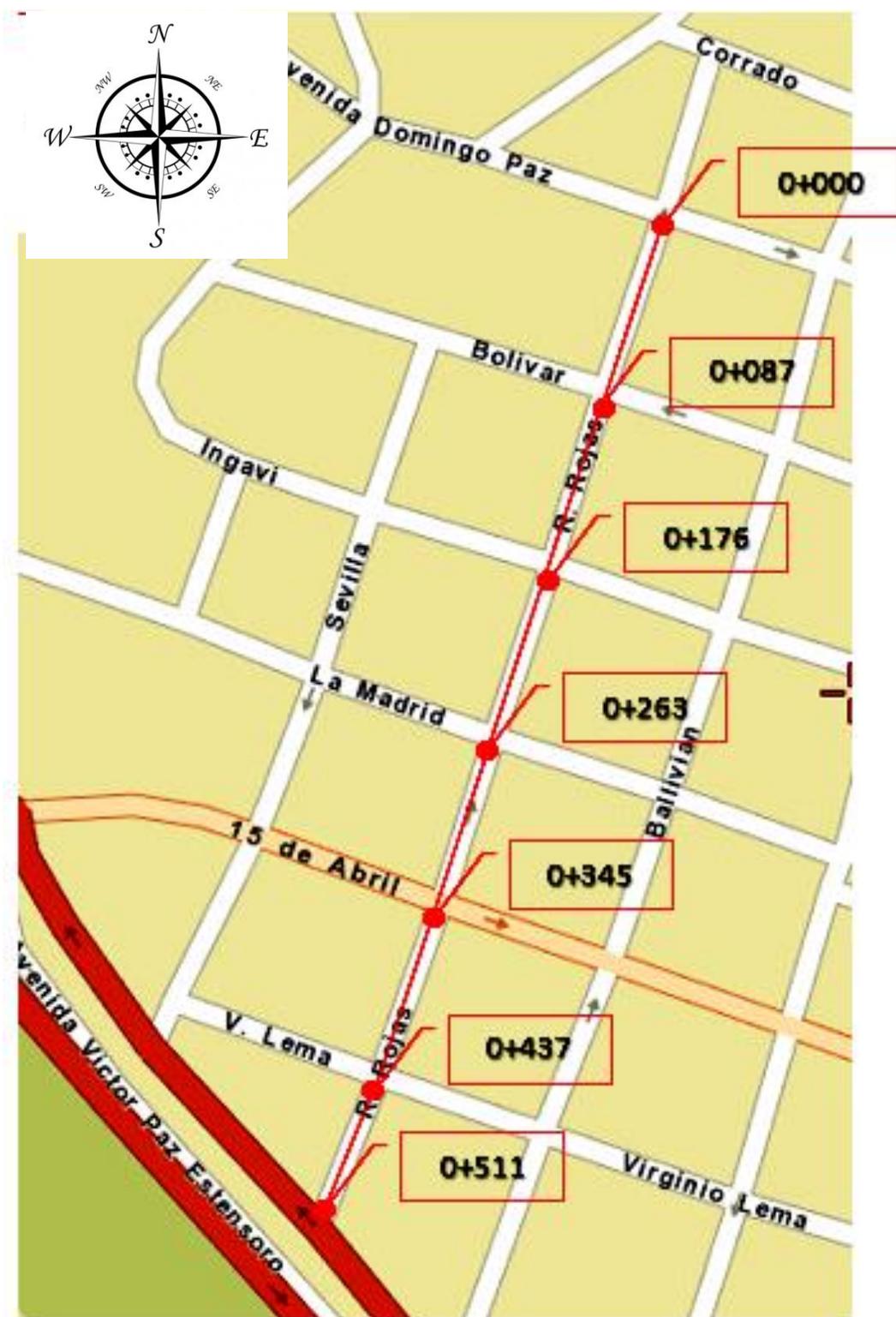
En las siguientes figuras se muestran los puntos iniciales, final y las progresivas para una mejor comprensión y ubicación de los segmentos de los tramos:

Figura N° 39 Ubicación de segmentos calle Sevilla



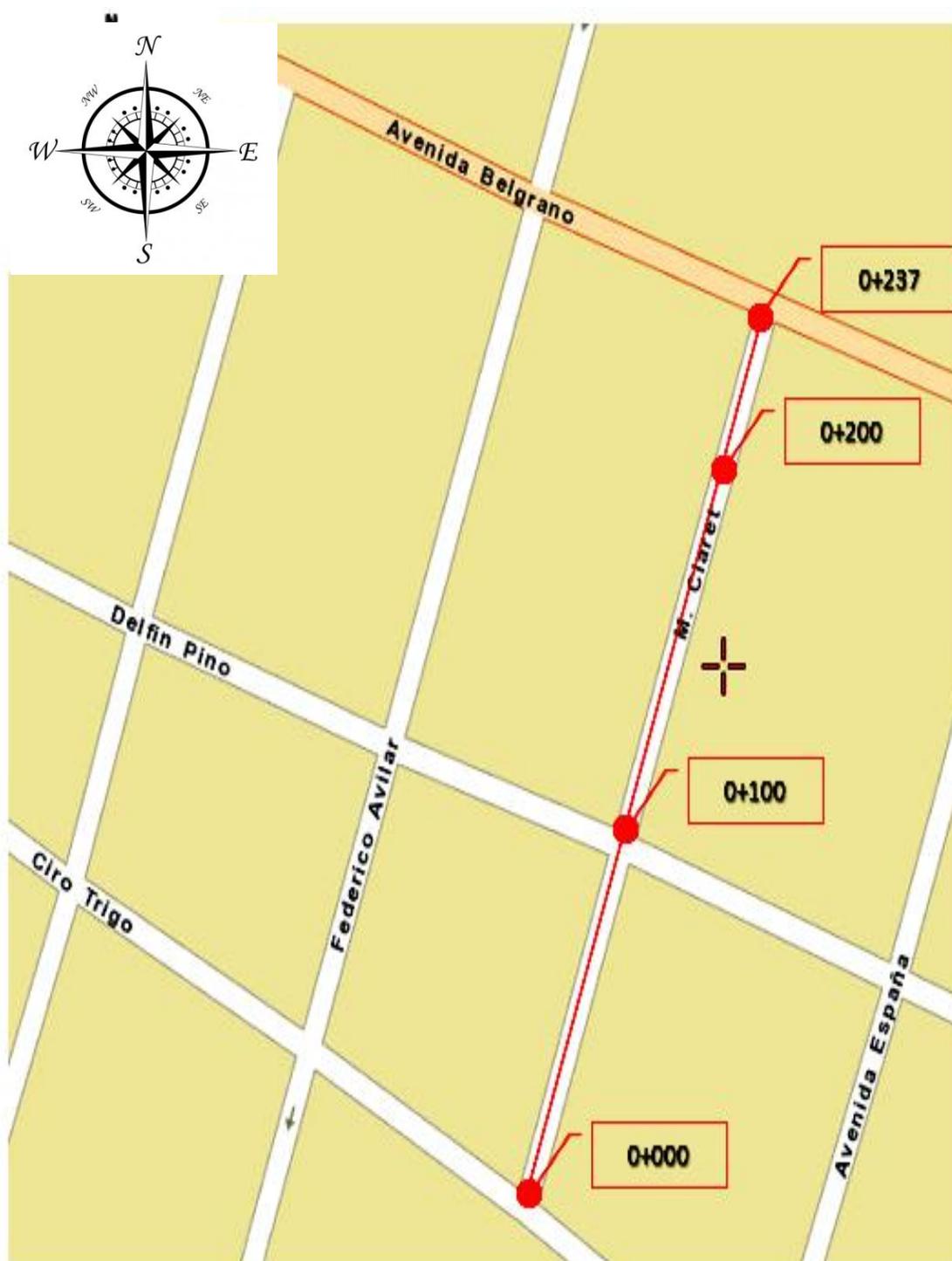
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 40 Ubicación de segmentos calle Ramon Rojas



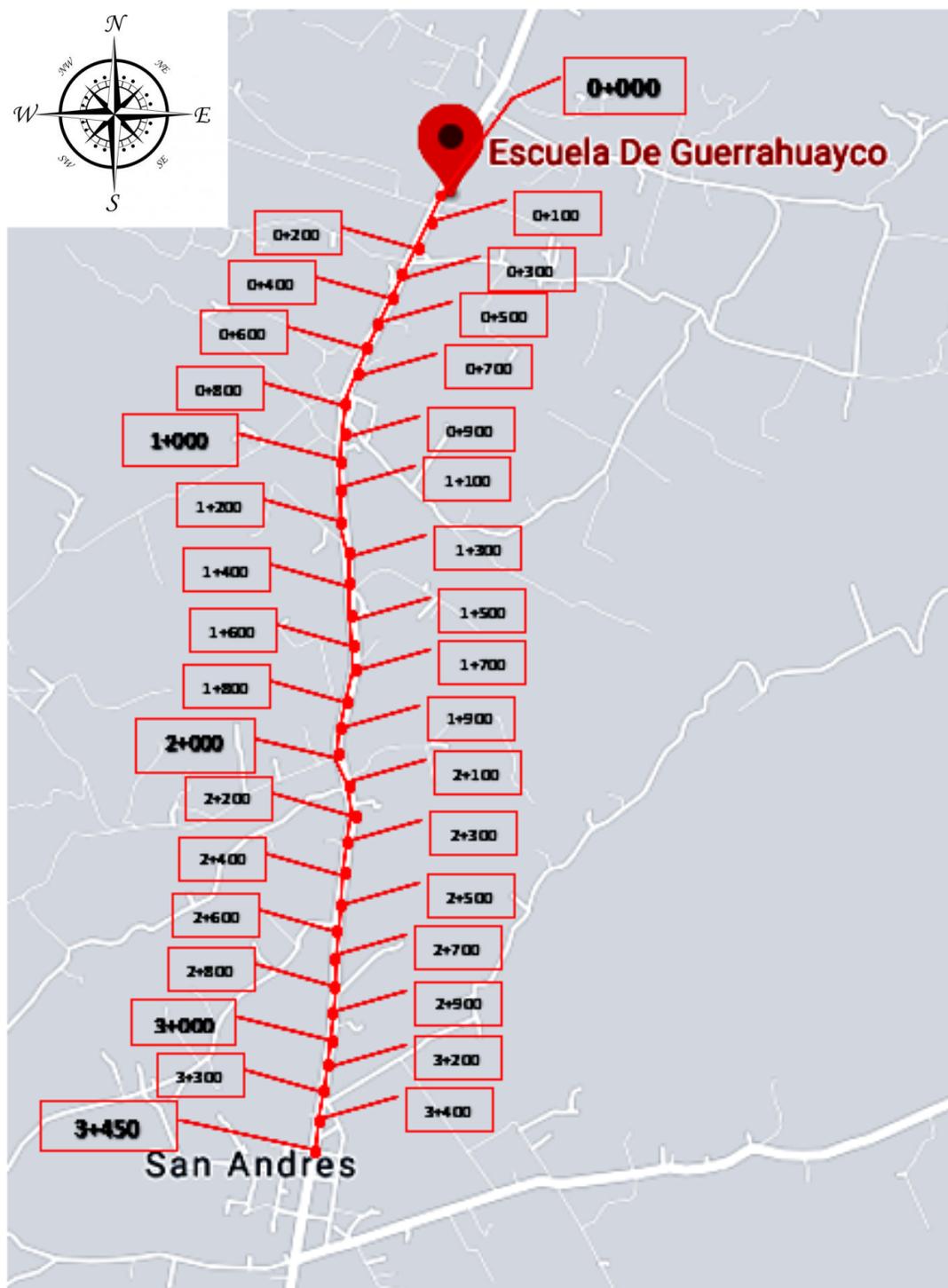
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 41 Ubicación de segmentos calle María Claret



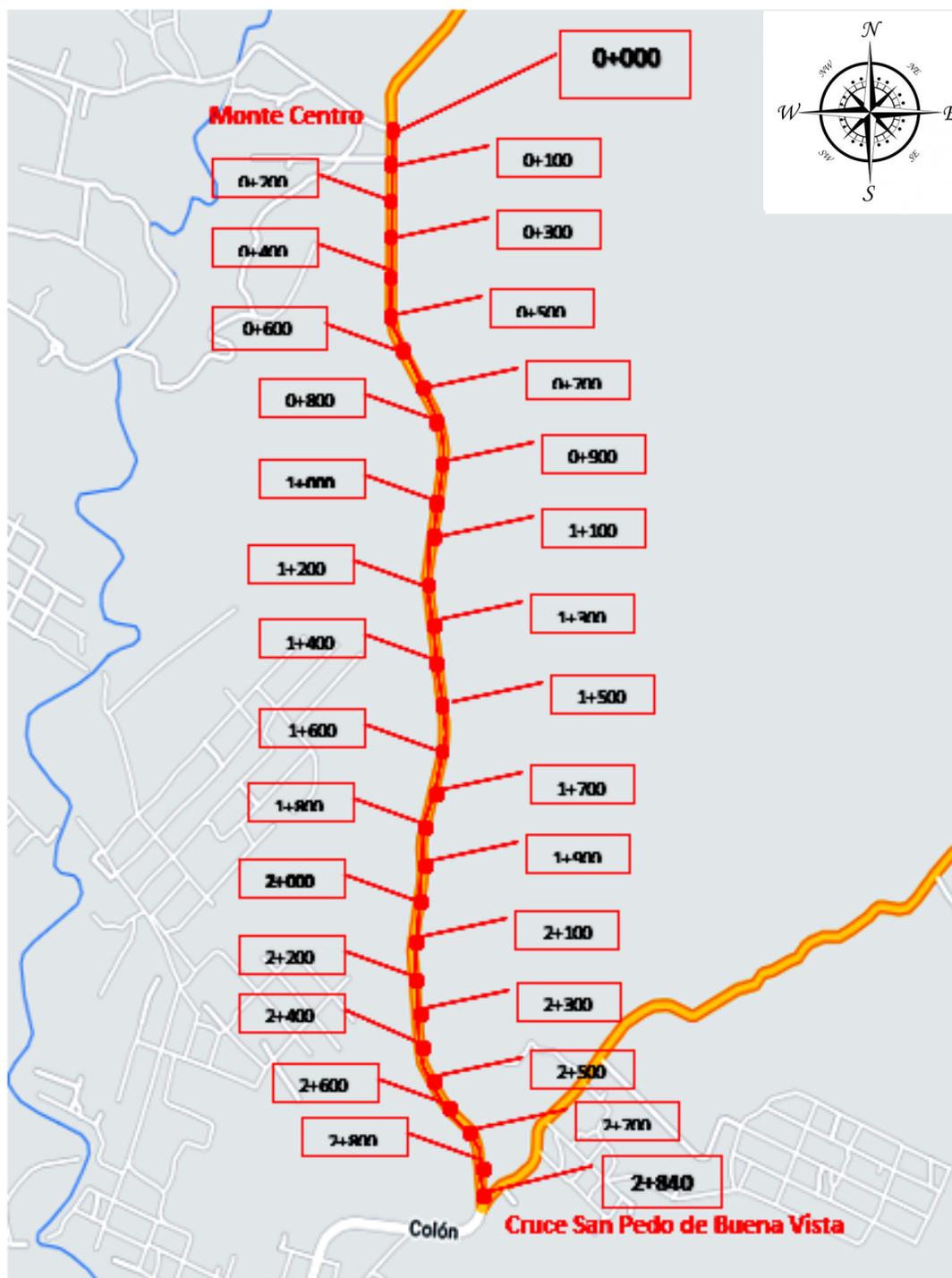
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 42 Ubicación de segmentos tramo Guerrahuayco- San Andrés



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 43 Ubicación de segmentos tramo Monte Centro - cruce San Pedro de Buena Vista



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra las planillas con los datos obtenidos en campo:

3.5.1. Tramos urbanos

Tabla N° 11 Tabla de ahuellamientos medidos de la calle Sevilla

DATOS DE MEDICION DE LA ALTURA DE AHUELLAMIENTO (mm)

NOMBRE DE LA VIA: Calle Sevilla **PROG.0+000 - 0+366**
TRAMO D: PROG. 0+000 - 0+366
EVALUADOR: FABIO CALIXTO ZENTENO ENCINAS

Mediciones	Prog.	Ahuellamiento (mm)		Observaciones
		Huella (izq.)	Huella (der.)	
1	0+000	4	4	
	0+005	4	5	
	0+010	4	3	
	0+015	3	4	
	0+020	3	4	
2	0+093	4	3	
	0+098	4	4	
	0+103	4	3	
	0+108	3	3	
	0+113	4	3	
3	0+177	3	3	
	0+182	3	4	
	0+187	4	4	
	0+192	3	3	
	0+197	3	4	
4	0+262	3	3	
	0+267	3	4	
	0+272	3	3	
	0+277	3	5	
	0+282	4	4	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 13 Tabla de ahuellamientos medidos de la calle María Claret**DATOS DE MEDICION DE LA ALTURA DE AHUELLAMIENTO (mm)**

NOMBRE DE LA VIA:

Calle María Claret

PROG.0+000 -
0+237

TRAMO D:

PROG. 0+000 - 0+237

EVALUADOR:

FABIO CALIXTO ZENTENO ENCINAS

Medición	Prog.	Ahuellamiento (mm)		Observaciones
		Huella (izq.)	Huella (der.)	
1	0+000	4	3	
	0+005	4	3	
	0+010	7	3	
	0+015	4	5	
	0+020	7	4	
2	0+100	3	4	
	0+105	4	3	
	0+110	3	3	
	0+115	4	7	
	0+120	4	5	
3	0+177	3	4	
	0+182	4	3	
	0+187	4	4	
	0+192	4	5	
	0+197	4	4	

Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Tramos rurales

Tabla N° 14 Tabla de ahuellamientos medidos del tramo Monte Centro - San Pedro de Buena Vista

DATOS DE MEDICION DE LA ALTURA DE AHUELLAMIENTO (mm)

NOMBRE DE LA VIA: tramo Monte Centro - cruce San Pedro de Buena Vista
TRAMO D: PROG. 0+000 - 2+840
EVALUADOR: FABIO CALIXTO ZENTENO ENCINAS

Medición	Prog.	Ahuellamiento (mm)				Observaciones
		Carril (izquierdo)		Carril (derecho)		
		Huella (ext.)	Huella (int.)	Huella (int.)	Huella (ext.)	
1	0+000	2	1	4	3	
	0+005	3	2	3	2	
	0+010	2	3	3	2	
	0+015	2	2	3	1	
	0+020	1	2	3	2	
2	0+100	2	3	2	3	
	0+105	3	2	3	2	
	0+110	3	3	3	3	
	0+115	2	2	2	3	
	0+120	3	2	3	3	
3	0+200	2	2	3	1	
	0+205	1	2	3	2	
	0+210	2	3	2	2	
	0+215	3	2	2	1	
	0+220	3	1	3	2	
4	0+300	3	2	3	3	
	0+305	2	2	3	3	
	0+310	3	1	3	4	
	0+315	3	3	4	2	
	0+320	1	2	3	4	
5	0+400	2	1	3	2	
	0+405	3	2	3	4	
	0+410	4	3	3	3	
	0+415	3	3	4	4	
	0+420	2	2	3	3	
6	0+500	2	2	3	3	
	0+505	2	2	3	3	
	0+510	3	2	3	3	
	0+515	3	3	2	4	
	0+520	3	2	3	3	
7	0+600	2	2	1	3	

	0+605	2	3	3	4	
	0+610	1	3	3	2	
	0+615	2	2	2	3	
	0+620	3	3	3	3	
8	0+700	2	3	3	3	
	0+705	2	2	3	3	
	0+710	2	2	2	3	
	0+715	3	2	3	3	
	0+720	3	1	3	4	
9	0+800	2	2	3	4	
	0+805	3	2	4	5	
	0+806	3	3	3	3	
	0+807	2	3	4	3	
	0+808	1	3	3	2	
10	0+900	4	3	3	3	
	0+905	5	4	2	2	
	0+910	5	5	1	4	
	0+915	4	5	3	3	
	0+920	1	4	2	2	
11	1+000	3	3	2	1	
	1+005	4	4	3	3	
	1+010	3	4	3	4	
	1+015	1	3	2	4	
	1+020	2	3	3	3	
12	1+100	2	2	3	3	
	1+105	3	1	3	4	
	1+110	2	3	4	3	
	1+115	2	2	5	4	
	1+120	1	2	3	4	
13	1+200	2	3	4	2	
	1+205	1	2	3	3	
	1+210	2	2	3	3	
	1+215	3	2	2	2	
	1+220	2	2	2	1	
14	1+300	3	2	3	4	
	1+305	2	2	3	3	
	1+310	1	3	2	2	
	1+315	2	2	3	1	
	1+320	2	2	3	2	
15	1+400	2	3	3	3	
	1+405	3	2	4	4	
	1+410	1	2	4	5	
	1+415	1	2	2	3	
	1+420	3	2	4	4	
16	1+500	3	2	4	3	

	1+505	2	2	2	4	
	1+510	3	2	3	2	
	1+515	3	2	4	3	
	1+520	3	3	3	4	
17	1+600	2	2	2	1	
	1+605	2	1	3	2	
	1+610	1	3	2	2	
	1+615	2	2	3	3	
	1+620	3	3	2	3	
18	1+700	3	3	3	1	
	1+705	2	4	2	2	
	1+710	1	4	2	3	
	1+715	3	3	2	1	
	1+720	3	3	3	2	
19	1+800	2	3	3	3	
	1+805	3	2	4	3	
	1+810	2	1	4	4	
	1+815	2	3	4	4	
	1+820	2	2	3	4	
20	1+900	3	3	4	4	
	1+905	2	3	3	3	
	1+910	1	2	3	3	
	1+915	2	2	3	4	
	1+920	2	1	3	3	
21	2+000	3	3	4	4	
	2+005	2	2	4	5	
	2+010	3	3	5	4	
	2+015	2	3	5	5	
	2+020	3	3	4	5	
22	2+100	3	2	3	2	
	2+105	4	4	2	1	
	2+110	3	4	2	3	
	2+115	4	3	3	3	
	2+120	3	3	4	3	
23	2+200	2	1	3	3	
	2+205	2	2	2	2	
	2+210	3	2	2	2	
	2+215	2	2	2	1	
	2+220	3	3	3	2	
24	2+300	2	3	4	4	
	2+305	2	2	3	4	
	2+310	3	3	2	2	
	2+315	2	2	3	2	
	2+320	2	2	3	2	
25	2+400	3	3	3	3	

	2+405	3	3	2	2	
	2+410	2	2	2	2	
	2+415	3	3	2	3	
	2+420	2	3	2	2	
26	2+500	2	2	2	3	
	2+505	2	2	2	2	
	2+510	3	3	2	2	
	2+515	3	2	3	3	
	2+520	2	2	2	2	
27	2+600	2	2	3	3	
	2+605	2	3	3	2	
	2+610	2	2	2	3	
	2+615	3	2	4	5	
	2+620	2	2	3	3	
28	2+700	3	2	3	3	
	2+705	2	3	3	4	
	2+710	3	3	3	4	
	2+715	6	3	4	3	
	2+720	2	12	4	3	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 15 Tabla de ahuellamientos medidos del tramo Guerrahuayco - San Andrés

DATOS DE MEDICION DE LA ALTURA DE AHUELLAMIENTO (mm)

NOMBRE DE LA VIA:

tramo Guerrahuayco - San Andrés

TRAMO D:

PROG. 0+000 - 3+450

EVALUADOR:

FABIO CALIXTO ZENTENO ENCINAS

Medición	Prog.	Ahuellamiento (mm)				Observaciones
		Carril (izquierdo)		Carril (derecho)		
		Huella (ext.)	Huella (int.)	Huella (int.)	Huella (ext.)	
1	0+000	2	3	12	3	
	0+005	2	3	4	3	
	0+010	2	10	7	4	
	0+015	5	11	4	3	
	0+020	7	5	7	5	
2	0+100	4	4	7	5	
	0+105	2	2	5	3	
	0+110	6	3	3	2	
	0+115	4	5	5	3	
	0+120	2	6	4	5	
3	0+200	4	3	9	7	
	0+205	10	12	9	7	
	0+210	16	15	12	6	
	0+215	4	3	10	6	
	0+220	5	4	10	8	
4	0+300	5	3	6	8	
	0+305	8	2	5	5	
	0+310	5	10	5	3	
	0+315	10	5	4	3	
	0+320	10	6	7	3	
5	0+400	4	10	12	4	
	0+405	3	9	5	3	
	0+410	4	8	6	3	
	0+415	3	3	4	3	
	0+420	3	5	3	3	
6	0+500	4	3	6	3	
	0+505	3	6	7	3	
	0+510	4	7	6	2	
	0+515	2	10	9	3	
	0+520	3	3	7	4	

7	0+600	4	4	4	3	
	0+605	3	4	3	3	
	0+610	5	4	3	4	
	0+615	5	3	4	3	
	0+620	3	4	5	4	
8	0+700	3	2	2	3	
	0+705	4	3	3	3	
	0+710	4	4	2	4	
	0+715	4	3	4	3	
	0+720	3	3	3	2	
9	0+800	3	3	3	4	
	0+805	3	3	3	4	
	0+806	4	4	4	3	
	0+807	4	3	2	4	
	0+808	3	4	3	2	
10	0+900	3	3	3	4	
	0+905	2	3	4	4	
	0+910	3	4	3	3	
	0+915	4	3	3	3	
	0+920	3	2	4	4	
11	1+000	4	4	3	4	
	1+005	5	4	4	4	
	1+010	5	3	3	3	
	1+015	4	3	4	2	
	1+020	4	5	2	3	
12	1+100	4	4	4	4	
	1+105	3	4	4	4	
	1+110	4	3	3	3	
	1+115	4	2	4	4	
	1+120	3	3	5	3	
13	1+200	4	3	4	3	
	1+205	3	3	3	3	
	1+210	4	4	3	4	
	1+215	4	3	4	4	
	1+220	3	2	4	3	
14	1+300	3	2	4	3	
	1+305	3	3	3	3	
	1+310	3	3	3	4	
	1+315	2	2	4	4	
	1+320	3	2	4	4	

15	1+400	3	4	2	3	
	1+405	4	4	3	2	
	1+410	3	3	3	3	
	1+415	3	4	3	3	
	1+420	2	3	2	2	
16	1+500	3	2	2	2	
	1+505	3	3	3	3	
	1+510	2	4	2	2	
	1+515	3	3	3	2	
	1+520	2	3	3	3	
17	1+600	3	3	3	2	
	1+605	3	4	3	3	
	1+610	2	4	2	2	
	1+615	3	3	2	4	
	1+620	2	3	3	2	
18	1+700	3	3	3	4	
	1+705	3	3	3	3	
	1+710	3	4	4	3	
	1+715	4	3	3	3	
	1+720	4	3	4	4	
19	1+800	3	3	4	4	
	1+805	4	3	3	3	
	1+810	3	2	3	2	
	1+815	4	3	4	2	
	1+820	3	4	4	4	
20	1+900	4	4	3	3	
	1+905	3	4	4	4	
	1+910	4	3	3	4	
	1+915	3	2	4	4	
	1+920	3	4	2	2	
21	2+000	3	5	3	4	
	2+005	3	5	3	4	
	2+010	4	4	4	4	
	2+015	3	3	4	3	
	2+020	3	4	3	2	
22	2+100	6	5	3	4	
	2+105	4	4	3	3	
	2+110	3	3	2	3	
	2+115	4	4	4	2	
	2+120	4	3	4	3	

23	2+200	5	5	4	4	
	2+205	5	4	3	2	
	2+210	4	3	4	3	
	2+215	4	5	3	5	
	2+220	3	4	4	4	
24	2+300	4	4	3	5	
	2+305	4	4	3	3	
	2+310	5	3	4	3	
	2+315	4	3	4	3	
	2+320	2	4	3	4	
25	2+400	2	2	4	2	
	2+405	3	3	3	3	
	2+410	3	3	2	3	
	2+415	4	3	2	2	
	2+420	2	3	4	3	
26	2+500	3	2	3	3	
	2+505	2	2	4	3	
	2+510	3	3	2	4	
	2+515	4	3	3	3	
	2+520	2	4	3	3	
27	2+600	5	4	4	3	
	2+605	5	4	4	4	
	2+610	3	5	2	3	
	2+615	4	3	4	4	
	2+620	3	3	4	5	
28	2+700	4	3	3	3	
	2+705	3	4	3	4	
	2+710	3	3	3	5	
	2+715	4	2	4	4	
	2+720	2	2	5	4	
29	2+800	3	4	4	4	
	2+805	3	3	2	3	
	2+810	4	5	3	4	
	2+815	4	5	4	3	
	2+820	3	3	2	3	
30	2+900	4	4	5	4	
	2+905	4	3	4	4	
	2+910	3	4	5	2	
	2+915	2	2	3	4	
	2+920	4	5	4	3	

31	3+000	4	4	3	2	
	3+005	4	3	4	3	
	3+010	5	5	6	3	
	3+015	3	4	5	4	
	3+020	5	5	4	2	
32	3+100	3	5	4	4	
	3+105	4	4	3	3	
	3+110	3	6	5	4	
	3+115	4	5	4	4	
	3+120	4	4	4	2	
33	3+200	5	3	5	3	
	3+205	3	5	3	4	
	3+210	4	4	4	3	
	3+215	4	6	4	2	
	3+220	3	4	3	2	
34	3+300	3	4	4	4	
	3+305	3	5	4	2	
	3+310	4	6	5	3	
	3+315	3	4	4	4	
	3+320	3	3	3	2	
35	3+400	5	5	3	4	
	3+405	4	4	5	3	
	3+410	5	5	6	3	
	3+415	3	3	4	3	
	3+420	4	4	4	4	

Fuente: Elaboración propia

3.6. Resultados

3.6.1. Ahuellamiento promedio

- Tramos urbanos:

Tabla N° 16 Tabla del ahuellamiento promedio de la calle Sevilla

Prog.	Ahuellamiento (mm)	
	Huella (izq.)	Huella (der.)
0+000	4	4
0+005	4	5
0+010	4	3
0+015	3	4
0+020	3	4
0+093	4	3
0+098	4	4
0+103	4	3
0+108	3	3
0+113	4	3
0+177	3	3
0+182	3	4
0+187	4	4
0+192	3	3
0+197	3	4
0+262	3	3
0+267	3	4
0+272	3	3
0+277	3	5
0+282	4	4
AHUELL PROM/ CARRIL	3,45	3,65
AHUELL PROM/ TRAMO	3,55	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 17 Tabla del ahuellamiento promedio de la calle Ramon Rojas

Prog.	Ahuellamiento (mm)	
	Huella (izq.)	Huella (der.)
0+000	2	2
0+005	3	2
0+010	3	3
0+015	2	3
0+020	2	2
0+087	2	3
0+092	2	3
0+097	3	1
0+102	2	2
0+107	3	3
0+176	3	3
0+181	2	3
0+186	3	4
0+191	4	3
0+196	3	2
0+263	3	2
0+268	2	2
0+273	3	3
0+278	3	3
0+283	3	2
0+345	2	2
0+350	3	2
0+355	2	2
0+360	2	3
0+365	2	2
0+437	2	3
0+442	2	2
0+447	2	2
0+452	3	3
0+457	2	3
AHUELL PROM/ CARRIL	2,50	2,50
AHUELL PROM/ TRAMO	2,50	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 18 Tabla del ahuellamiento promedio de la calle María Claret

Prog.	Ahuellamiento (mm)	
	Huella (izq.)	Huella (der.)
0+000	4	3
0+005	4	3
0+010	10	3
0+015	4	5
0+020	7	4
0+100	3	4
0+105	4	3
0+110	3	3
0+115	4	10
0+120	4	5
0+177	3	4
0+182	4	3
0+187	4	4
0+192	4	5
0+197	4	4
AHUELL PROM/ CARRIL	4,40	4,20
AHUELL PROM/ TRAMO	4,30	

Fuente: Elaboración propia

- **Tramos rurales:**

Tabla N° 19 Tabla del ahuellamiento promedio del tramo Guerrahuayco – San Andrés

	Ahuellamiento (mm)			
	Huella (izq.)		Huella (der.)	
AHUELL PROM/ CARRIL	3,71	3,96	4,00	3,39
AHUELL PROM/ TRAMO	3,77			

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 20 Tabla del ahuellamiento promedio del tramo Monte Centro – cruce San Pedro de Buena Vista

	Ahuellamiento (mm)			
	Huella (izq.)		Huella (der.)	
AHUELL PROM/ CARRIL	2,43	3,00	2,87	3,00
AHUELL PROM/ TRAMO	2,82			

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra un resumen del promedio de los ahuellamientos de los tramos en estudio:

Tabla N° 21 Tabla de resumen de ahuellamientos para tramos urbanos

Tramo	Ahuellamiento promedio (mm)
calle Sevilla	3,55
calle Ramón rojas	2,50
calle maría Claret	4,30

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 22 Tabla de resumen de ahuellamientos para tramos rurales

Tramo	Ahuellamiento promedio (mm)
Guerrahuayco- San Andrés	3,77
Monte Centro - cruce San Pedro de Buena Vista	2,82

Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Clasificación del ahuellamiento

Tramos urbanos:

Tabla N° 23 Clasificación del ahuellamiento de la calle Sevilla

Prog.	Ahuellamiento (mm) (huella izquierda)			Ahuellamiento (mm) (huella derecha)		
	Severidad			Severidad		
	Bajo	Media	Alto	Bajo	Media	Alto
0+000	4			4		
0+005	4			5		
0+010	4			3		
0+015	3			4		
0+020	3			4		
0+093	4			3		
0+098	4			4		
0+103	4			3		
0+108	3			3		
0+113	4			3		
0+177	3			3		
0+182	3			4		
0+187	4			4		
0+192	3			3		
0+197	3			4		
0+262	3			3		
0+267	3			4		
0+272	3			3		
0+277	3			5		
0+282	4			4		
SEVERIDAD (%)	BAJA	100,00				
	MEDIA	0,00				
	ALTA	0,00				

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 24 Clasificación del ahuellamiento de la calle Ramon Rojas

Prog.	Ahuellamiento (mm) (huella izquierda)			Ahuellamiento (mm) (huella derecha)		
	Severidad			Severidad		
	Bajo	Media	Alto	Bajo	Media	Alto
0+000	2			2		
0+005	3			2		
0+010	3			3		
0+015	2			3		
0+020	2			2		
0+087	2			3		
0+092	2			3		
0+097	3			1		
0+102	2			2		
0+107	3			3		
0+176	3			3		
0+181	2			3		
0+186	3			4		
0+191	4			3		
0+196	3			2		
0+263	3			2		
0+268	2			2		
0+273	3			3		
0+278	3			3		
0+283	3			2		
0+345	2			2		
0+350	3			2		
0+355	2			2		
0+360	2			3		
0+365	2			2		
0+437	2			3		
0+442	2			2		
0+447	2			2		
0+452	3			3		
0+457	2			3		
SEVERIDAD (%)	BAJA	100,00				
	MEDIA	0,00				
	ALTA	0,00				

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 25 Clasificación del ahuellamiento de la calle María Claret

Prog.	Ahuellamiento (mm) (huella izquierda)			Ahuellamiento (mm) (huella derecha)		
	Severidad			Severidad		
	Bajo	Media	Alto	Bajo	Media	Alto
0+000	4			3		
0+005	4			3		
0+010		10		3		
0+015	4			5		
0+020		7		4		
0+100	3			4		
0+105	4			3		
0+110	3			3		
0+115	4				10	
0+120	4			5		
0+177	3			4		
0+182	4			3		
0+187	4			4		
0+192	4			5		
0+197	4			4		

SEVERIDAD (%)	BAJA	90,00
	MEDIA	10,00
	ALTA	0,00

Fuente: Elaboración propia

Tramos rurales:

Tabla N° 26 Clasificación del ahuellamiento del tramo Guerrahuayco – San Andrés (carril izquierdo)

Prog.	CARRIL IZQUIERDO					
	Ahuellamiento (mm) (huella externa)			Ahuellamiento (mm) (huella interna)		
	Severidad			Severidad		
	Bajo	Media	Alto	Bajo	Media	Alto
0+000	2			3		
0+005	2			3		
0+010	2				10	
0+015	5					11
0+020		7		5		
0+100	4			4		
0+105	2			2		
0+110		6		3		
0+115	4			5		
0+120	2				6	
0+200	4			3		
0+205		10				12
0+210			16			15
0+215	4			3		
0+220	5			4		
0+300	5			3		
0+305	8			2		
0+310	5				10	
0+315		10		5		
0+320		10			6	
0+400	4				10	
0+405	3				9	
0+410	4				8	
0+415	3			3		
0+420	3			5		
	0					
0+500	4			3		
0+505	3				6	
0+510	4				7	
0+515	2				10	
0+520	3			3		
0+600	4			4		
0+605	3			4		
0+610	5			4		

0+615	5			3		
0+620	3			4		
0+700	3			2		
0+705	4			3		
0+710	4			4		
0+715	4			3		
0+720	3			3		
0+800	3			3		
0+805	3			3		
0+806	4			4		
0+807	4			3		
0+808	3			4		
0+900	3			3		
0+905	2			3		
0+910	3			4		
0+915	4			3		
0+920	3			2		
1+000	4			4		
1+005	5			4		
1+010	5			3		
1+015	4			3		
1+020	4			5		
1+100	4			4		
1+105	3			4		
1+110	4			3		
1+115	4			2		
1+120	3			3		
1+200	4			3		
1+205	3			3		
1+210	4			4		
1+215	4			3		
1+220	3			2		
1+300	3			2		
1+305	3			3		
1+310	3			3		
1+315	2			2		
1+320	3			2		
1+400	3			4		
1+405	4			4		
1+410	3			3		
1+415	3			4		

1+420	2			3		
1+500	3			2		
1+505	3			3		
1+510	2			4		
1+515	3			3		
1+520	2			3		
1+600	3			3		
1+605	3			4		
1+610	2			4		
1+615	3			3		
1+620	2			3		
1+700	3			3		
1+705	3			3		
1+710	3			4		
1+715	4			3		
1+720	4			3		
1+800	3			3		
1+805	4			3		
1+810	3			2		
1+815	4			3		
1+820	3			4		
1+900	4			4		
1+905	3			4		
1+910	4			3		
1+915	3			2		
1+920	3			4		
2+000	3			5		
2+005	3			5		
2+010	4			4		
2+015	3			3		
2+020	3			4		
2+100		6		5		
2+105	4			4		
2+110	3			3		
2+115	4			4		
2+120	4			3		
2+200	5			5		
2+205	5			4		
2+210	4			3		
2+215	4			5		
2+220	3			4		

2+300	4			4		
2+305	4			4		
2+310	5			3		
2+315	4			3		
2+320	2			4		
2+400	2			2		
2+405	3			3		
2+410	3			3		
2+415	4			3		
2+420	2			3		
2+500	3			2		
2+505	2			2		
2+510	3			3		
2+515	4			3		
2+520	2			4		
2+600	5			4		
2+605	5			4		
2+610	3			5		
2+615	4			3		
2+620	3			3		
2+700	4			3		
2+705	3			4		
2+710	3			3		
2+715	4			2		
2+720	2			2		
2+800	3			4		
2+805	3			3		
2+810	4			5		
2+815	4			5		
2+820	3			3		
2+900	4			4		
2+901	4			3		
2+902	3			4		
2+903	2			2		
2+904	4			5		
3+000	4			4		
3+005	4			3		
3+010	5			5		
3+015	3			4		
3+020	5			5		

3+100	3			5		
3+105	4			4		
3+110	3				6	
3+115	4			5		
3+120	4			4		
3+200	5			3		
3+205	3			5		
3+210	4			4		
3+215	4				6	
3+220	3			4		
3+300	3			4		
3+305	3			5		
3+310	4				6	
3+315	3			4		
3+320	3			3		
3+400	5			5		
3+405	4			4		
3+410	5			5		
3+415	3			3		
3+420	4			4		
SEVERIDAD (%)	BAJA	93,45				
	MEDIA	5,41				
	ALTA	1,14				

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 27 Clasificación del ahuellamiento del tramo Guerrahuayco – San Andrés. (carril derecho)

Prog.	CARRIL DERECHO					
	Ahuellamiento (mm) (huella izquierda)			Ahuellamiento (mm) (huella derecha)		
	Severidad			Severidad		
	Bajo	Media	Alto	Bajo	Media	Alto
0+000			12	3		
0+005	4			3		
0+010		7		4		
0+015	4			3		
0+020		7		5		
0+100	7	7		5		
0+105	5			3		
0+110	3			2		
0+115	5			3		
0+120	4			5		
0+200		9			7	
0+205		9			7	
0+210			12		6	
0+215		10			6	
0+220		10			8	
0+300		6			8	
0+305	5			5		
0+310	5			3		
0+315	4			3		
0+320	7	7		3		
0+400			12	4		
0+405	5			3		
0+410		6		3		
0+415	4			3		
0+420	3			3		
0+500		6		3		
0+505		7		3		
0+510		6		2		
0+515		6		3		
0+520		7		4		
0+600	4			3		
0+605	3			3		
0+610	3			4		
0+615	4			3		
0+620	5			4		

0+700	2			3		
0+705	3			3		
0+710	2			4		
0+715	4			3		
0+720	3			2		
0+800	3			4		
0+805	3			4		
0+806	4			3		
0+807	2			4		
0+808	3			2		
0+900	3			4		
0+905	4			4		
0+910	3			3		
0+915	3			3		
0+920	4			4		
1+000	3			4		
1+005	4			4		
1+010	3			3		
1+015	4			2		
1+020	2			3		
1+100	4			4		
1+105	4			4		
1+110	3			3		
1+115	4			4		
1+120	5			3		
1+200	4			3		
1+205	3			3		
1+210	3			4		
1+215	4			4		
1+220	4			3		
1+300	4			3		
1+305	3			3		
1+310	3			4		
1+315	4			4		
1+320	4			4		
1+400	2			3		
1+405	3			2		
1+410	3			3		
1+415	3			3		
1+420	2			2		

1+500	2			2		
1+505	3			3		
1+510	2			2		
1+515	3			2		
1+520	3			3		
1+600	3			2		
1+605	3			3		
1+610	2			2		
1+615	2			4		
1+620	3			2		
1+700	3			4		
1+705	3			3		
1+710	4			3		
1+715	3			3		
1+720	4			4		
1+800	4			4		
1+805	3			3		
1+810	3			2		
1+815	4			2		
1+820	4			4		
1+900	3			3		
1+905	4			4		
1+910	3			4		
1+915	4			4		
1+920	2			2		
2+000	3			4		
2+005	3			4		
2+010	4			4		
2+015	4			3		
2+020	3			2		
2+100	3			4		
2+105	3			3		
2+110	2			3		
2+115	4			2		
2+120	4			3		
2+200	4			4		
2+205	3			2		
2+210	4			3		
2+215	3			5		
2+220	4			4		
2+300	3			5		

2+305	3			3		
2+310	4			3		
2+315	4			3		
2+320	3			4		
2+400	4			2		
2+405	3			3		
2+410	2			3		
2+415	2			2		
2+420	4			3		
2+500	3			3		
2+505	4			3		
2+510	2			4		
2+515	3			3		
2+520	3			3		
2+600	4			3		
2+605	4			4		
2+610	2			3		
2+615	4			4		
2+620	4			5		
2+700	3			3		
2+705	3			4		
2+710	3			5		
2+715	4			4		
2+720	5			4		
2+800	4			4		
2+805	2			3		
2+810	3			4		
2+815	4			3		
2+820	2			3		
2+900	5			4		
2+901	4			4		
2+902	5			2		
2+903	3			4		
2+904	4			3		
3+000	3			2		
3+005	4			3		
3+010	6			3		
3+015	5			4		
3+020	4			2		
3+100	4			4		
3+105	3			3		

3+110	5			4		
3+115	4			4		
3+120	4			2		
3+200	5			3		
3+205	3			4		
3+210	4			3		
3+215	4			2		
3+220	3			2		
3+300	4			4		
3+305	4			2		
3+310	5			3		
3+315	4			4		
3+320	3			2		
3+400	3			4		
3+405	5			3		
3+410	6			3		
3+415	4			3		
3+420	4			4		
SEVERIDAD (%)	BAJA	93,18				
	MEDIA	5,97				
	ALTA	0,85				

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 28 Clasificación del ahuellamiento del tramo Monte Centro – cruce San Pedro de Buena Vista. (carril izquierdo)

Prog.	Ahuellamiento (mm) (huella izquierda)			Ahuellamiento (mm) (huella derecha)		
	CARRIL IZQUIERDO					
	Bajo	Media	Alto	Bajo	Media	Alto
0+000	2			1		
0+005	3			2		
0+010	2			3		
0+015	2			2		
0+020	1			2		
0+100	2			3		
0+105	3			2		
0+110	3			3		
0+115	2			2		
0+120	3			2		
0+200	2			2		
0+205	1			2		
0+210	2			3		
0+215	3			2		
0+220	3			1		
0+300	3			2		
0+305	2			2		
0+310	3			1		
0+315	3			3		
0+320	1			2		
0+400	2			1		
0+405	3			2		
0+410	4			3		
0+415	3			3		
0+420	2			2		
0+500	2			2		
0+505	2			2		
0+510	3			2		
0+515	3			3		
0+520	3			2		
0+600	2			2		
0+605	2			3		
0+610	1			3		
0+615	2			2		
0+620	3			3		
0+700	2			3		

0+705	2			2		
0+710	2			2		
0+715	3			2		
0+720	3			1		
0+800	2			2		
0+805	3			2		
0+806	3			3		
0+807	2			3		
0+808	1			3		
0+900	4			3		
0+905	5			4		
0+910	5			5		
0+915	4			5		
0+920	1			4		
1+000	3			3		
1+005	4			4		
1+010	3			4		
1+015	1			3		
1+020	2			3		
1+100	2			2		
1+105	3			1		
1+110	2			3		
1+115	2			2		
1+120	1			2		
1+200	2			3		
1+205	1			2		
1+210	2			2		
1+215	3			2		
1+220	2			2		
1+300	3			2		
1+305	2			2		
1+310	1			3		
1+315	2			2		
1+320	2			2		
1+400	2			3		
1+405	3			2		
1+410	1			2		
1+415	1			2		
1+420	3			2		
1+500	3			2		
1+505	2			2		

1+510	3			2		
1+515	3			2		
1+520	3			3		
1+600	2			2		
1+605	2			1		
1+610	1			3		
1+615	2			2		
1+620	3			3		
1+700	3			3		
1+705	2			4		
1+710	1			4		
1+715	3			3		
1+720	3			3		
1+800	2			3		
1+805	3			2		
1+810	2			1		
1+815	2			3		
1+820	2			2		
1+900	3			3		
1+905	2			3		
1+910	1			2		
1+915	2			2		
1+920	2			1		
2+000	3			3		
2+005	2			2		
2+010	3			3		
2+015	2			3		
2+020	3			3		
2+100	3			2		
2+105	4			4		
2+110	3			4		
2+115	4			3		
2+120	3			3		
2+200	2			1		
2+205	2			2		
2+210	3			2		
2+215	2			2		
2+220	3			3		
2+300	2			3		
2+305	2			2		
2+310	3			3		

2+315	2			2		
2+320	2			2		
2+400	3			3		
2+405	3			3		
2+410	2			2		
2+415	3			3		
2+420	2			3		
2+500	2			2		
2+505	2			2		
2+510	3			3		
2+515	3			2		
2+520	2			2		
2+600	2			2		
2+605	2			3		
2+610	2			2		
2+615	3			2		
2+620	2			2		
2+700	3			2		
2+705	2			3		
2+710	3			3		
2+715		6		3		
2+720	2					12
SEVERIDAD (%)	BAJA	99,29				
	MEDIA	0,36				
	ALTA	0,36				

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 29 Clasificación del ahuellamiento del tramo Monte Centro – cruce San Pedro de Buena Vista. (carril derecho)

Prog.	CARRIL DERECHO					
	Ahuellamiento (mm) (huella izquierda)			Ahuellamiento (mm) (huella derecha)		
	Severidad			Severidad		
	Bajo	Media	Alto	Bajo	Media	Alto
0+000	4			3		
0+005	3			2		
0+010	3			2		
0+015	3			1		
0+020	3			2		
0+100	2			3		
0+105	3			2		
0+110	3			3		
0+115	2			3		
0+120	3			3		
0+200	3			1		
0+205	3			2		
0+210	2			2		
0+215	2			1		
0+220	3			2		
0+300	3			3		
0+305	3			3		
0+310	3			4		
0+315	4			2		
0+320	3			4		
0+400	3			2		
0+405	3			4		
0+410	3			3		
0+415	4			4		
0+420	3			3		
0+500	3			3		
0+505	3			3		
0+510	3			3		
0+515	2			4		
0+520	3			3		
0+600	1			3		
0+605	3			4		
0+610	3			2		
0+615	2			3		
0+620	3			3		

0+700	3			3		
0+705	3			3		
0+710	2			3		
0+715	3			3		
0+720	3			4		
0+800	3			4		
0+805	4			5		
0+806	3			3		
0+807	4			3		
0+808	3			2		
0+900	3			3		
0+905	2			2		
0+910	1			4		
0+915	3			3		
0+920	2			2		
1+000	2			1		
1+005	3			3		
1+010	3			4		
1+015	2			4		
1+020	3			3		
1+100	3			3		
1+105	3			4		
1+110	4			3		
1+115	5			4		
1+120	3			4		
1+200	4			2		
1+205	3			3		
1+210	3			3		
1+215	2			2		
1+220	2			1		
1+300	3			4		
1+305	3			3		
1+310	2			2		
1+315	3			1		
1+320	3			2		
1+400	3			3		
1+405	4			4		
1+410	4			5		
1+415	2			3		
1+420	4			4		

1+500	4			3		
1+505	2			4		
1+510	3			2		
1+515	4			3		
1+520	3			4		
1+600	2			1		
1+605	3			2		
1+610	2			2		
1+615	3			3		
1+620	2			3		
1+700	3			1		
1+705	2			2		
1+710	2			3		
1+715	2			1		
1+720	3			2		
1+800	3			3		
1+805	4			3		
1+810	4			4		
1+815	4			4		
1+820	3			4		
1+900	4			4		
1+905	3			3		
1+910	3			3		
1+915	3			4		
1+920	3			3		
2+000	4			4		
2+005	4			5		
2+010	5			4		
2+015	5			5		
2+020	4			5		
2+100	3			2		
2+105	2			1		
2+110	2			3		
2+115	3			3		
2+120	4			3		
2+200	3			3		
2+205	2			2		
2+210	2			2		
2+215	2			1		
2+220	3			2		
2+300	4			4		

2+305	3			4		
2+310	2			2		
2+315	3			2		
2+320	3			2		
2+400	3			3		
2+405	2			2		
2+410	2			2		
2+415	2			3		
2+420	2			2		
2+500	2			3		
2+505	2			2		
2+510	2			2		
2+515	3			3		
2+520	2			2		
2+600	3			3		
2+605	3			2		
2+610	2			3		
2+615	4			5		
2+620	3			3		
2+700	3			3		
2+705	3			4		
2+710	3			4		
2+715	4			3		
2+720	4			3		
SEVERIDAD (%)	BAJA	100,00				
	MEDIA	0,00				
	ALTA	0,00				

Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Proyección del ahuellamiento

3.6.3.1. Tramos urbanos

- Calle Sevilla

- **Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Argentina:**

$$\mathbf{Ah_{futuro} = Ah_{inicial} + K + Ah_{medido} * n}$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro (mm)

$Ah_{inicial}$ = Ahuellamiento inicial (2 mm)

$K = 0,289$

Ah_{medido} = Ahuellamiento medido en el año de estudio (mm)

$n =$ Número de años

Predicción de ahuellamiento para el año 2021:

Donde:

$K = 0,289$

$Ah_{medido} = 3,550$ mm

$n = 1$ años

$$\mathbf{Ah_{2021} = 2 + 0,289 + 3,550 * 1}$$

$$\mathbf{Ah_{2021} = 5,839 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Donde:

$Ah_{inicial} = 2$ mm

$K = 0,289$

$$Ah_{medido} = 3,55 \text{ mm}$$

$$n = 2 \text{ años}$$

$$Ah_{2022} = 2 + 0,289 + 3,550 * 2$$

$$Ah_{2022} = 9,389 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 3 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + 0,289 + 3,550 * 3$$

$$Ah_{2023} = 12,939 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 4 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + 0,289 + 3,550 * 4$$

$$Ah_{2024} = 16,489 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 5 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + 0,289 + 3,550 * 5$$

$$Ah_{2025} = 20,093 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 6 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + 0,289 + 3,550 * 6$$

$$Ah_{2026} = 23,589 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0.289$$

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 7 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2023} = 2 + 0,289 + 3,550 * 7$$

$$\mathbf{Ah}_{2027} = 27,139 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2028:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0.289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 8 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2023} = 2 + 0,289 + 3,550 * 8$$

$$\mathbf{Ah}_{2028} = 30,689 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2029:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 9 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2023} = 2 + 0,289 + 3,550 * 9$$

$$\mathbf{Ah}_{2029} = 34,239 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2030:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 10 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + 0,289 + 3,550 * 10$$

$$Ah_{2030} = 37,789 \text{ mm}$$

- **Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Colombia**

$$Ah_{futuro} = Ah_{inicial} + \frac{3,170^4 * (Ah_{medido} * n)}{100}$$

Donde:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro (mm)}$$

$$Ah_{inicial} = \text{Ahuellamiento inicial (2 mm)}$$

$$Ah_{medido} = \text{Ahuellamiento medido en el año de estudio (mm)}$$

$$n = \text{Número de años}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2021:

Donde:

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ (mm)}$$

$$n = 1 \text{ año}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,550 * 1)}{100}$$

$$Ah_{2021} = 5,585 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Donde:

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ (mm)}$$

$$n = 2 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,550 * 2)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2022} = 9,170 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Donde:

$$\mathbf{Ah_{medido} = 3,550 \text{ (mm)}}$$

$$\mathbf{n = 3 \text{ años}}$$

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,550 * 3)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2023} = 12,754 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Donde:

$$\mathbf{Ah_{medido} = 3,550 \text{ (mm)}}$$

$$\mathbf{n = 4 \text{ años}}$$

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,550 * 4)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2024} = 16,339 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Donde:

$$\mathbf{Ah_{medido} = 3,550 \text{ (mm)}}$$

$$\mathbf{n = 5 \text{ años}}$$

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,550 * 5)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2025} = 19,924 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Donde:

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ (mm)}$$

$$n = 6 \text{ años}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,550 * 6)}{100}$$

$$Ah_{2026} = 23,509 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Donde:

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ (mm)}$$

$$n = 7 \text{ años}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,550 * 7)}{100}$$

$$Ah_{2027} = 27,094 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2028:

Donde:

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ (mm)}$$

$$n = 8 \text{ años}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,550 * 8)}{100}$$

$$Ah_{2028} = 30,678 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2029:

Donde:

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ (mm)}$$

n = 9 años

$$Ah_{\text{futuro}} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,550 * 9)}{100}$$

$$Ah_{2029} = 34,263 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2030:

Donde:

$$Ah_{\text{medido}} = 3,550 \text{ (mm)}$$

n = 10 años

$$Ah_{\text{futuro}} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,550 * 10)}{100}$$

$$Ah_{2030} = 37,848 \text{ mm}$$

- **Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Perú**

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + (0,200 * 10^{k_1} * n^{k_2}) + Ah_{\text{medido}}$$

Donde:

$$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro (mm)}$$

$$Ah_{\text{inicial}} = \text{Ahuellamiento inicial (2 mm)}$$

$$k_1 = \text{Coeficientes por número de carriles por sentido (un carril por sentido 0,5)}$$

$$k_2 = \text{Coeficientes de proyección de ahuellamiento (1,640)}$$

n = Número de años

$$Ah_{\text{medido}} = \text{Ahuellamiento medido (mm)}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2021:

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + (0,200 * 10^{k_1} * n^{k_2}) + Ah_{\text{medido}}$$

Donde:

$$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 1 \text{ año}$$

$$Ah_{2021} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 1^{1,640}) + 3,550$$

$$Ah_{2021} = 6,182 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Donde:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 2 \text{ años}$$

$$Ah_{2022} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 2^{1,640}) + 3,550$$

$$Ah_{2022} = 7,521 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Donde:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 3 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 3^{1,640}) + 3,550$$

$$Ah_{2023} = 9,383 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 3,550 mm

n = 4 años

$$Ah_{2024} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 4^{1,640}) + 3,550$$

$$Ah_{2024} = 11,693 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 3,550 mm

n = 5 años

$$Ah_{2025} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 5^{1,640}) + 3,550$$

$$Ah_{2025} = 14,408 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 3,550 mm

n = 6 años

$$\mathbf{Ah}_{2026} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 6^{1,640}) + 3,550$$

$$\mathbf{Ah}_{2026} = 17,495 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 3,550 mm

n = 7 años

$$\mathbf{Ah}_{2027} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 7^{1,640}) + 3,550$$

$$\mathbf{Ah}_{2027} = 20,931 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2028:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 3,550 mm

n = 8 años

$$\mathbf{Ah}_{2028} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 8^{1,640}) + 3,550$$

$$\mathbf{Ah}_{2028} = 24,697 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2029:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 9 \text{ años}$$

$$Ah_{2029} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 9^{1,640}) + 3,550$$

$$Ah_{2029} = 28,777 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2030:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 3,550 \text{ mm}$$

$$n = 10 \text{ años}$$

$$Ah_{2030} = 2 + 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 10^{1,640}) + 3,550$$

$$Ah_{2030} = 33,158 \text{ mm}$$

- Ramon Rojas

- **Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Argentina:**

$$Ah_{futuro} = Ah_{inicial} + K + Ah_{medido} * n$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro (mm)

$Ah_{inicial}$ = Ahuellamiento inicial (2 mm)

$$K = 0,289$$

Ah_{medido} = Ahuellamiento medido en el año de estudio (mm)

n = Número de años

Predicción de ahuellamiento para el año 2021:

Donde:

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 1 \text{ año}$$

$$Ah_{2021} = 2 + 0,289 + 2,50 * 1$$

$$Ah_{2021} = 4,789 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 2 \text{ años}$$

$$Ah_{2022} = 2 + 0,289 + 2,500 * 2$$

$$Ah_{2022} = 7,289 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 3 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2023} = 2 + 0,289 + 2,500 * 3$$

$$\mathbf{Ah}_{2023} = 9,789 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 4 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2023} = 2 + 0,289 + 2,500 * 4$$

$$\mathbf{Ah}_{2024} = 12,289 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 5 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2023} = 2 + 0,289 + 2,500 * 5$$

$$\mathbf{Ah}_{2025} = 14,789 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 6 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + 0,289 + 2,500 * 6$$

$$Ah_{2026} = 17,289 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0.289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 7 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + 0,289 + 2,500 * 7$$

$$Ah_{2027} = 19,789 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2028:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0.289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 8 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + 0,289 + 2,500 * 8$$

$$Ah_{2028} = 22,289 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2029:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 9 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + 0,289 + 2,500 * 9$$

$$Ah_{2029} = 24,789 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2030:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 10 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + 0,289 + 2,500 * 10$$

$$Ah_{2030} = 27,289 \text{ mm}$$

- **Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Colombia**

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + \frac{3.17^4 * (Ah_{\text{medido}} * n)}{100}$$

Donde:

$$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro (mm)}$$

$$Ah_{\text{inicial}} = \text{Ahuellamiento inicial (2 mm)}$$

Ah_{medido} = Ahuellamiento medido en el año de estudio (mm)

n = Número de años

Predicción de ahuellamiento para el año 2021:

Donde:

Ah_{medido} = 2,500 (mm)

n = 1 año

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,500 * 1)}{100}$$

$$Ah_{2021} = 4,525 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Donde:

Ah_{medido} = 2,500 (mm)

n = 2 años

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,500 * 2)}{100}$$

$$Ah_{2022} = 7,049 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Donde:

Ah_{medido} = 2,500 (mm)

n = 3 años

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,500 * 3)}{100}$$

$$Ah_{2023} = 9,574 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Donde:

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ (mm)}$$

$$n = 4 \text{ años}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,500 * 4)}{100}$$

$$Ah_{2024} = 12,098 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Donde:

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ (mm)}$$

$$n = 5 \text{ años}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,500 * 5)}{100}$$

$$Ah_{2025} = 14,623 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Donde:

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ (mm)}$$

$$n = 6 \text{ años}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,500 * 6)}{100}$$

$$Ah_{2026} = 17,147 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Donde:

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ (mm)}$$

$$n = 7 \text{ años}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,500 * 7)}{100}$$

$$Ah_{2027} = 19,672 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2028:

Donde:

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ (mm)}$$

$$n = 8 \text{ años}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,500 * 8)}{100}$$

$$Ah_{2028} = 22,196 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2029:

Donde:

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ (mm)}$$

$$n = 9 \text{ años}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,500 * 9)}{100}$$

$$Ah_{2029} = 24,721 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2030:

Donde:

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ (mm)}$$

$$n = 10 \text{ años}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,500 * 10)}{100}$$

$$\mathbf{Ah}_{2030} = 27,245 \text{ mm}$$

- **Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Perú**

$$\mathbf{Ah}_{\text{futuro}} = \mathbf{Ah}_{\text{inicial}} + (0,200 * 10^{k_1} * n^{k_2}) + \mathbf{Ah}_{\text{medido}}$$

Donde:

$\mathbf{Ah}_{\text{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro (mm)

$\mathbf{Ah}_{\text{inicial}}$ = Ahuellamiento inicial (2 mm)

k_1 = Coeficientes por número de carriles por sentido (un carril por sentido 0,5)

k_2 = Coeficientes de proyección de ahuellamiento (1,640)

n = Número de años

$\mathbf{Ah}_{\text{medido}}$ = Ahuellamiento medido (mm)

predicción de ahuellamiento para el año 2021:

$$\mathbf{Ah}_{\text{futuro}} = \mathbf{Ah}_{\text{inicial}} + (0,200 * 10^{k_1} * n^{k_2}) + \mathbf{Ah}_{\text{medido}}$$

Donde:

$\mathbf{Ah}_{\text{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah}_{\text{inicial}}$ = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

$\mathbf{Ah}_{\text{medido}}$ = 2,500 mm

n = 1 año

$$\mathbf{Ah}_{2021} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 1^{1,640}) + 2,500$$

$$\mathbf{Ah}_{2021} = 5,132 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Donde:

$\mathbf{Ah}_{\text{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah}_{\text{inicial}}$ = 2 mm

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 2 \text{ años}$$

$$Ah_{2022} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 2^{1,640}) + 2,500$$

$$Ah_{2022} = 6,471 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Donde:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 3 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 3^{1,640}) + 2,500$$

$$Ah_{2023} = 8,333 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Donde:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 4 \text{ años}$$

$$Ah_{2024} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 4^{1,640}) + 2,500$$

$$Ah_{2024} = 10,643 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Donde:

$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$

$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$

$k_1 = 0,500$

$k_2 = 1,640$

$Ah_{\text{medido}} = 2,500 \text{ mm}$

$n = 5 \text{ años}$

$$Ah_{2025} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 5^{1,640}) + 2,500$$

$$Ah_{2025} = 13,358 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Donde:

$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$

$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$

$k_1 = 0,500$

$k_2 = 1,640$

$Ah_{\text{medido}} = 2,500 \text{ mm}$

$n = 6 \text{ años}$

$$Ah_{2026} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 6^{1,640}) + 2,500$$

$$Ah_{2026} = 16,445 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Donde:

$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$

$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$

$k_1 = 0,500$

$k_2 = 1,640$

$Ah_{\text{medido}} = 2,500 \text{ mm}$

n = 7 años

$$\mathbf{Ah}_{2027} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 7^{1,640}) + 2,500$$

$$\mathbf{Ah}_{2027} = 19,881 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2028:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 2,500 mm

n = 8 años

$$\mathbf{Ah}_{2028} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 8^{1,640}) + 2,500$$

$$\mathbf{Ah}_{2028} = 23,647 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2029:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 2,500 mm

n = 9 años

$$\mathbf{Ah}_{2029} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 9^{1,640}) + 2,500$$

$$\mathbf{Ah}_{2029} = 27,727 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2030:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 2,500 \text{ mm}$$

$$n = 10 \text{ años}$$

$$Ah_{2030} = 2 + 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 10^{1,640}) + 2,500$$

$$Ah_{2030} = 32,108 \text{ mm}$$

- Calle María Claret

- Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Argentina:

$$Ah_{futuro} = Ah_{inicial} + K + Ah_{medido} * n$$

Donde:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro (mm)}$$

$$Ah_{inicial} = \text{Ahuellamiento inicial (2 mm)}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = \text{Ahuellamiento medido (mm)}$$

$$n = \text{Número de años}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2021:

$$Ah_{futuro} = Ah_{inicial} + K + Ah_{medido} * n$$

Donde:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 4,30 \text{ mm}$$

$$n = 1 \text{ año}$$

$$\mathbf{Ah}_{2021} = 2 + 0,289 + 4,30 * 1$$

$$\mathbf{Ah}_{2021} = 6,589 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 4,30 \text{ mm}$$

$$n = 2 \text{ año}$$

$$\mathbf{Ah}_{2022} = 2 + 0,289 + 4,30 * 2$$

$$\mathbf{Ah}_{2022} = 10,889 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 4,30 \text{ mm}$$

$$n = 3 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2023} = 2 + 0,289 + 4,30 * 3$$

$$\mathbf{Ah}_{2023} = 15,189 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 4,30 \text{ mm}$$

$$n = 4 \text{ años}$$

$$Ah_{2024} = 2 + 0,289 + 4,30 * 4$$

$$Ah_{2024} = 19,489 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 4,30 \text{ mm}$$

$$n = 5 \text{ años}$$

$$Ah_{2025} = 2 + 0,289 + 4,30 * 5$$

$$Ah_{2025} = 23,789 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 4,30 \text{ mm}$$

$$n = 6 \text{ años}$$

$$Ah_{2026} = 2 + 0,289 + 4,30 * 6$$

$$Ah_{2026} = 28,089 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 4,30 \text{ mm}$$

$$n = 7 \text{ años}$$

$$Ah_{2027} = 2 + 0,289 + 4,30 * 7$$

$$Ah_{2027} = 32,389 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2028:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 4,30 \text{ mm}$$

$$n = 8 \text{ años}$$

$$Ah_{2028} = 2 + 0,289 + 4,30 * 8$$

$$Ah_{2028} = 36,689 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2029:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 4,30 \text{ mm}$$

$$n = 9 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2029} = 2 + 0,289 + 4,30 * 9$$

$$\mathbf{Ah}_{2029} = 40,989 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2030:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 4,30 \text{ mm}$$

$$n = 10 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2030} = 2 + 0,289 + 4,30 * 10$$

$$\mathbf{Ah}_{2030} = 45,289 \text{ mm}$$

- **Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Colombia**

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + \frac{3,170^4 * (Ah_{\text{medido}} * n)}{100}$$

Donde:

$$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro (mm)}$$

$$Ah_{\text{inicial}} = \text{Ahuellamiento inicial (2 mm)}$$

$$Ah_{\text{medido}} = \text{Ahuellamiento medido (mm)}$$

$$n = \text{Número de años}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2021:

$$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$Ah_{\text{medido}} = 4,300 \text{ mm}$$

$$n = 1 \text{ año}$$

$$Ah_{\text{futuro}} = 2 + \frac{3,170^4 * (4,300 * 1)}{100}$$

$$Ah_{2021} = 6,342 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

Ah_{medido} = 4,300 mm

n = 2 años

$$Ah_{\text{futuro}} = 2 + \frac{3,170^4 * (4,300 * 2)}{100}$$

$$Ah_{2022} = 10,684 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

Ah_{medido} = 4,300 mm

n = 3 años

$$Ah_{\text{futuro}} = 2 + \frac{3,170^4 * (4,300 * 3)}{100}$$

$$Ah_{2023} = 15,026 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

Ah_{medido} = 4,300 mm

n = 4 años

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (4,300 * 4)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2024} = 19,369 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2025:

$\mathbf{Ah_{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah_{inicial}}$ = 2 mm

$\mathbf{Ah_{medido}}$ = 4,300 mm

n = 5 años

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (4,300 * 5)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2025} = 23,711 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2026:

$\mathbf{Ah_{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah_{inicial}}$ = 2 mm

$\mathbf{Ah_{medido}}$ = 4,300 mm

n = 6 años

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (4,300 * 6)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2026} = 28,053 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2027:

$\mathbf{Ah_{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah_{inicial}}$ = 2 mm

$\mathbf{Ah_{medido}}$ = 4,300 mm

n = 7 años

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (4,300 * 7)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2027} = 32,395 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2028:

$\mathbf{Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}}$

$\mathbf{Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}}$

$\mathbf{Ah_{medido} = 4,300 \text{ mm}}$

$\mathbf{n = 8 \text{ años}}$

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (4,300 * 8)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2028} = 36,737 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2029:

$\mathbf{Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}}$

$\mathbf{Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}}$

$\mathbf{Ah_{medido} = 4,300 \text{ mm}}$

$\mathbf{n = 9 \text{ años}}$

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (4,300 * 9)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2029} = 41,079 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2030:

$\mathbf{Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}}$

$\mathbf{Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}}$

$\mathbf{Ah_{medido} = 4,300 \text{ mm}}$

$\mathbf{n = 10 \text{ años}}$

$$Ah_{\text{futuro}} = 2 + \frac{3,170^4 * (4,300 * 10)}{100}$$

$$Ah_{2030} = 45,422 \text{ mm}$$

- **Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Perú**

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + (0,200 * 10^{k_1} * n^{k_2}) + Ah_{\text{medido}}$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro (mm)

Ah_{inicial} = Ahuellamiento inicial (2 mm)

k_1 = Coeficientes por número de carriles por sentido (un carril por sentido 0,5)

k_2 = Coeficientes de proyección de ahuellamiento (1,640)

n = Número de años

Ah_{medido} = Ahuellamiento medido (mm)

predicción de ahuellamiento para el año 2021:

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + (0,200 * 10^{k_1} * n^{k_2}) + Ah_{\text{medido}}$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 4,300 mm

n = 1 año

$$Ah_{2021} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 1^{1,640}) + 4,300$$

$$Ah_{2021} = 6,932 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{\text{medido}} = 4,300 \text{ mm}$$

$$n = 2 \text{ años}$$

$$Ah_{2022} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 2^{1,640}) + 4,300$$

$$Ah_{2022} = 8,271 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Donde:

$$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{\text{medido}} = 4,300 \text{ mm}$$

$$n = 3 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 3^{1,640}) + 4,300$$

$$Ah_{2023} = 10,133 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Donde:

$$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{\text{medido}} = 4,300 \text{ mm}$$

$$n = 4 \text{ años}$$

$$Ah_{2024} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 4^{1,640}) + 4,300$$

$$Ah_{2024} = 12,443 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Donde:

$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$

$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$

$k_1 = 0,500$

$k_2 = 1,640$

$Ah_{\text{medido}} = 4,300 \text{ mm}$

$n = 5 \text{ años}$

$$Ah_{2025} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 5^{1,640}) + 4,300$$

$$Ah_{2025} = 15,158 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Donde:

$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$

$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$

$k_1 = 0,500$

$k_2 = 1,640$

$Ah_{\text{medido}} = 4,300 \text{ mm}$

$n = 6 \text{ años}$

$$Ah_{2026} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 6^{1,640}) + 4,300$$

$$Ah_{2026} = 18,245 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Donde:

$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$

$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$

$k_1 = 0,500$

$k_2 = 1,640$

$Ah_{\text{medido}} = 4,300 \text{ mm}$

n = 7 años

$$\mathbf{Ah}_{2027} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 7^{1,640}) + 4,300$$

$$\mathbf{Ah}_{2027} = 21,681 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2028:

Donde:

$\mathbf{Ah}_{\text{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah}_{\text{inicial}}$ = 2 mm

\mathbf{k}_1 = 0,500

\mathbf{k}_2 = 1,640

$\mathbf{Ah}_{\text{medido}}$ = 4,300 mm

n = 8 años

$$\mathbf{Ah}_{2028} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 8^{1,640}) + 4,300$$

$$\mathbf{Ah}_{2028} = 25,447 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2029:

Donde:

$\mathbf{Ah}_{\text{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah}_{\text{inicial}}$ = 2 mm

\mathbf{k}_1 = 0,500

\mathbf{k}_2 = 1,640

$\mathbf{Ah}_{\text{medido}}$ = 4,300 mm

n = 9 años

$$\mathbf{Ah}_{2029} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 9^{1,640}) + 4,300$$

$$\mathbf{Ah}_{2029} = 29,527 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2030:

Donde:

$\mathbf{Ah}_{\text{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 4,300 \text{ mm}$$

$$n = 10 \text{ años}$$

$$Ah_{2030} = 2 + 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 10^{1,640}) + 4,300$$

$$Ah_{2030} = 33,908 \text{ mm}$$

3.6.3.2. Tramos rurales

- Guerrahuayco- San Andrés

- Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Argentina:

$$Ah_{futuro} = Ah_{inicial} + K + Ah_{medido} * n$$

Donde:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro (mm)}$$

$$Ah_{inicial} = \text{Ahuellamiento inicial (2 mm)}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = \text{Ahuellamiento medido (mm)}$$

$$n = \text{Número de años}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2021:

$$Ah_{futuro} = Ah_{inicial} + K + Ah_{medido} * n$$

Donde:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 3,77 \text{ mm}$$

$$n = 1 \text{ año}$$

$$Ah_{2021} = 2 + 0,289 + 3,77 * 1$$

$$Ah_{2021} = 6,059 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 3,77 \text{ mm}$$

$$n = 2 \text{ año}$$

$$Ah_{2022} = 2 + 0,289 + 3,77 * 2$$

$$Ah_{2022} = 9,829 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 3,77 \text{ mm}$$

$$n = 3 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + 0,289 + 3,77 * 3$$

$$Ah_{2023} = 13,599 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 3,77 \text{ mm}$$

$$n = 4 \text{ años}$$

$$Ah_{2024} = 2 + 0,289 + 3,77 * 4$$

$$Ah_{2024} = 17,369 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 3,77 \text{ mm}$$

$$n = 5 \text{ años}$$

$$Ah_{2025} = 2 + 0,289 + 3,77 * 5$$

$$Ah_{2025} = 21,139 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 3,77 \text{ mm}$$

$$n = 6 \text{ años}$$

$$Ah_{2026} = 2 + 0,289 + 3,77 * 6$$

$$Ah_{2026} = 24,909 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 3,77 \text{ mm}$$

$$n = 7 \text{ años}$$

$$Ah_{2027} = 2 + 0,289 + 3,77 * 7$$

$$Ah_{2027} = 28,679 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2028:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 3,77 \text{ mm}$$

$$n = 8 \text{ años}$$

$$Ah_{2028} = 2 + 0,289 + 3,77 * 8$$

$$Ah_{2028} = 32,449 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2029:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 3,77 \text{ mm}$$

$$n = 9 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2029} = 2 + 0,289 + 3,77 * 9$$

$$\mathbf{Ah}_{2029} = 36,219 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2030:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 3,77 \text{ mm}$$

$$n = 10 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2030} = 2 + 0,289 + 3,77 * 10$$

$$\mathbf{Ah}_{2030} = 39,989 \text{ mm}$$

- **Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Colombia**

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + \frac{3,170^4 * (Ah_{\text{medido}} * n)}{100}$$

Donde:

$$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro (mm)}$$

$$Ah_{\text{inicial}} = \text{Ahuellamiento inicial (2 mm)}$$

$$Ah_{\text{medido}} = \text{Ahuellamiento medido (mm)}$$

$$n = \text{Número de años}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2021:

$$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$Ah_{\text{medido}} = 3,770 \text{ mm}$$

$$n = 1 \text{ año}$$

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,770 * 1)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2021} = 5,807 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2022:

$\mathbf{Ah_{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah_{inicial}}$ = 2 mm

$\mathbf{Ah_{medido}}$ = 3,770

n = 2 años

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,770 * 2)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2022} = 9,614 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2023:

$\mathbf{Ah_{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah_{inicial}}$ = 2 mm

$\mathbf{Ah_{medido}}$ = 3,770 mm

n = 3 años

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,770 * 3)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2023} = 13,421 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2024:

$\mathbf{Ah_{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah_{inicial}}$ = 2 mm

$\mathbf{Ah_{medido}}$ = 3,770 mm

n = 4 años

$$Ah_{\text{futuro}} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,770 * 4)}{100}$$

$$Ah_{2024} = 17,228 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

Ah_{medido} = 3,770 mm

n = 5 años

$$Ah_{\text{futuro}} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,770 * 5)}{100}$$

$$Ah_{2025} = 21,035 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

Ah_{medido} = 3,770 mm

n = 6 años

$$Ah_{\text{futuro}} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,770 * 6)}{100}$$

$$Ah_{2026} = 24,842 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

Ah_{medido} = 3,770 mm

n = 7 años

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,770 * 7)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2027} = 28,649 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2028:

$\mathbf{Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}}$

$\mathbf{Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}}$

$\mathbf{Ah_{medido} = 3,770 \text{ mm}}$

$\mathbf{n = 8 \text{ años}}$

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,770 * 8)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2028} = 32,456 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2029:

$\mathbf{Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}}$

$\mathbf{Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}}$

$\mathbf{Ah_{medido} = 3,770 \text{ mm}}$

$\mathbf{n = 9 \text{ años}}$

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,770 * 9)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2029} = 36,263 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2030:

$\mathbf{Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}}$

$\mathbf{Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}}$

$\mathbf{Ah_{medido} = 3,770 \text{ mm}}$

$\mathbf{n = 10 \text{ años}}$

$$Ah_{\text{futuro}} = 2 + \frac{3,170^4 * (3,770 * 10)}{100}$$

$$Ah_{2030} = 40,070 \text{ mm}$$

- **Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Perú**

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + (0,200 * 10^{k_1} * n^{k_2}) + Ah_{\text{medido}}$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro (mm)

Ah_{inicial} = Ahuellamiento inicial (2 mm)

k_1 = Coeficientes por número de carriles por sentido (un carril por sentido 0,5)

k_2 = Coeficientes de proyección de ahuellamiento (1,640)

n = Número de años

Ah_{medido} = Ahuellamiento medido (mm)

predicción de ahuellamiento para el año 2021:

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + (0,200 * 10^{k_1} * n^{k_2}) + Ah_{\text{medido}}$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 3,770 mm

n = 1 año

$$Ah_{2021} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 1^{1,640}) + 3,770$$

$$Ah_{2021} = 6,402 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Donde:

$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$

$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$

$k_1 = 0,500$

$k_2 = 1,640$

$Ah_{\text{medido}} = 3,770 \text{ mm}$

$n = 2 \text{ años}$

$$Ah_{2022} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 2^{1,640}) + 3,770$$

$$Ah_{2022} = 7,741 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Donde:

$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$

$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$

$k_1 = 0,500$

$k_2 = 1,640$

$Ah_{\text{medido}} = 3,770 \text{ mm}$

$n = 3 \text{ años}$

$$Ah_{2023} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 3^{1,640}) + 3,770$$

$$Ah_{2023} = 9,603 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Donde:

$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$

$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$

$k_1 = 0,500$

$k_2 = 1,640$

$Ah_{\text{medido}} = 3,770 \text{ mm}$

$n = 4 \text{ años}$

$$\mathbf{Ah_{2024} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 4^{1,640}) + 3,770}$$

$$\mathbf{Ah_{2024} = 11,913 \text{ mm}}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 3,770 mm

n = 5 años

$$\mathbf{Ah_{2025} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 5^{1,640}) + 3,770}$$

$$\mathbf{Ah_{2025} = 14,628 \text{ mm}}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 3,770 mm

n = 6 años

$$\mathbf{Ah_{2026} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 6^{1,640}) + 3,770}$$

$$\mathbf{Ah_{2026} = 17,715 \text{ mm}}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 3,770 \text{ mm}$$

$$n = 7 \text{ años}$$

$$Ah_{2027} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 7^{1,640}) + 3,770$$

$$Ah_{2027} = 21,151 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2028:

Donde:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 3,770 \text{ mm}$$

$$n = 8 \text{ años}$$

$$Ah_{2028} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 8^{1,640}) + 3,770$$

$$Ah_{2028} = 24,917 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2029:

Donde:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 3,770 \text{ mm}$$

$$n = 9 \text{ años}$$

$$Ah_{2029} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 9^{1,640}) + 3,770$$

$$Ah_{2029} = 28,997 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2030:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 3,770 mm

n = 10 años

$$Ah_{2030} = 2 + 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 10^{1,640}) + 3,770$$

$$Ah_{2030} = 33,378 \text{ mm}$$

- Monte centro - Cruce San Pedro de Buena Vista

- **Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Argentina:**

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + K + Ah_{\text{medido}} * n$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro (mm)

Ah_{inicial} = Ahuellamiento inicial (2 mm)

K = 0,289

Ah_{medido} = Ahuellamiento medido (mm)

n = Número de años

Predicción de ahuellamiento para el año 2021:

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + K + Ah_{\text{medido}} * n$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 1 \text{ año}$$

$$Ah_{2021} = 2 + 0,289 + 2,820 * 1$$

$$Ah_{2021} = 5,109 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 2 \text{ año}$$

$$Ah_{2022} = 2 + 0,289 + 2,820 * 2$$

$$Ah_{2022} = 7,929 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 3 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + 0,289 + 2,820 * 3$$

$$Ah_{2023} = 10,749 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 4 \text{ años}$$

$$Ah_{2024} = 2 + 0,289 + 2,820 * 4$$

$$Ah_{2024} = 13,569 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 5 \text{ años}$$

$$Ah_{2025} = 2 + 0,289 + 2,820 * 5$$

$$Ah_{2025} = 16,389 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 6 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2026} = 2 + 0,289 + 2,820 * 6$$

$$\mathbf{Ah}_{2026} = 19,209 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 7 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2027} = 2 + 0,289 + 2,820 * 7$$

$$\mathbf{Ah}_{2027} = 22,029 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2028:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{\text{medido}} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 8 \text{ años}$$

$$\mathbf{Ah}_{2028} = 2 + 0,289 + 2,820 * 8$$

$$\mathbf{Ah}_{2028} = 24,849 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2029:

Donde:

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 9 \text{ años}$$

$$Ah_{2029} = 2 + 0,289 + 2,820 * 9$$

$$Ah_{2029} = 27,669 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2030:

Donde:

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$K = 0,289$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 10 \text{ años}$$

$$Ah_{2030} = 2 + 0,289 + 2,820 * 10$$

$$Ah_{2030} = 30,489 \text{ mm}$$

- Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Colombia

$$Ah_{futuro} = Ah_{inicial} + \frac{3,170^4 * (Ah_{medido} * n)}{100}$$

Donde:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro (mm)}$$

$$Ah_{inicial} = \text{Ahuellamiento inicial (2 mm)}$$

$$Ah_{medido} = \text{Ahuellamiento medido (mm)}$$

$$n = \text{Número de años}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2021:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 1 \text{ año}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,820 * 1)}{100}$$

$$Ah_{2021} = 4,848 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2022:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 2 \text{ años}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,820 * 2)}{100}$$

$$Ah_{2022} = 7,695 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2023:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 3 \text{ años}$$

$$Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,820 * 3)}{100}$$

$$Ah_{2023} = 10,543 \text{ mm}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2024:

$$Ah_{futuro} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{inicial} = 2 \text{ mm}$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

n = 4 años

$$\mathbf{Ah_{futuro}} = 2 + \frac{\mathbf{3,170^4 * (2,820 * 4)}}{\mathbf{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2024}} = \mathbf{13,391 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2025:

$\mathbf{Ah_{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah_{inicial}}$ = 2 mm

$\mathbf{Ah_{medido}}$ = 2,820 mm

n = 5 años

$$\mathbf{Ah_{futuro}} = 2 + \frac{\mathbf{3,170^4 * (2,820 * 5)}}{\mathbf{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2025}} = \mathbf{16,238 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2026:

$\mathbf{Ah_{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah_{inicial}}$ = 2 mm

$\mathbf{Ah_{medido}}$ = 2,820 mm

n = 6 años

$$\mathbf{Ah_{futuro}} = 2 + \frac{\mathbf{3,170^4 * (2,820 * 6)}}{\mathbf{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2026}} = \mathbf{19,086 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2027:

$\mathbf{Ah_{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah_{inicial}}$ = 2 mm

$\mathbf{Ah_{medido}}$ = 2,820 mm

n = 7 años

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,820 * 7)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2027} = 21,934 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2028:

$\mathbf{Ah_{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah_{inicial}}$ = 2 mm

$\mathbf{Ah_{medido}}$ = 2,820 mm

n = 8 años

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,820 * 8)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2028} = 24,781 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2029:

$\mathbf{Ah_{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah_{inicial}}$ = 2 mm

$\mathbf{Ah_{medido}}$ = 2,820 mm

n = 9 años

$$\mathbf{Ah_{futuro} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,820 * 9)}{100}}$$

$$\mathbf{Ah_{2029} = 27,629 \text{ mm}}$$

Predicción de ahuellamiento para el año 2030:

$\mathbf{Ah_{futuro}}$ = Ahuellamiento futuro

$\mathbf{Ah_{inicial}}$ = 2 mm

$\mathbf{Ah_{medido}}$ = 2,820 mm

n = 10 años

$$Ah_{\text{futuro}} = 2 + \frac{3,170^4 * (2,820 * 10)}{100}$$

$$Ah_{2030} = 30,476 \text{ mm}$$

- Predicción de ahuellamiento usando la ecuación desarrollada en Perú

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + (0,200 * 10^{k_1} * n^{k_2}) + Ah_{\text{medido}}$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro (mm)

Ah_{inicial} = Ahuellamiento inicial (2 mm)

k_1 = Coeficientes por número de carriles por sentido (un carril por sentido 0,5)

k_2 = Coeficientes de proyección de ahuellamiento (1,640)

n = Número de años

Ah_{medido} = Ahuellamiento medido (mm)

predicción de ahuellamiento para el año 2021:

$$Ah_{\text{futuro}} = Ah_{\text{inicial}} + (0,200 * 10^{k_1} * n^{k_2}) + Ah_{\text{medido}}$$

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 2,820 mm

n = 1 año

$$Ah_{2021} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 1^{1,640}) + 2,820$$

$$Ah_{2021} = 5,452 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2022:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{\text{medido}} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 2 \text{ años}$$

$$Ah_{2022} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 2^{1,640}) + 2,820$$

$$Ah_{2022} = 6,791 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2023:

Donde:

$$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{\text{medido}} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 3 \text{ años}$$

$$Ah_{2023} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 3^{1,640}) + 2,820$$

$$Ah_{2023} = 8,653 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2024:

Donde:

$$Ah_{\text{futuro}} = \text{Ahuellamiento futuro}$$

$$Ah_{\text{inicial}} = 2 \text{ mm}$$

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{\text{medido}} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 4 \text{ años}$$

$$Ah_{2024} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 4^{1,640}) + 2,820$$

$$Ah_{2024} = 10,963 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2025:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 2,820 mm

n = 5 años

$$Ah_{2025} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 5^{1,640}) + 2,820$$

$$Ah_{2025} = 13,678 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2026:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 2,820 mm

n = 6 años

$$Ah_{2026} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 6^{1,640}) + 2,820$$

$$Ah_{2026} = 16,765 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2027:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 2,820 mm

$n = 7$ años

$$\mathbf{Ah}_{2027} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 7^{1,640}) + 2,820$$

$$\mathbf{Ah}_{2027} = 20,201 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2028:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 2,820 mm

$n = 8$ años

$$\mathbf{Ah}_{2028} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 8^{1,640}) + 2,820$$

$$\mathbf{Ah}_{2028} = 23,967 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2029:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

k_1 = 0,500

k_2 = 1,640

Ah_{medido} = 2,820 mm

$n = 9$ años

$$\mathbf{Ah}_{2029} = 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 9^{1,640}) + 2,820$$

$$\mathbf{Ah}_{2029} = 28,047 \text{ mm}$$

predicción de ahuellamiento para el año 2030:

Donde:

Ah_{futuro} = Ahuellamiento futuro

Ah_{inicial} = 2 mm

$$k_1 = 0,500$$

$$k_2 = 1,640$$

$$Ah_{medido} = 2,820 \text{ mm}$$

$$n = 10 \text{ años}$$

$$Ah_{2030} = 2 + 2 + (0,200 * 10^{0,500} * 10^{1,640}) + 2,820$$

$$Ah_{2030} = 32,428 \text{ mm}$$

En el ANEXO 4 y 5 se puede encontrar las tablas de resumen y graficas de la predicción de ahuellamiento usando las dos ecuaciones como también las gráficas comparativas de los modelos empleados.

3.6.4. Comparaciones del uso de modelos de predicción de ahuellamiento

Para el desarrollo de un modelo de predicción de profundidad de ahuellamiento adecuado, un paso muy importante es utilizar un modelo matemático adecuado al sistema de pavimento, considerando una caracterización de las propiedades reales de los materiales con los cuales está constituido el pavimento.

Los incrementos de deterioro predichos muestran la incidencia de las variables explicativas en una forma muy similar a la que presentan los modelos absolutos. Pero no debe esperarse que los modelos incrementales directamente obtenidos sean capaces de modelar el comportamiento de los pavimentos mejor que los modelos absolutos, debido principalmente a las limitaciones en disponibilidad y calidad de los datos, que presentan considerable influencia sobre los resultados obtenidos.

Los modelos incrementales son útiles especialmente cuando se aplican al análisis de pavimentos en servicio donde la información sobre el pasado del pavimento y de su tránsito es escasa o nula. Mejores modelos podrán ser desarrollados en la medida que se disponga de secuencias más prolongadas de mediciones del deterioro para cada pavimento.

Ventajas:

- Una de las ventajas de utilizar ecuaciones de predicción es que se pueden programar en la computadora de tal manera que sea esta la que haga el trabajo más exacto (los cálculos necesarios para obtener la proyección).
- Los modelos incrementales son útiles y de gran ventaja especialmente cuando se aplican al análisis de pavimentos en servicio donde la información sobre el pasado del pavimento y de su tránsito es escasa o nula. Mejores modelos podrán ser desarrollados en la medida que se disponga de secuencias más prolongadas de mediciones del deterioro para cada pavimento.
- El modelo de predicción de Argentina es rápido de modelar y es particularmente útil cuando la relación a modelar no es extremadamente compleja y no requiere mucha información de las variables.
- El modelo de predicción usado en Argentina es el más práctico para usar por el menor uso de coeficientes en su cálculo como ser el coeficiente (K), que es el coeficiente de proyección de ahuellamiento debido al tipo de carga.
- La precisión en la estimación de la ecuación predictiva de Colombia depende de diversas variables tales como; (T = Coeficiente de proyección de ahuellamiento debido a la composición de la mezcla y de las condiciones experimentales (esfuerzos, frecuencia, temperatura).

Desventajas:

- El modelo de predicción usado en Perú es más complejo en su cálculo por que usa más coeficientes como ser (M), que es una constante que está en función del material y del tiempo transcurrido, (k_1), que es el coeficiente por número de carriles por sentido (un carril por sentido y el coeficiente (k_2), que es el coeficiente de proyección de ahuellamiento debido a la propiedad del material (temperatura, esfuerzo y contenido humedad).

- En el uso del modelo predicción de Colombia y Perú, se puede sufrir en el cálculo de la proyección por el uso de valores atípicos.

3.7. Análisis de resultados

Luego de calcular y tabular todos los datos del ahuellamiento en los tramos seleccionados, se realizará un análisis a continuación:

- A continuación, se muestra un resumen del promedio de los ahuellamientos de los tramos en estudio, donde se verifica que los tramos urbanos y los tramos rurales tienen un ahuellamiento medido(actual) de severidad baja que esta entre 0 – 5 mm.

Tabla N° 30 Resumen de ahuellamientos en tramos urbanos

Tramo	Ahuellamiento promedio (mm)
calle Sevilla	3,550
calle Ramón rojas	2,500
calle María Claret	4,300

Fuente: Elaboración propia

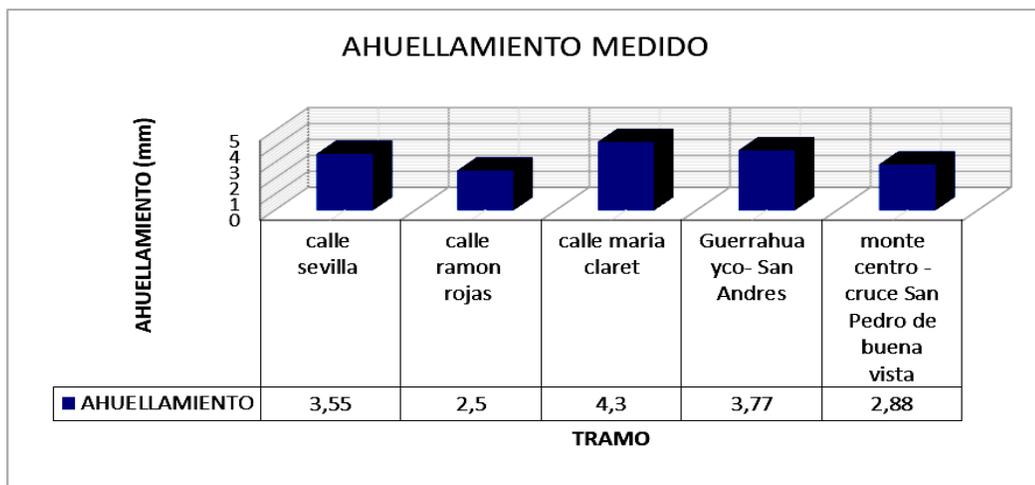
Tabla N° 31 Resumen de ahuellamientos en tramos rurales

Tramo	Ahuellamiento promedio (mm)
Guerrahuayco- San Andrés	3,770
Monte Centro - cruce San Pedro de Buena Vista	2,820

Fuente: Elaboración propia

- En la figura N° 44 se puede observar que el tramo que comprende un mayor ahuellamiento es la calle María Claret.

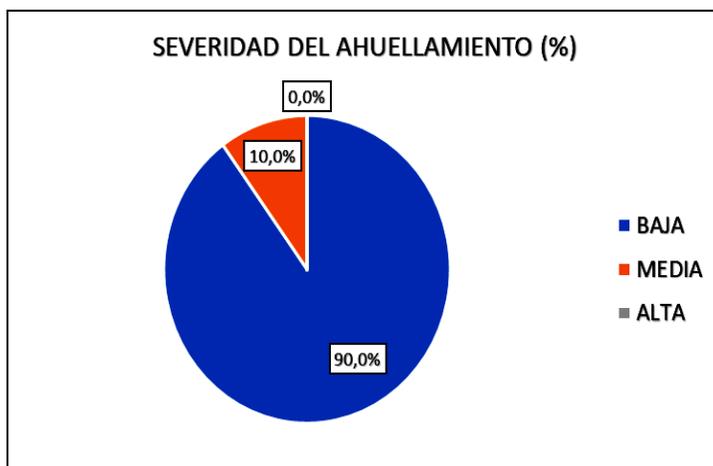
Figura N° 44 Ahuellamiento de los tramos urbanos y rurales



• **Fuente: Elaboración propia**

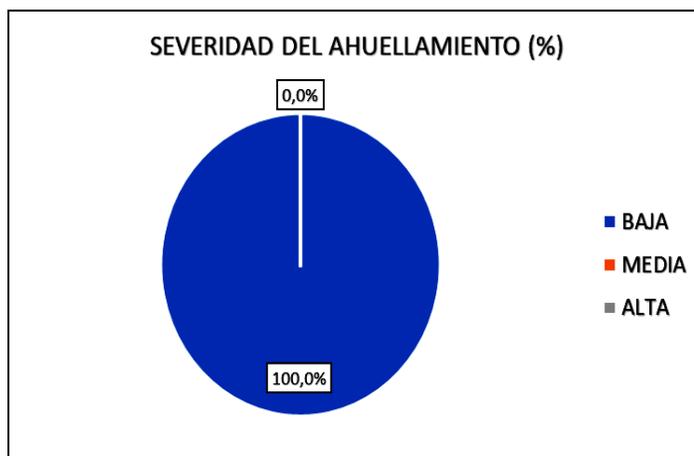
- Como se puede observar en la figura N° 45, N° 46 y en la figura N° 47, el nivel de severidad baja del ahuellamiento comprendido entre 0 – 5 mm es el predominante en los tramos urbanos estudiados.

Figura N° 45 Severidad del ahuellamiento en la calle Sevilla



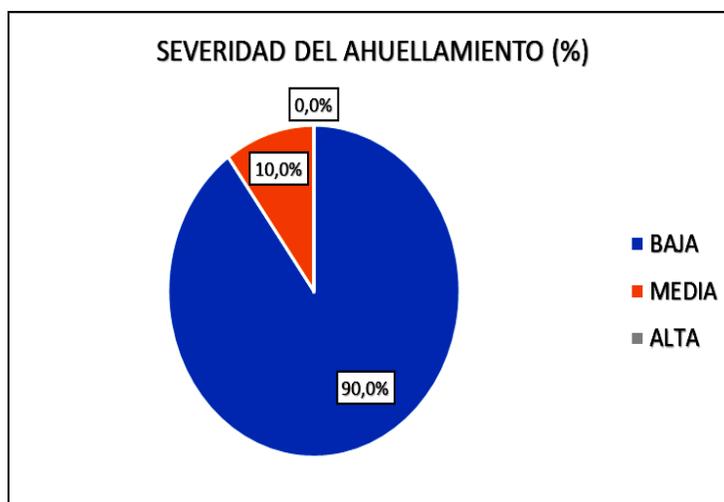
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 46 Severidad del ahuellamiento en la calle Ramon Rojas



Fuente: Elaboración propia

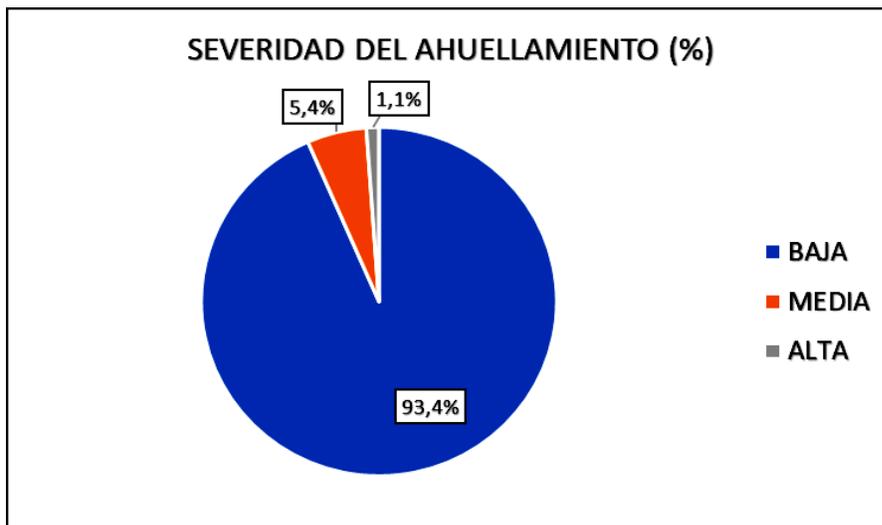
Figura N° 47 Severidad del ahuellamiento en la calle María Claret



Fuente: Elaboración propia

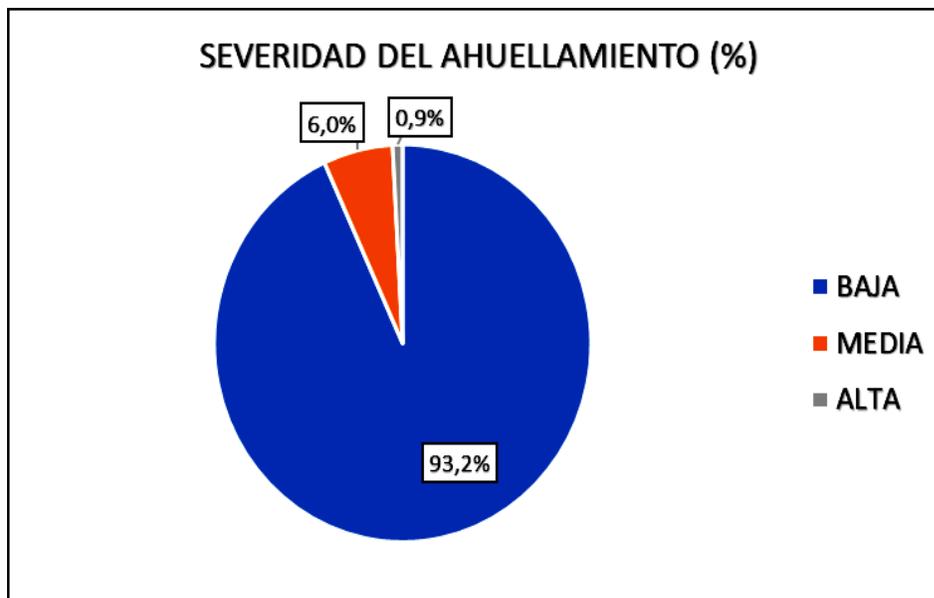
- Una vez analizados ambos carriles derecho e izquierdo de los tramos rurales, gracias a las figuras presentadas a continuación, se puede observar que la severidad más alta del ahuellamiento se encuentra en el tramo Guerrahuayco - San Andrés, porque en este tramo hay mayor flujo vehicular, también existen paradas de micros y taxis trufis como también unidades educativas y barrios más poblados que generan mayor flujo y carga de tránsito a comparación de los otros tramos.

**Figura N° 48 Severidad del ahuellamiento del tramo Guerrahuayco - San Andrés
(carril izquierdo)**



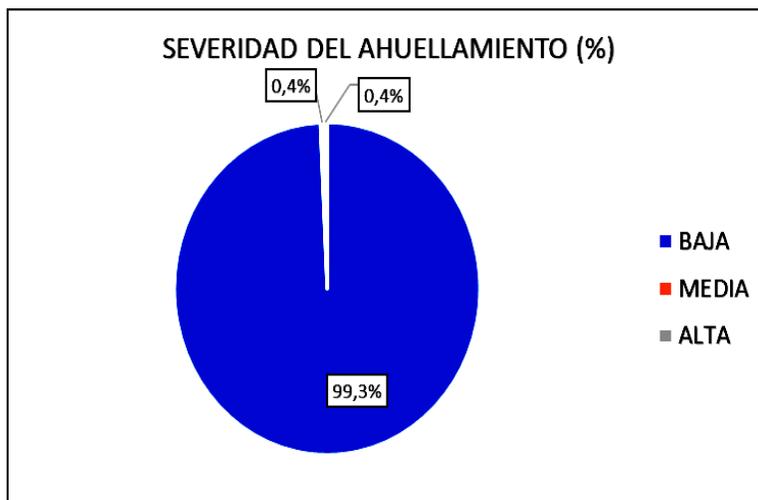
Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 49 Severidad del ahuellamiento del tramo Guerrahuayco - San Andrés
(carril derecho)**



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 50 Severidad del ahuellamiento del tramo Monte Centro - cruce San Pedro de Buena Vista (carril izquierdo)



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 51 Severidad del ahuellamiento del tramo Monte Centro - cruce San Pedro de Buena Vista (carril derecho)



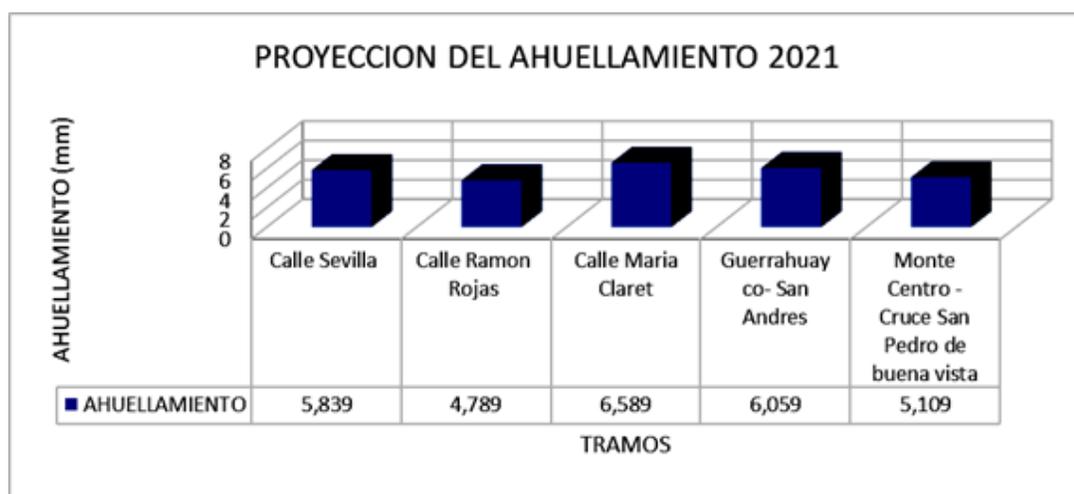
Fuente: Elaboración propia

- Se pudo aplicar los modelos de predicción de ahuellamiento desarrollado en Argentina, Colombia y Perú, siendo estas ecuaciones muy efectivas para analizar su grado y severidad del ahuellamiento en pavimento asfálticos en los

siguientes años, se observa que el tramo más susceptible, es el de la calle María Claret.

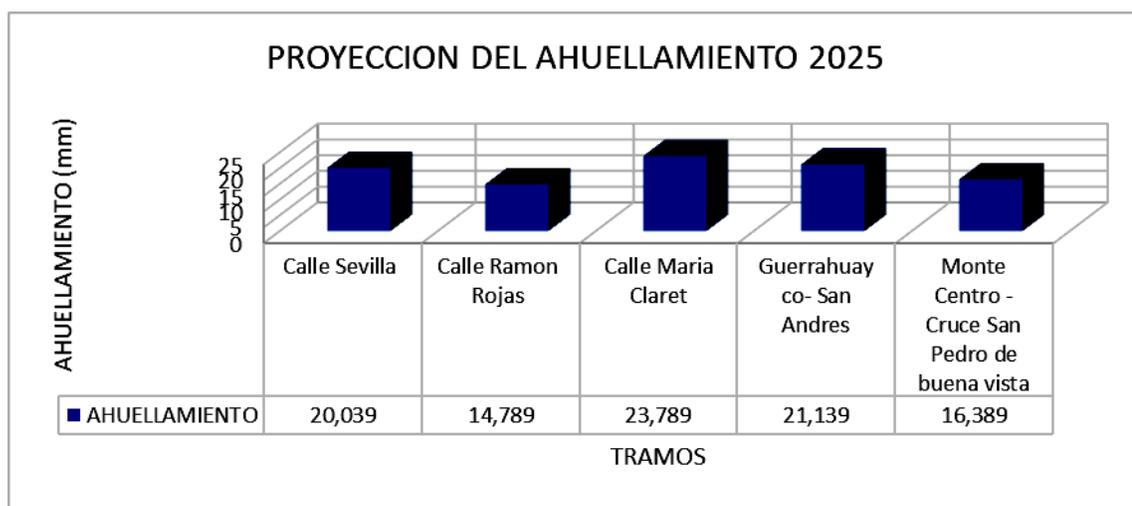
- Los siguientes resultados nos muestran la predicción del ahuellamiento usando la ecuación de Argentina, e n los cuales se puede ver que para el año 2025 se tendrá un ahuellamiento mayor a 10 mm. de severidad alta, esto sería un grave problema para nuestros pavimentos, porque se tendrá que remover el pavimento y reconstruir en las partes afectadas.

Figura N° 52 Predicción del ahuellamiento para el año 2021

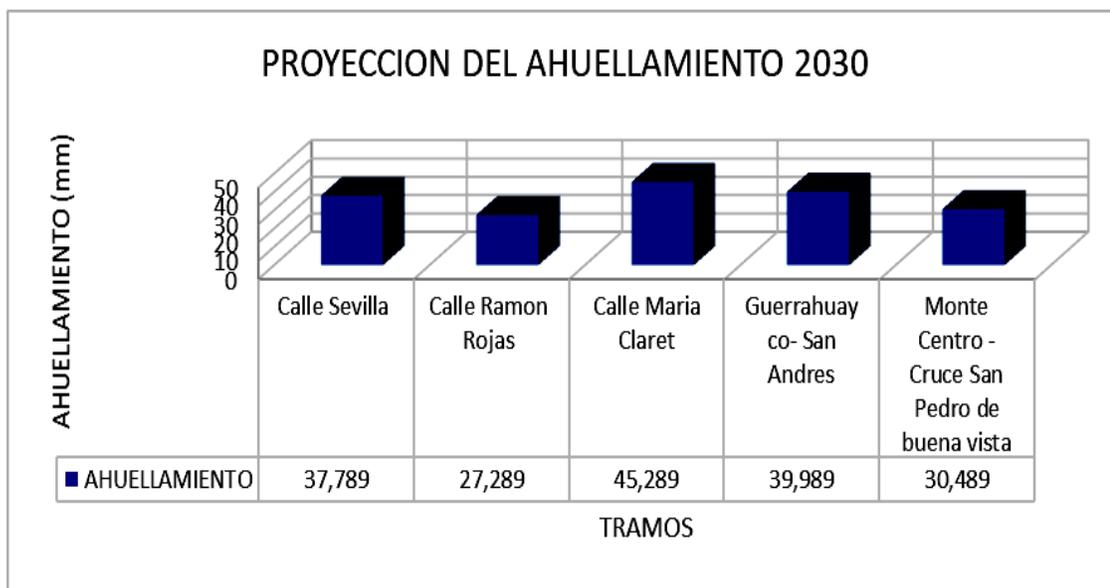


Fuente: Elaboración propia

Figura N° 53 Predicción del ahuellamiento para el año 2025



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 54 Predicción del ahuellamiento para el año 2030

Fuente: Elaboración propia

- Los siguientes resultados nos muestran la predicción del ahuellamiento usando la ecuación de Colombia, donde se puede observar que para el año 2022 ya se tendría que intervenir y hacer un trabajo de fresado y recapeo, también se puede ver que ya para el año 2024 se tendrá un ahuellamiento mayor a 10 mm. de severidad, esto sería un grave problema para nuestros pavimentos, porque se tendrá que remover el pavimento y reconstruir en las partes afectadas.

Figura N° 55 Predicción de ahuellamiento usando la ecuación de Colombia

Tramo	Proyección de ahuellamiento E.C. COLOMBIA (mm)										
	Actual	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Calle Sevilla	3,55	5,585	9,17	12,754	16,339	19,924	23,509	27,094	30,678	34,263	37,848
Calle Ramon Rojas	2,5	4,525	7,049	9,574	12,098	14,623	17,147	19,672	22,196	24,721	27,245
Calle María Claret	4,3	6,342	10,684	15,026	19,369	23,711	28,053	32,395	36,737	41,079	45,422
Guerrahuayco- San Andrés	3,77	5,807	9,614	13,421	17,228	21,035	24,842	28,649	32,456	36,263	40,07
Monte Centro - Cruce San Pedro de Buena Vista	2,82	4,848	7,695	10,543	13,391	16,238	19,086	21,934	24,781	27,629	30,476

Fuente: Elaboración propia

- Los siguientes resultados de la predicción del ahuellamiento usando la ecuación de Perú, nos muestran que para el año 2024 se tendrá un ahuellamiento mayor a 10 mm. de severidad, esto sería un grave problema para nuestros pavimentos, porque se tendrá hacer un trabajo de reconstrucción.

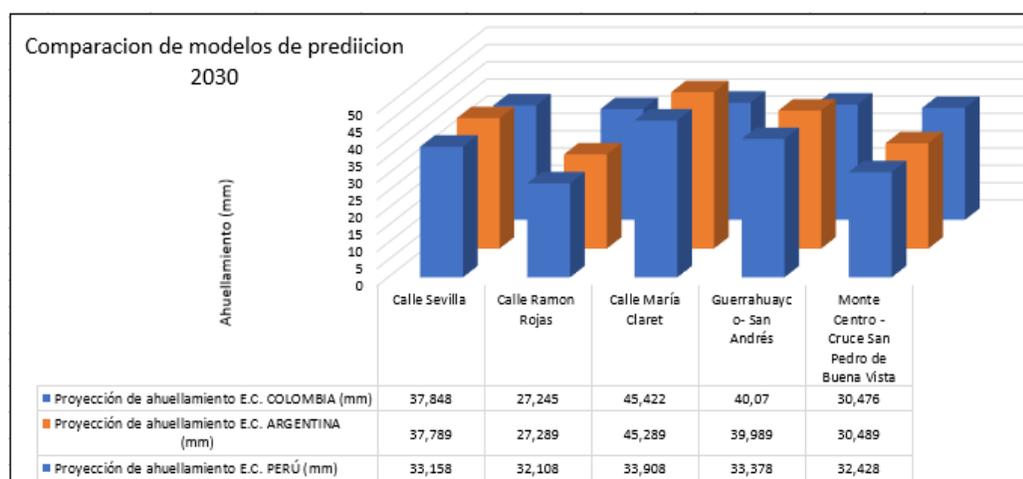
Figura N° 56 Predicción de ahuellamiento usando la ecuación de Perú

Tramo	Proyección de ahuellamiento E.C. PERÚ (mm)										
	Actual	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Calle Sevilla	3,55	6,182	7,521	9,383	11,693	14,408	17,495	20,931	24,697	28,777	33,158
Calle Ramon Rojas	2,5	5,132	6,471	8,333	10,643	13,358	16,445	19,881	23,647	27,727	32,108
Calle María Claret	4,3	6,932	8,271	10,133	12,443	15,158	18,245	21,681	25,447	29,527	33,908
Guerrahuayco- San Andrés	3,77	6,402	7,741	9,603	11,913	14,628	17,715	21,151	24,917	28,997	33,378
Monte Centro - Cruce San Pedro de Buena Vista	2,82	5,452	6,791	8,653	10,963	13,678	16,765	20,201	23,967	28,047	32,428

• **Fuente: Elaboración propia**

- En la siguiente figura se observa los resultados de la comparación de los tres modelos de predicción de ahuellamiento utilizados, estos nos reflejan que existe una diferencia notable, debido a que cada modelo de predicción tiene distintos coeficientes y constantes de proyección.

Figura N° 57 Comparación de modelos de predicción de ahuellamiento



Fuente: Elaboración propia

3.8. Justificación y validación de modelos de predicción de ahuellamiento

Para analizar la fiabilidad o grado de confiabilidad de los modelos utilizados en el presente estudio se utiliza el coeficiente de determinación que denotamos por R^2 , es un indicador de fiabilidad que mide la bondad del ajuste del modelo (Novales,2010).

Por su definición, es una medida acotada, siendo sus límites $0 \leq R^2 \leq 1$ un R^2 igual a 1 significa un ajuste lineal perfecto, ya que la variación total de la variable Y es explicada por el modelo. El valor cero indica la no representatividad del modelo lineal lo que supone que el modelo no explica nada de la variación total de la variable Y (Rodríguez, 2005).

A continuación, mostramos los resultados del coeficiente de determinación en cada uno de los modelos analizados. Todos los modelos superan 0,8 requerido para la bondad del ajuste del modelo de proyección.

Tabla N° 32 Coeficiente de determinación en cada uno de los modelos analizados para la calle Sevilla

Calle Sevilla		Años	Ec. Argentina	Ec. Colombia	Ec. Perú
Coeficiente de determinación	Años	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Argentina calle Sevilla	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Colombia calle Sevilla	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Perú calle Sevilla	0,99	0,99	0,99	1,00
N	Años	10	10	10	10
	Ec. Argentina calle Sevilla	10	10	10	10
	Ec. Colombia calle Sevilla	10	10	10	10
	Ec. Perú calle Sevilla	10	10	10	10

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 58 Coeficiente de determinación en cada uno de los modelos analizados para la calle Ramon Rojas

Calle Ramón Rojas		años	Ec. Argentina	Ec. Colombia	Ec. Perú
Coeficiente de determinación	Años	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Argentina calle Ramón Rojas	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Colombia calle Ramón Rojas	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Perú calle Ramón Rojas	0,99	0,99	0,99	1,00
N	Años	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ec. Argentina calle Ramón Rojas	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ec. Colombia calle Ramón Rojas	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ec. Perú calle Ramón Rojas	10,00	10,00	10,00	10,00

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 59 Coeficiente de determinación en cada uno de los modelos analizados para la calle María Claret

Calle María Claret		años	Ec. Argentina	Ec. Colombia	Ec. Perú
Coeficiente de determinación	Años	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Argentina calle María Claret	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Colombia calle María Claret	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Perú calle María Claret	0,99	0,99	0,99	1,00
N	Años	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ec. Argentina calle María Claret	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ec. Colombia calle María Claret	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ec. Perú calle María Claret	10,00	10,00	10,00	10,00

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 60 Coeficiente de determinación en cada uno de los modelos analizados para el tramo Guerrahuayco - San Andrés

Guerrahuayco – San Andrés		años	Ec. Argentina	Ec. Colombia	Ec. Perú
Coeficiente de determinación	Años	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Argentina Guerrahuayco – San Andrés	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Colombia Guerrahuayco – San Andrés	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Perú Guerrahuayco – San Andrés	0,99	0,99	0,99	1,00
N	Años	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ec. Argentina Guerrahuayco – San Andrés	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ec. Colombia Guerrahuayco – San Andrés	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ec. Perú Guerrahuayco – San Andrés	10,00	10,00	10,00	10,00

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 61 Coeficiente de determinación en cada uno de los modelos analizados para el tramo Monte Centro - cruce San Pedro de Buena Vista

Cruce de San Pedro - Monte Centro		años	Ec. Argentina	Ec. Colombia	Ec. Perú
Coeficiente de determinación	Años	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Argentina Cruce de San Pedro - Monte Centro	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Colombia Cruce de San Pedro - Monte Centro	1,00	1,00	1,00	0,99
	Ec. Perú Cruce de San Pedro - Monte Centro	0,99	0,99	0,99	1,00
N	Años	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ec. Argentina Cruce de San Pedro - Monte Centro	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ec. Colombia Cruce de San Pedro - Monte Centro	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ec. Perú Cruce de San Pedro - Monte Centro	10,00	10,00	10,00	10,00

Fuente: Elaboración propia

3.8.1. Análisis para validar los datos obtenidos en campo

El análisis exploratorio tiene como objetivo identificar el modelo Teórico más adecuado para representar la población de la cual proceden los datos muestrales. Dicho análisis se basa en gráficos y estadísticos que permiten explorar la distribución identificando características tales como: valores atípicos o outliers, saltos o discontinuidades, concentraciones de valores, forma de la distribución, etc. Por otra parte, este análisis se puede realizar sobre todos los casos conjuntamente o de forma separada por grupos. En este último caso los gráficos y estadísticos permiten identificar si los datos proceden de una o varias poblaciones, considerando la variable que determina los grupos como factor diferenciador de las poblaciones. También permite comprobar, mediante técnicas gráficas y contrastes no paramétricos, si los datos han sido extraídos de una población con distribución aproximadamente normal (Rojo,2006).

A) Estadísticos en los tramos urbanos

Se describen los datos analizados y la cantidad de muestras promedio:

Figura N° 62 Resumen de datos analizados y muestras promedio

Resumen de procesamiento de casos							
Calles		Casos					
		Válido		Perdidos		Total	
		N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Promedio	María Claret	3	100,0%	0	0,0%	3	100,0%
	Ramon Rojas	4	100,0%	0	0,0%	4	100,0%
	Sevilla	4	100,0%	0	0,0%	4	100,0%

Fuente: Elaboración propia

- **Descriptivos:**

Contiene los valores de los estadísticos más utilizados en función de los resultados del ahuellamiento en las diferentes calles.

Figura N° 63 Valores estadísticos en función a los resultados de ahuellamientos

Descriptivos				
Calles			Estadístico	
Promedio	María Claret	Media	4,3000	
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	3,3063
			Límite superior	5,2937
		Media recortada al 5%		
		Mediana	4,3000	
		Varianza	0,160	
		Desviación	0,40000	
		Mínimo	3,90	
		Máximo	4,70	
		Rango	0,80	
		Rango intercuartil		
		Asimetría	0,000	
		Curtosis		
	Ramón Rojas	Media	2,6000	
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	2,1499
			Límite superior	3,0501
		Media recortada al 5%	2,5889	
		Mediana	2,5000	
		Varianza	0,080	
		Desviación	0,28284	
		Mínimo	2,40	
		Máximo	3,00	
		Rango	0,60	
Rango intercuartil		0,50		
Asimetría		1,414		
Curtosis		1,500		
Sevilla	Media	3,5500		

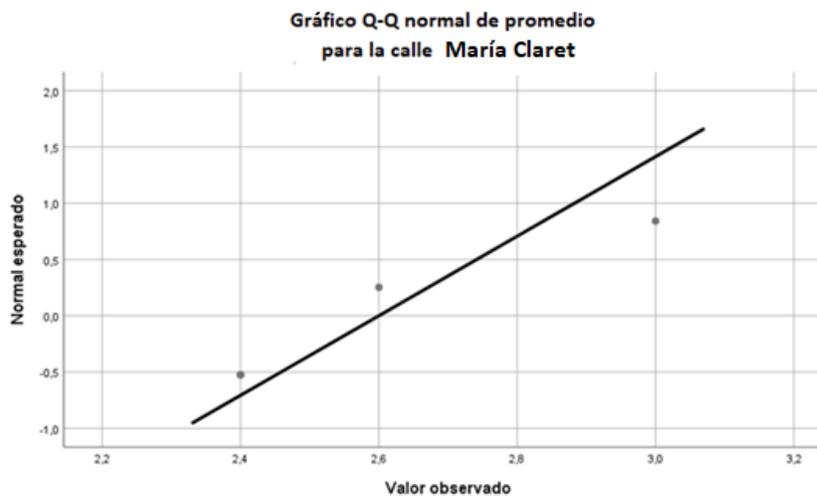
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	3,2744
		Límite superior	3,8256
	Media recortada al 5%		3,5444
	Mediana		3,5000
	Varianza		0,030
	Desviación		0,17321
	Mínimo		3,40
	Máximo		3,80
	Rango		0,40
	Rango intercuartil		0,30
	Asimetría		1,540
	Curtosis		2,889

• Fuente: Elaboración propia

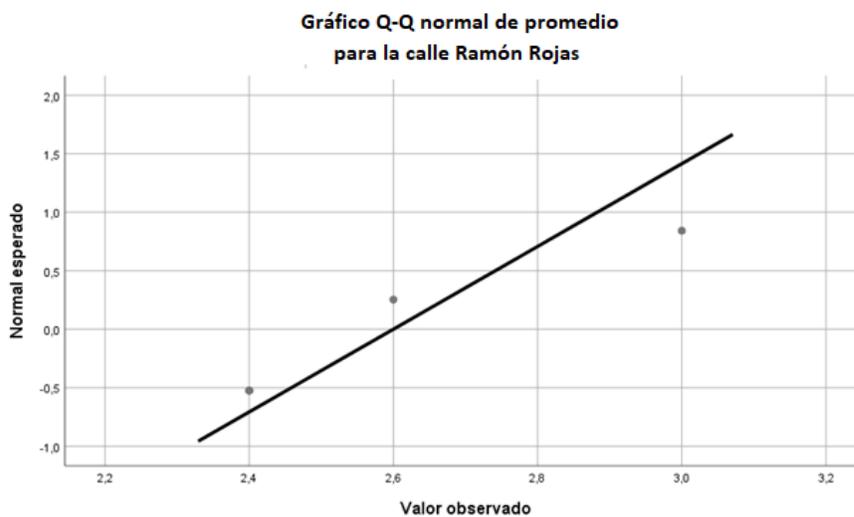
• Gráficos Q-Q Normal

El Q-Q Normal presenta simultáneamente para cada elemento el valor observado y el valor esperado bajo el supuesto de normalidad. Si los datos proceden de una distribución normal los puntos aparecen agrupados en torno a la línea recta esperada.

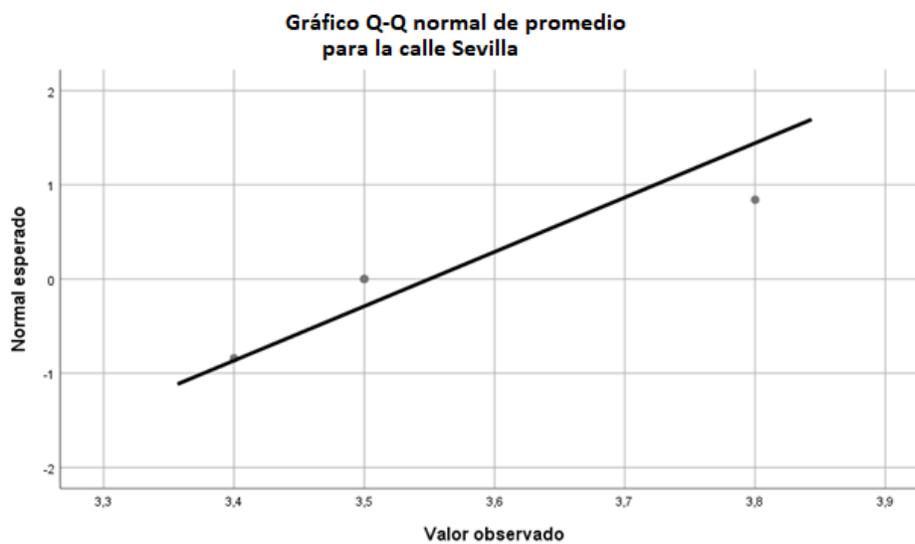
Figura N° 64 Gráfico Q-Q normal de promedio para la calle María Claret



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 65 Gráfico Q-Q normal de promedio para la calle Ramon Rojas

Fuente: Elaboración propia

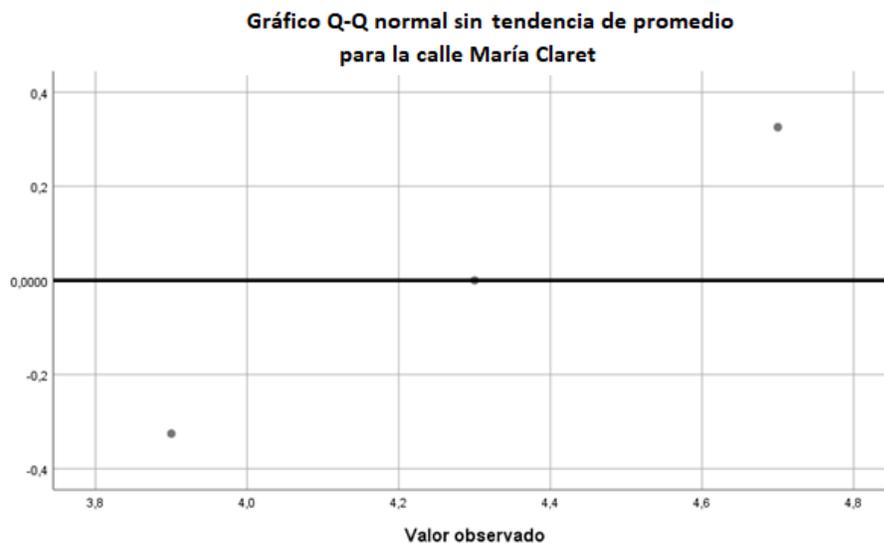
Figura N° 66 Gráfico Q-Q normal de promedio para la calle Sevilla

Fuente: Elaboración propia

- **Gráficos Q-Q Normal sin tendencia**

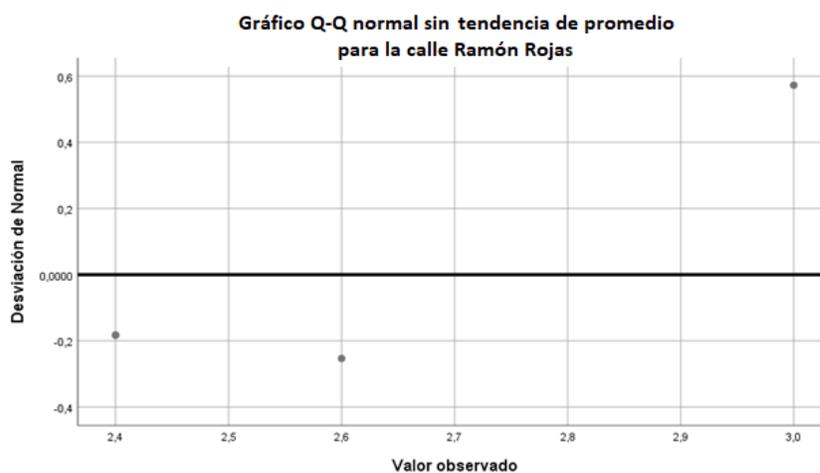
El Q-Q Normal sin tendencia se basa en las diferencias entre los valores observados y los valores esperados bajo la hipótesis de normalidad. Si estas diferencias se distribuyen aleatoriamente alrededor del eje de abscisas puede suponerse que la hipótesis de normalidad es sostenible.

Figura N° 67 Gráfico Q-Q normal sin tendencia para la calle María Claret



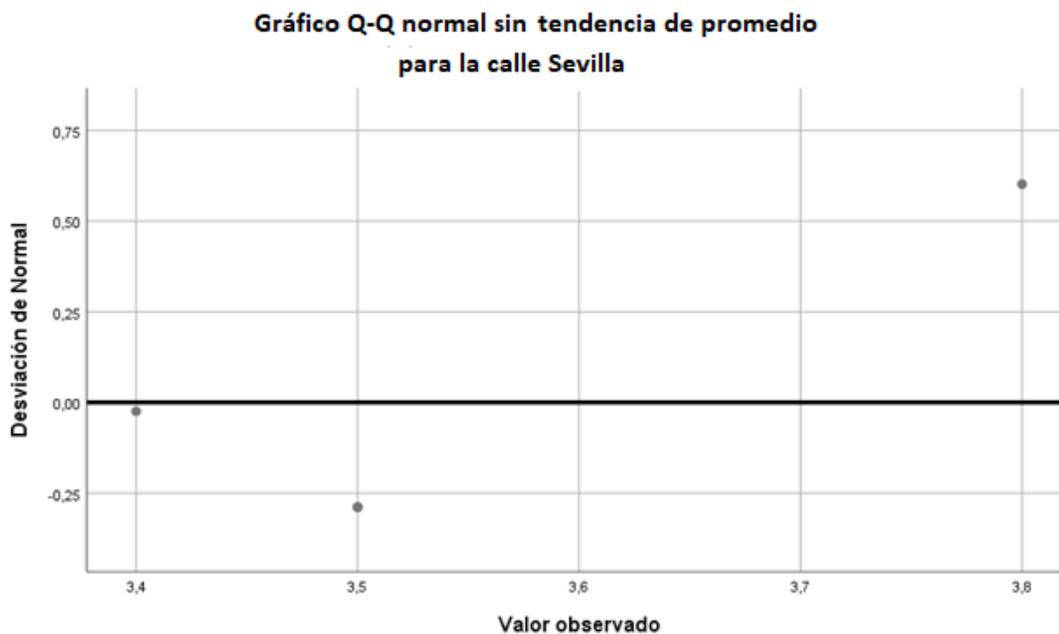
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 68 Gráfico Q-Q normal sin tendencia para la calle Ramon Rojas



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 69 Gráfico Q-Q normal sin tendencia para la calle Sevilla



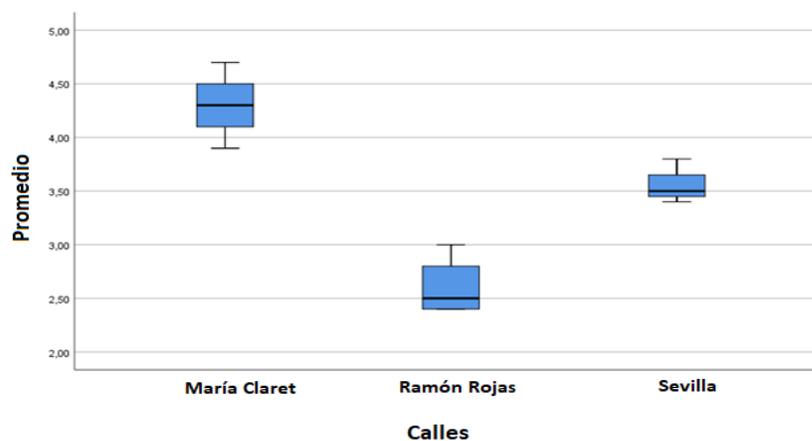
Fuente: Elaboración propia

- **Diagramas de cajas**

El diagrama de cajas muestra a simple vista la mediana (la línea más gruesa de la caja) y los cuartiles de los datos, pudiendo también representar los valores atípicos de estos.

En ninguna de las muestras se observa valores atípicos.

Figura N° 70 Diagrama de cajas de los tramos urbanos



Fuente: Elaboración propia

- **Pruebas de normalidad**

Normalidad es cuando los valores de la variable aleatoria dependiente siguen una distribución normal en la población a la que pertenece la muestra. Se plantea la siguiente prueba de hipótesis:

Ho: La variable resistencia en la población tiene distribución Normal

H1: La variable resistencia en la población es distinta de la distribución Normal

Pruebas estadísticas: Kolmogórov-Smirnov o Shapiro –Wilk

Cuando las muestras son pequeñas, menores a 30 se debe utilizar la prueba de Shapiro-Wilk.

El nivel de significación utilizado es de 0,05

En el programa estadístico SPSS si Sig.(p-valor)>0,05 aceptamos Ho (hipótesis nula) y la distribución es normal.

Tabla N° 33 Tabla de pruebas de normalidad para los tramos urbanos

Pruebas de normalidad							
Calles		Kolmogórov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Promedio	María Claret	0,175	3	.	1,000	3	1,000
	Ramon Rojas	0,260	4	.	0,827	4	0,161
	Sevilla	0,364	4	.	0,840	4	0,195
a. Corrección de significación de Lilliefors							

Fuente: Elaboración propia

En las muestras analizadas se observa que el nivel de significación es mayor al 5% en la prueba de Shapiro-Wilk, por lo que podemos afirmar que provienen de una distribución normal.

B) Estadísticos en los tramos rurales

- **Resumen de los datos**

Se describen los datos analizados y la cantidad de muestras promedio

Figura N° 71 Resumen de datos de los tramos rurales

Resumen de procesamiento de casos							
Tramo		Casos					
		Válido		Perdidos		Total	
		N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Promedio	Guerrahuayco – San Andrés	29	100,0%	0	0,0%	29	100,0%
	Cruce de San Pedro - Monte Centro	28	100,0%	0	0,0%	28	100,0%

Fuente: Elaboración propia

- **Descriptivos:**

Contiene los valores de los estadísticos más utilizados en función de los resultados del ahuellamiento en los dos tramos.

Figura N° 72 Valores estadísticos en función del resultado de los tramos rurales

Descriptivos				
Tramo			Estadístico	
Promedio	Guerrahuayco – San Andrés	Media	3,7552	
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	3,3451
			Límite superior	4,1652
		Media recortada al 5%	3,6187	
		Mediana	3,4500	
		Varianza	1,162	
		Desviación	1,07797	

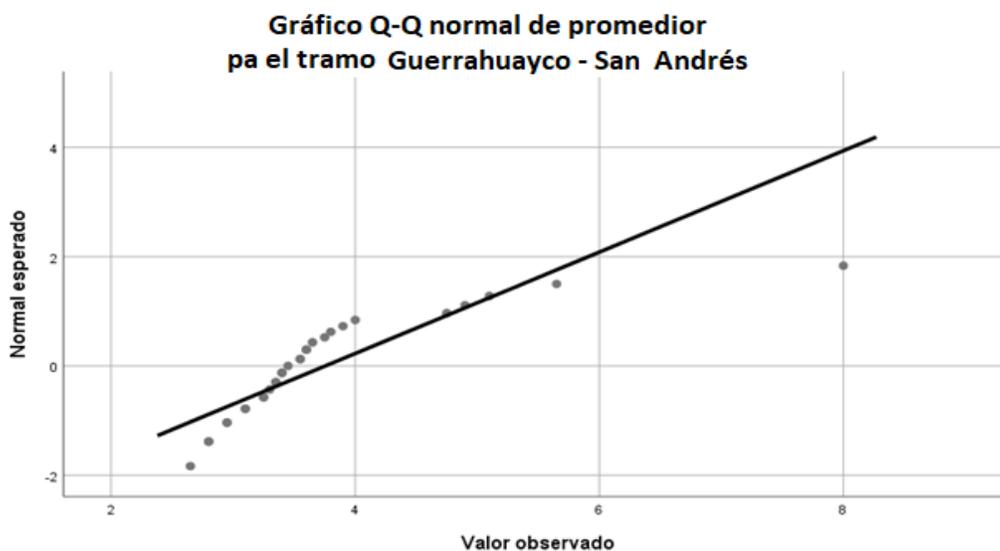
		Mínimo	2,65	
		Máximo	8,00	
		Rango	5,35	
		Rango intercuartil	0,68	
		Asimetría	2,539	
		Curtosis	8,062	
	Cruce de San Pedro - Monte Centro	Media	2,6893	
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	2,5422
			Límite superior	2,8364
		Media recortada al 5%	2,6679	
		Mediana	2,6750	
		Varianza	0,144	
		Desviación	0,37941	
		Mínimo	2,10	
		Máximo	3,65	
		Rango	1,55	
		Rango intercuartil	0,50	
		Asimetría	0,877	
		Curtosis	1,040	

Fuente: Elaboración propia

Gráficos Q-Q Normal

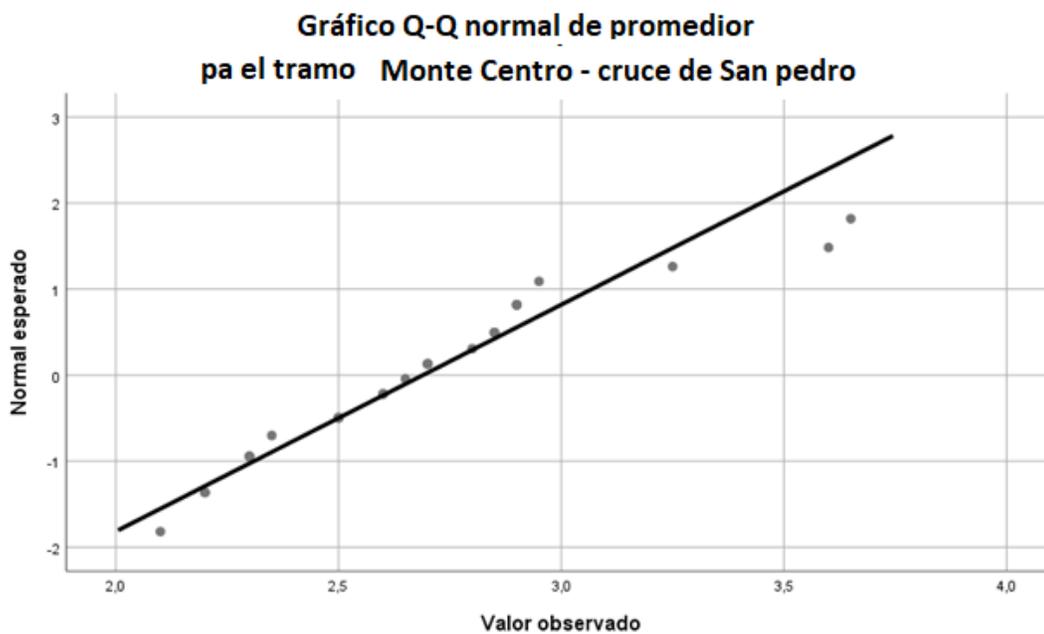
El Q-Q Normal presenta simultáneamente para cada elemento el valor observado y el valor esperado bajo el supuesto de normalidad. Si los datos proceden de una distribución normal los puntos aparecen agrupados en torno a la línea recta esperada.

Figura N° 73 Gráfico Q-Q normal de promedior del tramo Guerrahuayco - San Andrés



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 74 Gráfico Q-Q normal de promedior del tramo Monte Centro - cruce San Pedro

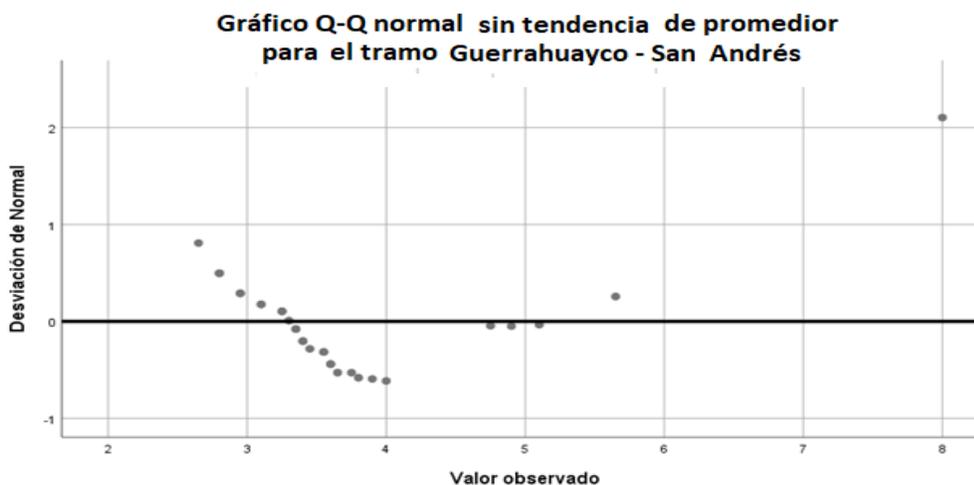


Fuente: Elaboración propia

- **Gráficos Q-Q Normal sin tendencia**

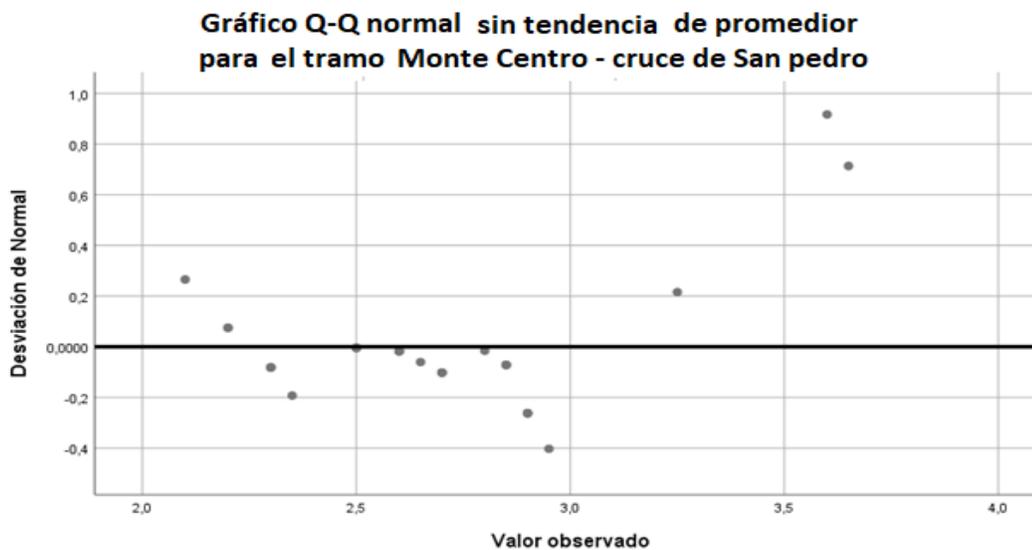
El Q-Q Normal sin tendencia se basa en las diferencias entre los valores observados y los valores esperados bajo la hipótesis de normalidad. Si estas diferencias se distribuyen aleatoriamente alrededor del eje de abscisas puede suponerse que la hipótesis de normalidad es sostenible.

Figura N° 75 Gráfico Q-Q normal del tramo Guerrahuayco - San Andrés



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 76 Gráfico Q-Q normal del tramo Monte Centro - cruce de San Pedro



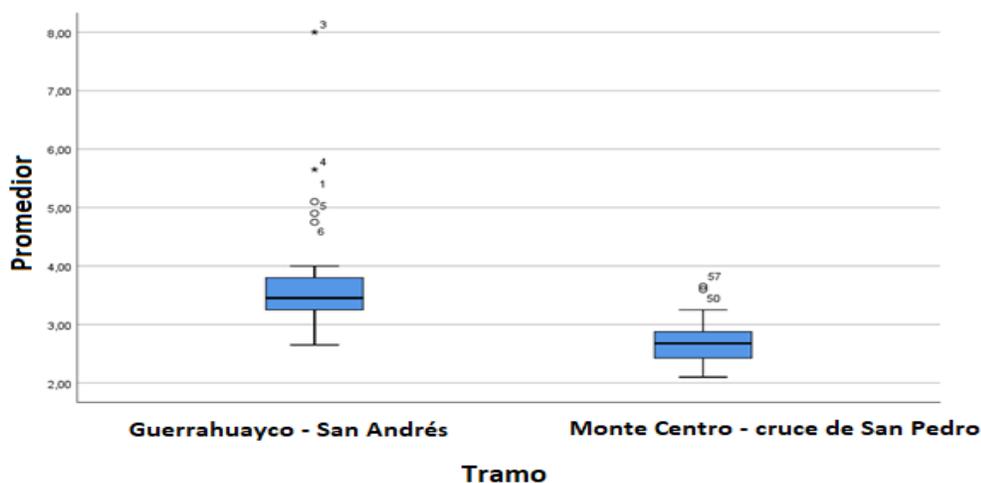
Fuente: Elaboración propia

- **Diagramas de cajas**

El diagrama de cajas muestra a simple vista la mediana (la línea más gruesa de la caja) y los cuartiles de los datos, pudiendo también representar los valores atípicos de estos.

En las muestras se observa valores atípicos y extremos. Estos valores extremos deben ser analizados por el investigador si afecta la normalidad de los datos requerida para la proyección de datos en el presente estudio.

Figura N° 77 Diagrama de cajas de los tramos rurales



- **Fuente: Elaboración propia**

- **Pruebas de normalidad**

Normalidad es cuando los valores de la variable aleatoria dependiente siguen una distribución normal en la población a la que pertenece la muestra. Se plantea la siguiente prueba de hipótesis:

Ho: La variable resistencia en la población tiene distribución Normal

H1: La variable resistencia en la población es distinta de la distribución Normal

Pruebas estadísticas: Kolmogórov-Smirnov o Shapiro –Wilk

Cuando las muestras son pequeñas, menores a 30 se debe utilizar la prueba de Shapiro-Wilk.

El nivel de significación utilizado es de 0,05

En el programa estadístico SPSS si $\text{Sig.}(p\text{-valor}) > 0,05$ aceptamos H_0 (hipótesis nula) y la distribución es normal.

Tabla N° 34 Prueba de normalidad para tramos rurales

Pruebas de normalidad							
Tramo		Kolmogórov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Promedior	Guerrahuayco –San Andrés	0,242	29	0,000	0,736	29	0,000
	Cruce de San Pedro - Monte Centro	0,146	28	0,128	0,927	28	0,053
a. Corrección de significación de Lilliefors							

Fuente: Elaboración propia

En las muestras analizadas se observa que el nivel de significación es mayor al 5% el tramo de Guerrahuayco no presenta una distribución normal (prueba de Shapiro-Wilk) , por lo que es necesario corregir la distribución eliminando los valores atípicos.

- **Pruebas de normalidad corregida**

Para lograr la normalidad en los datos se ha eliminado los datos atípicos.

Tabla N° 35 Prueba de normalidad corregida para tramos rurales

Pruebas de normalidad							
Tramo		Kolmogórov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Promedior	Guerrahuayco –San Andrés	0,094	24	0,200*	0,979	24	0,878
	Cruce de San Pedro - Monte Centro	0,146	28	0,128	0,927	28	0,053
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.							
a. Corrección de significación de Lilliefors							

Fuente: Elaboración propia

3.9. Recomendaciones para la prevención del ahuellamiento

Se mencionan las recomendaciones más relevantes para prevenir las deformaciones por este deterioro y mejorar el desempeño y las prestaciones de mezclas asfálticas colocadas como la capa de rodadura en los pavimentos sometidos a condiciones severas de servicio.

- Se recomienda que el agregado grueso con el cuál se pretende elaborar la mezcla asfáltica, presente suficientes caras de fractura para un mayor rozamiento interno entre las partículas y cumpla con los requisitos de resistencia a la abrasión para evitar que la granulometría inicial cambie cuando la mezcla soporte las cargas del tráfico.
- Se debe hacer una correcta elección del tipo de ligante asfáltico de acuerdo a la zona estival donde será colocada la mezcla asfáltica, para evitar que la temperatura influya en gran medida en la deformabilidad de la mezcla, entre menos susceptible a la temperatura sea el ligante asfáltico, más resistente a la deformación plástica será la mezcla a altas temperaturas. Se desean mayormente asfaltos que presenten una alta viscosidad y una baja susceptibilidad a la temperatura. Los contenidos óptimos de asfalto se deben respetar durante la fabricación de la mezcla en planta.
- Una capa de rodadura construida con una mezcla asfáltica que contiene un asfalto de alta penetración y baja viscosidad, es muy susceptible a la formación de ahuellamientos.
- Hay que cuidar durante la elaboración de las mezclas asfálticas, que tanto la granulometría como el ligante con los cuales se diseñó la mezcla, verdaderamente se cumplan a la hora de realizar la fabricación de la mezcla en la central. Es de gran importancia también verificar la temperatura de mezclado y compactación de la mezcla a la hora de la puesta en obra.
- Utilizar durante el diseño de la mezcla una compactación con un esfuerzo similar como el que tendrá a la hora de su construcción y contemplar la compactación debida al tráfico que seguirá teniendo a lo largo de su vida de proyecto.

- Dentro de los parámetros volumétricos, en ocasiones se recomienda disminuir el contenido de asfalto de las mezclas, mediante el manejo de la granulometría del agregado y valores bajos en el contenido de vacíos.
- Para mejorar el diseño de las mezclas asfálticas para carreteras de alto volumen de tránsito, se considera altamente recomendable realizar una verificación de los parámetros de diseño con muestras de mezcla asfáltica producida en planta, y actualizar la información de referencia, en base a dichos resultados. El control de densidad de la mezcla asfáltica debería ser realizado considerando los valores obtenidos con mezcla en planta.
- La construcción capas de rodadura en los pavimentos con mezclas asfálticas densas que contengan agregados pétreos de gran tamaño máximo, (siguiendo los criterios en relación a los agregados pétreos) ayudan a prevenir la formación de ahuellamientos, debido al rozamiento interno que presentan y a la alta resistencia que presentan.
- Una compactación eficiente de la mezcla asfáltica, con el equipo de construcción adecuado, y a una temperatura dentro del rango aceptable de compactación, ayuda a prevenir de manera muy notoria la formación de ahuellamientos.
- Evitar la segregación de la mezcla asfáltica durante el transporte y el extendido de la mezcla puede ser un factor favorable en la ganancia de estabilidad de la mezcla y la no deformabilidad de la misma.

3.10. Propuestas de solución al ahuellamiento

El presente punto tiene por objeto discutir los aspectos más comunes relativos a las acciones de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos flexibles. Existen distintos niveles de intervención en la conservación vial, estos se clasifican en función a la magnitud de los trabajos necesarios, desde una intervención simple hasta una intervención más complicada y por ende más costosa.

El mantenimiento reduce la velocidad del deterioro del pavimento corrigiendo pequeños defectos antes de que ellos empeoren y conduzcan a deterioros mayores. Buscando

recuperar el deterioro de la capa de rodadura ocasionados por el tránsito y por los efectos del clima. Más allá de cierto punto, el simple mantenimiento no es suficiente y se requieren obras de rehabilitación que conducen a un mejoramiento en la condición del pavimento, recuperando las condiciones iniciales de la vía.

Para intervenir adecuadamente una falla en la estructura del pavimento, debe estar en función del grado o nivel de severidad que se presenta. Los niveles de severidad se dividen en tres tipos: severidad baja, severidad media y severidad alta.

A continuación, se describe el procedimiento recomendado para intervenir según el grado de severidad del ahuellamiento:

Tabla N° 36 Mantenimiento para deformación del ahuellamiento

Mantenimiento para deformaciones por ahuellamiento		
Nivel de severidad	Profundidad (mm.)	Alternativa de solución
Bajo	0 - 5	Micro carpeta
Medio	5 - 10	Fresado y recapeo
Alto	mayor a 10	Reconstrucción

Fuente: Elaboración propia

3.10.1. Plan de mantenimiento en función a la escala del valor de deterioro del ahuellamiento

Para cada tipo y nivel de severidad que presenta el ahuellamiento en pavimento, existen una o más técnicas que resultan ser las más adecuadas para solucionar el problema, en términos de eficiencia y relación costo-beneficio.

Tabla N° 37 Plan de mantenimiento para los tramos seleccionados

Tramo	Propuesta de solución al ahuellamiento		
	Actual (2020)	2022	2024
Calle Sevilla	microcarpeta	fresado y recapeo	reconstrucción
Calle Ramon Rojas	microcarpeta	fresado y recapeo	reconstrucción
Calle María Claret	microcarpeta	fresado y recapeo	reconstrucción
Guerrahuayco- San Andrés	microcarpeta	fresado y recapeo	reconstrucción
Monte Centro - Cruce San Pedro de Buena Vista	microcarpeta	fresado y recapeo	reconstrucción

Fuente: Elaboración propia

- **Micropavimento**

Microsurfacing o micropavimento que consiste en una sobrecapa delgada de 5 a 7 mm. También se conoce como sistema MS-1, consiste en una mezcla de emulsión catiónica de asfalto modificado con polímeros, agregados minerales de alta calidad, rellenos minerales, agua y otros aditivos que son tendidos sobre la superficie pavimentada. La emulsión asfáltica debe modificarse con un polímero que se incorporará al cemento asfáltico antes de emulsificarlo. El residuo asfáltico de una emulsión modificada, debe tener al menos 3 % de polímero calculado en peso. La emulsión de asfalto modificada debe ser formulada para que la mezcla de pavimento pueda ser aplicada con humedad relativa no mayor del 50 % y una temperatura ambiental de no menos de 24 °C, y curar lo suficiente para que al abrir el tránsito en una hora la carpeta no sufra daños.

- **Procedimiento de ejecución**

- ✓ El material debe ser colocado solamente si la temperatura atmosférica es mayor de 15 °C. Si hay niebla o amenazas de lluvia, no debe colocarse.
- ✓ La superficie del asfalto existente debe estar completamente limpia.
- ✓ La mezcla debe ser aplicada por medios mecánicos con un mezclador con agitadores y esparcidores de material.
- ✓ La mezcla se aplicará para llenar grietas e irregularidades menores de la superficie y no será resbaladiza.
- ✓ La junta de construcción debe minimizarse y ser lo más uniforme posible.

- **Recapeo**

Consiste en la colocación de mezcla asfáltica en caliente, en espesor no menor de 5 centímetros. sobre la carpeta de rodadura existente, con el objetivo de reforzar estructuralmente el pavimento y se hace cuando no existen daños severos en la estructura del pavimento. Para la ejecución de este trabajo, se requiere que exista un estudio geotécnico de la estructura del pavimento y que la capa superficial no presente un área agrietada por fatiga, mayor del 15 % y que la profundidad de las grietas no alcance la capa de base. Previo a realizar el trabajo de recapeo se deberán reparar las

áreas afectadas con la realización del bacheo. El espesor de la carpeta asfáltica será fijado mediante un diseño según el requerimiento del refuerzo adecuado. La mezcla se debe colocar y tender sobre la superficie debidamente ligada, a una temperatura mínima de 265 °F (130 °C), y debe usarse siempre equipo de pavimentación autopropulsado. La longitud de las áreas a trabajar, va depender del equipo de compactación del que se disponga y a las pérdidas de temperatura que pueda sufrir la mezcla.

- **Recapeo en una superficie pavimentada**

En las zonas inestables bajo la estructura del pavimento de una carretera, que pueden ser producidas por problemas de la capa de rodadura, por saturación del suelo circundante, bolsón de suelo indeseable o por contaminación de cualquier naturaleza, estas áreas con problemas deben ser reparadas con el objetivo de devolver la sustentación estructural original de la carretera, y para proporcionar el confort y la seguridad esperada del mismo.

Debido a que las diferentes labores que deben emprenderse para dar solución al problema planteado, tendrán variaciones que estarán en función directa del área superficial a tratar y de la profundidad en que se haya visto afectada la estructura, siendo las labores a realizar las siguientes:

- **Procedimiento de ejecución**

- ✓ Excavación: Para realizar el corte de la porción de carpeta asfáltica, el área a reparar debe ser marcada de forma cuadrada o rectangular. Los cortes deberán ejecutarse con equipos mecánicos como cortadoras especiales y limpieza con aire comprimido, las paredes deben quedar parejas y verticales. El material inadecuado debe ser extraído. El fondo de la excavación debe nivelarse y compactarse adecuadamente y quedar libre de material suelto.

Los baches excavados deben llenarse en el mismo día, NO se permite trabajarlos al siguiente día.

- ✓ Relleno con material de base: Este trabajo consistirá en la sustitución del material excavado con material de base. El material debe humedecerse, mezclarse y

compactarse debidamente. El material debe ser colocado y extendido en capas de espesor similar, el proceso de compactación debe ejecutarse utilizando el equipo que asegure obtener el 100 % de la densidad medida, a través del procedimiento Proctor modificado (AASHTO T- 180) Las zonas inaccesibles para el equipo utilizado en la compactación, deben ser compactadas satisfactoriamente mediante el uso de compactadores vibratorios manuales mecánicos.

- ✓ Aplicación de liga: El riego de liga será aplicado sobre la base, la cual debe encontrarse completamente limpia. Debe usarse aire comprimido para asegurarse de que esté completamente limpia y libre de material suelto.

Teniendo preparada la superficie se aplicará un riego de liga en toda el área incluyendo las paredes, en proporciones que podrán variar desde 0,3 a 0,6 litros (0,08 a 0,15 galones) por metro cuadrado de superficie y se deberá colocar evitándose la formación de charcos.

- ✓ Colocación de concreto asfáltico: El espesor de la carpeta de asfalto será determinado por estudios previos o tomando de referencia el espesor del pavimento existente, pero en ningún caso podrá exceder a 10 centímetros de espesor. El material se extenderá a mano en una o dos capas de espesor similar, mediante el uso de carretillas de mano y rastrillos, evitando la segregación del material. El nivel terminado del bache debe quedar a ras del nivel de la rasante de la carretera.

La colocación de la mezcla asfáltica no debe efectuarse cuando el material base se encuentre en estado insatisfactorio o con señales de humedad. La compactación de la mezcla asfáltica deberá comenzar en los bordes y avanzar hacia el centro. Toda el área del bache debe quedar satisfactoriamente compactada, incluso aquellas áreas donde no llega el compactador mecánico. Debe cubrirse la mezcla con lona u otro material que la preserve del polvo y las alteraciones durante el trayecto.

- **Fresado y repavimentado**

El fresado o escarificación, consiste en moler la superficie del asfalto con una fresadora mecánica, eliminar los residuos de la superficie y utilizar de un 10 a 40 % de material reciclado en una nueva mezcla. La escarificación de la carpeta asfáltica permite que el

nuevo asfalto sea colocado sobre una superficie sólida. Previo al tendido del nuevo asfalto, debe realizarse un barrido del área para eliminar material suelto y debe colocarse un sello de liga (*tack coat*).

El asfalto se coloca utilizando una pavimentadora o manualmente, dependiendo del tamaño del trabajo. El fresado y repavimentado es una solución más duradera que la simple colocación de asfalto en baches, también es más agradable estéticamente ya que las áreas reparadas son cuadradas en lugar de agujeros rellenos al azar.

Si la subbase es inadecuada o hay problemas en el relleno de drenajes, el fresado y repavimentado no es una buena opción de rehabilitación.

Procedimiento de ejecución para el fresado:

Se podrá ordenar que se realice una prueba de carga, sobre cualquier superficie existente o sobre la superficie ya reacondicionada, con el propósito de detectar zonas inestables. Si se encontrare una condición inestable por debajo de la superficie, el material inadecuado será removido en toda el área afectada y hasta la profundidad que sea necesaria.

La superficie del pavimento a tratar, se nivelará a cada 20 metros como máximo. Para el proceso de escarificación y desintegración de la carpeta de rodadura, se utilizará una Pulverizadora Mezcladora o similar hasta una profundidad de 20 centímetros.

En vista de que el pavimento existente se debe escarificar y desintegrar, el material obtenido en esta operación, debe reducirse a un tamaño máximo de 1½ pulgadas, el cual será incorporado nuevamente a la estructura, no se producirán desperdicios en esta operación, con la sola excepción de aquellos volúmenes localizados de material inestable que pudieran contaminar la estructura, los cuales deben ser extraídos y removidos fuera de la zona de trabajo.

La humedad de compactación no debe variar en un 2 % de la humedad óptima. El equipo de compactación debe ser seleccionado de tal manera que permita obtener la densidad especificada.

El nivel final de la superficie no debe variar en más de 2 cm del nivel del pavimento existente.

3.11. Presupuesto para la solución del ahuellamiento usando micropavimento

3.11.1. Presupuesto de micropavimento para la calle Sevilla

Sevilla	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	366
Ancho de la calle	m.	6

Datos:

Longitud del tramo = 366 m

Ancho del tramo = 6 m

Precio unitario de micro pavimento = 6,880 bs / m²

Área del tramo = longitud * ancho

Área del tramo = 366 * 6

Área del tramo = 2196 m²

Costo de micropavimento = Área del tramo * precio unitario

Costo de micropavimento = 2196 * 6,880

Costo de micropavimento para la calle Sevilla = 15108,480 bs.

3.11.2. Presupuesto de micropavimento para la calle Ramón Rojas

Ramon Rojas	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	511
Ancho de la calle	m.	6

Datos:

Longitud del tramo = 511 m

Ancho del tramo = 6 m

Precio unitario de micro pavimento = 6,880 bs / m²

$$\text{Área del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho}$$

$$\text{Área del tramo} = 511 * 6$$

$$\text{Área del tramo} = 3066 \text{ m}^2$$

$$\text{Costo de micropavimento} = \text{Área del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo de micropavimento} = 3066 * 6,880$$

$$\text{Costo de micropavimento para la Ramon Rojas} = 21094,080 \text{ bs.}$$

3.11.3. Presupuesto de micropavimento para la calle María Claret

María Claret	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	237
Ancho de la calle	m.	6

Datos:

Longitud del tramo = 237 m

Ancho del tramo = 6 m

Precio unitario de micro pavimento = 6,880 bs / m²

$$\text{Área del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho}$$

$$\text{Área del tramo} = 237 * 6$$

$$\text{Área del tramo} = 1422 \text{ m}^2$$

$$\text{Costo de micropavimento} = \text{Área del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo de micropavimento} = 1422 * 6,880$$

Costo de micropavimento para la calle María Claret = 9783,360 bs.

3.11.4. Presupuesto de micropavimento para el tramo Guerrahuayco – San Andrés

Guerrahuayco – San Andrés	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	3450
Ancho de la calle	m.	7

Datos:

Longitud del tramo = 3450 m

Ancho del tramo = 7 m

Precio unitario de micro pavimento = 6,880 bs / m²

$$\text{Área del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho}$$

$$\text{Área del tramo} = 3450 * 7$$

$$\text{Área del tramo} = \mathbf{24150 \text{ m}^2}$$

$$\text{Costo de micropavimento} = \text{Área del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo de micropavimento} = 2450 * 6,880$$

Costo de micropavimento para el tramo Guerrahuayco –

San Andrés = 166152,000 bs.

3.11.5. Presupuesto de micropavimento para el tramo Monte Centro – cruce de San Pedro de Buena Vista

Monte Centro – cruce de San Pedro de Buena	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	2840
Ancho de la calle	m.	7

Datos:

Longitud del tramo = 2840 m

Ancho del tramo = 7 m

Precio unitario de micro pavimento = 6,880 bs / m²

Área del tramo = longitud x ancho

Área del tramo = 2840 * 7

Área del tramo = 19880 m²

Costo de micropavimento = Área del tramo * precio unitario

Costo de micropavimento = 19880 * 6,880

Costo de micropavimento para el tramo Monte Centro – cruce de San Pedro de Buena = 136774,400 bs.

3.12. Presupuesto para la solución del ahuellamiento mediante fresado y recapeo**3.12.1. Presupuesto de recapeo para la calle Sevilla**

Sevilla	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	366
Ancho de la calle	m.	6
Espesor de carpeta asfáltica	cm	5

Datos:

Longitud del tramo = 366 m

Ancho del tramo = 6 m

Espesor de carpeta asfáltica= 5cm = 0,05 m

Precio unitario de membrana vicoelastoplastica = 62,970 bs / m²

Precio unitario de carpeta asfáltica = 58, 920 bs / m³

- Costo para la membrana vicoelastoplastica:

$$\text{Área del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho}$$

$$\text{Área del tramo} = 366 * 6$$

$$\text{Área del tramo} = \mathbf{2196 \text{ m}^2}$$

$$\text{Costo} = \text{Área del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo} = 2196 * 62,970$$

$$\text{Costo de la membrana vicoelastoplastica} = \mathbf{138282,120 \text{ bs.}}$$

- Costo para la carpeta asfáltica:

$$\text{Volumen del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho} * \text{espesor}$$

$$\text{volumen del tramo} = 366 * 6 * 0,05$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{109,8 \text{ m}^3}$$

$$\text{Costo} = \text{volumen del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo} = 109,8 * 58,920$$

$$\text{Costo para la carpeta asfáltica} = \mathbf{6469,416 \text{ bs.}}$$

$$\text{Costo de fresado y recapeo para la calle Sevilla} = 138282,120 \text{ bs.} + 6469,416 \text{ bs.}$$

$$\text{Costo de fresado y recapeo para la calle Sevilla} = \mathbf{144751,536 \text{ bs.}}$$

3.12.2. Presupuesto de recapeo para la calle Ramón Rojas

Ramon Rojas	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	511
Ancho de la calle	m.	6
Espesor de carpeta asfáltica	cm	5

Datos:

Longitud del tramo = 511 m

Ancho del tramo = 6 m

Espesor de carpeta asfáltica= 5cm = 0,05 m

Precio unitario de membrana vicoelastoplastica = 62,970 bs / m²

Precio unitario de carpeta asfáltica = 58, 920 bs / m³

- Costo para la membrana vicoelastoplastica:

$$\text{Área del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho}$$

$$\text{Área del tramo} = 511 * 6$$

$$\text{Área del tramo} = 3066 \text{ m}^2$$

$$\text{Costo} = \text{Área del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo} = 3066 * 62,970$$

$$\text{Costo de la membrana vicoelastoplastica} = 193066,020 \text{ bs.}$$

- Costo para la carpeta asfáltica:

$$\text{Volumen del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho} * \text{espesor}$$

$$\text{volumen del tramo} = 511 * 6 * 0,05$$

$$\text{volumen del tramo} = 153,300 \text{ m}^3$$

Costo = volumen del tramo * precio unitario

$$\text{Costo} = 153,300 * 58,920$$

Costo para la carpeta asfáltica = 9032,440 bs.

Costo de fresado y recapeo = 193066,020 bs. + 9032,440 bs.

Costo de fresado y recapeo para la calle Ramon Rojas = 202098,460 bs.

3.12.3. Presupuesto de recapeo para la calle María Claret

María Claret	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	237
Ancho de la calle	m.	6
Espesor de carpeta asfáltica	cm	5

Datos:

Longitud del tramo = 237 m

Ancho del tramo = 6 m

Espesor de carpeta asfáltica= 5cm =0,05 m

Precio unitario de membrana vicoelastoplastica = 62,970 bs / m²

Precio unitario de carpeta asfáltica = 58, 920 bs / m³

- Costo para la membrana vicoelastoplastica:

Área del tramo = longitud * ancho

$$\text{Área del tramo} = 237 * 6$$

Área del tramo = 1422 m²

Costo = Área del tramo * precio unitario

$$\text{Costo} = 1422 * 62,970$$

Costo de la membrana vicoelastoplastica = 80543,340 bs.

- Costo para la carpeta asfáltica:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor

volumen del tramo = $237 * 6 * 0,05$

volumen del tramo = 71,100 m³

Costo = volumen del tramo * precio unitario

Costo = $71,100 * 58,920$

Costo para la carpeta asfáltica = 4189,210 bs.

Costo de fresado y recapeo = 80543,340 bs. + 4189,210 bs.

Costo de fresado y recapeo para la calle María Claret = 84732,550 bs.

3.12.4. Presupuesto de recapeo para el tramo Guerrahuayco – San Andrés

Guerrahuayco – San Andrés	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	3450
Ancho de la calle	m.	7
Espesor de carpeta asfáltica	cm	7

Datos:

Longitud del tramo = 3450 m

Ancho del tramo = 7 m

Espesor de carpeta asfáltica = 7cm = 0,07 m

Precio unitario de membrana vicoelastoplastica = 62,970 bs / m²

Precio unitario de carpeta asfáltica = 58, 920 bs / m³

- Costo para la membrana vicoelastoplastica:

$$\text{Área del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho}$$

$$\text{Área del tramo} = 3450 * 7$$

$$\text{Área del tramo} = \mathbf{24150 \text{ m}^2}$$

$$\text{Costo} = \text{Área del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo} = 24150 * 62,970$$

$$\text{Costo de la membrana vicoelastoplastica} = \mathbf{1520725,500 \text{ bs.}}$$

- Costo para la carpeta asfáltica:

$$\text{Volumen del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho} * \text{espesor}$$

$$\text{volumen del tramo} = 3450 * 7 * 0,07$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{1690,500 \text{ m}^3}$$

$$\text{Costo} = \text{volumen del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo} = 1690,500 * 58,920$$

$$\text{Costo para la carpeta asfáltica} = \mathbf{99604,260 \text{ bs.}}$$

$$\text{Costo de fresado y recapeo} = 1520725,500 \text{ bs.} + 99604,260 \text{ bs.}$$

$$\text{Costo de fresado y recapeo para el tramo Guerrahuayco} -$$

$$\text{San Andrés} = \mathbf{1620329,760 \text{ bs.}}$$

3.12.5. Presupuesto de recapeo para el tramo Monte Centro – cruce de San Pedro de Buena Vista

Monte Centro – cruce de San Pedro de Buena	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	2840
Ancho de la calle	m.	7
Espesor de carpeta asfáltica	cm	6

Datos:

Longitud del tramo = 2840 m

Ancho del tramo = 7 m

Espesor de carpeta asfáltica = 6 cm = 0,06 m

Precio unitario de membrana vicoelastoplastica = 62,970 bs / m²

Precio unitario de carpeta asfáltica = 58, 920 bs / m³

- Costo para la membrana vicoelastoplastica:

$$\text{Área del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho}$$

$$\text{Área del tramo} = 2840 * 7$$

$$\text{Área del tramo} = \mathbf{19880 \text{ m}^2}$$

$$\text{Costo} = \text{Área del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo} = 19880 * 62,970$$

$$\text{Costo de la membrana vicoelastoplastica} = \mathbf{1251843,600 \text{ bs.}}$$

- Costo para la carpeta asfáltica:

$$\text{Volumen del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho} * \text{espesor}$$

$$\text{volumen del tramo} = 2840 * 7 * 0,06$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{1192,800 \text{ m}^3}$$

Costo = volumen del tramo * precio unitario

Costo = 1192,800 * 58,920

Costo para la carpeta asfáltica = 70279,770 bs.

Costo de fresado y recapeo = 1251843,600 bs. + 70279,770 bs.

Costo de fresado y recapeo para el tramo Monte Centro – cruce de San Pedro de Buena Vista= 1322123,380 bs.

3.13. Presupuesto para la solución del ahuellamiento mediante reconstrucción

3.13.1. Presupuesto de reconstrucción para la calle Sevilla

Sevilla	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	366
Ancho de la calle	m.	6
Espesor de carpeta asfáltica	cm	5
Espesor capa base	cm	20
Espesor capa sub-base	cm	20

Datos:

Longitud del tramo = 366 m

Ancho del tramo = 6 m

Espesor de carpeta asfáltica= 5cm = 0,05 m

Precio unitario de demolición = 165,870 bs / m³

Precio unitario de capa sub-base= 153,780 bs / m³

Precio unitario de capa base= 164,540 bs / m³

Precio unitario de imprimación = 21,650 bs / m³

Precio unitario de carpeta asfáltica = 2993,34 bs / m³

- Costo para la demolición:
 - Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor
 - volumen del tramo = $366 * 6 * 0,45$
 - **volumen del tramo = 988,200 m³**
 - Costo = $988,200 * 165,870$
 - **Costo de la demolición= 163912,734 bs.**

- Costo para la capa sub-base:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor de la capa sub-base

$$\text{volumen del tramo} = 366 * 6 * 0,20$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{439,200 \text{ m}^3}$$

$$\text{Costo} = 439,200 * 153,78$$

$$\text{Costo de la capa sub-base} = \mathbf{67540,18 \text{ bs.}}$$

- Costo para la base:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor de la capa base

$$\text{volumen del tramo} = 366 * 6 * 0,20$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{439,200 \text{ m}^3}$$

$$\text{Costo} = 439,200 * 164,54$$

$$\text{Costo de la capa base} = \mathbf{72265,970 \text{ bs.}}$$

- Costo para la imprimación:

Área del tramo = longitud * ancho

$$\text{Área del tramo} = 366 * 6$$

Área del tramo = 2196 m²

Costo = Área del tramo * precio unitario

Costo = 2196 * 21,65

Costo de la imprimación = 47543,400 bs.

- Costo para la carpeta asfáltica:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor

volumen del tramo = 366 * 6 * 0,05

volumen del tramo = 109,800 m³

Costo = volumen del tramo * precio unitario

Costo = 109,800 * 2993,34

Costo para la carpeta asfáltica = 328668,730 bs.

Costo de reconstrucción = 163912,734 bs. + 67540,18 bs. + 72265,970 bs. + 47543,400 bs. + 328668,730 bs.

Costo de reconstrucción para la calle Sevilla = 679931,014 bs.

3.13.2. Presupuesto de reconstrucción para la calle Ramón Rojas

Ramon Rojas	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	511
Ancho de la calle	m.	6
Espesor de carpeta asfáltica	cm	5
Espesor capa base	cm	20
Espesor capa sub-base	cm	20

Datos:

Longitud del tramo = 511 m

Ancho del tramo = 6 m

Espesor de carpeta asfáltica= 5cm = 0,05 m

Precio unitario de demolición = 165,870 bs / m³

Precio unitario de capa sub-base= 153,780 bs / m³

Precio unitario de capa base= 164,540 bs / m³

Precio unitario de imprimación = 21,650 bs / m³

Precio unitario de carpeta asfáltica = 2993,34 bs / m³

- Costo para la demolición:
 - Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor
 - volumen del tramo = 511 * 6 * 0,45
 - **volumen del tramo = 1379,700 m³**
 - Costo = 1379,700 * 165,870
 - **Costo de la demolición= 228850,839 bs.**

- Costo para la capa sub-base:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor de la capa sub-base

volumen del tramo = 511 * 6 * 0,20

volumen del tramo = 613,200 m³

Costo = 613,200 * 153,78

Costo de la capa sub-base = 94297,89 bs.

- Costo para la base:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor de la capa base

$$\text{volumen del tramo} = 511 * 6 * 0,20$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{613,200 \text{ m}^3}$$

$$\text{Costo} = 613,200 * 164,54$$

$$\text{Costo de la capa base} = \mathbf{100895,928 \text{ bs.}}$$

- Costo para la imprimación:

$$\text{Área del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho}$$

$$\text{Área del tramo} = 511 * 6$$

$$\text{Área del tramo} = \mathbf{3066 \text{ m}^2}$$

$$\text{Costo} = \text{Área del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo} = 3066 * 21,65$$

$$\text{Costo de la imprimación} = \mathbf{66378,900 \text{ bs.}}$$

- Costo para la carpeta asfáltica:

$$\text{Volumen del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho} * \text{espesor}$$

$$\text{volumen del tramo} = 511 * 6 * 0,05$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{153,33 \text{ m}^3}$$

$$\text{Costo} = \text{volumen del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo} = 153,33 * 2993,34$$

$$\text{Costo para la carpeta asfáltica} = \mathbf{458879,022 \text{ bs.}}$$

$$\text{Costo de reconstrucción para la calle Ramon Rojas} = \mathbf{949302,585 \text{ bs.}}$$

3.13.3. Presupuesto de reconstrucción para la calle María Claret

María Claret	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	237
Ancho de la calle	m.	6
Espesor de carpeta asfáltica	cm	5
Espesor capa base	cm	20
Espesor capa sub-base	cm	20

Datos:

Longitud del tramo = 237 m

Ancho del tramo = 6 m

Espesor de carpeta asfáltica= 5cm =0,05 m

Precio unitario de demolición = 165,870 bs / m³

Precio unitario de capa sub-base= 153,780 bs / m³

Precio unitario de capa base= 164,540 bs / m³

Precio unitario de imprimación = 21,650 bs / m³

Precio unitario de carpeta asfáltica = 2993,34 bs / m³

- Costo para la demolición:
 - Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor
 - volumen del tramo = $237 * 6 * 0,45$
 - **volumen del tramo = 639,900 m³**
 - Costo = $639,900 * 165,870$
 - **Costo de la demolición= 106140,213 bs.**
- Costo para la capa sub-base:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor de la capa sub-base

$$\text{volumen del tramo} = 237 * 6 * 0,20$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{284,40 \text{ m}^3}$$

$$\text{Costo} = 284,40 * 153,78$$

$$\text{Costo de la capa sub-base} = \mathbf{43735,032 \text{ bs.}}$$

- Costo para la base:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor de la capa base

$$\text{volumen del tramo} = 237 * 6 * 0,20$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{284,400 \text{ m}^3}$$

$$\text{Costo} = 284,400 * 164,54$$

$$\text{Costo de la capa base} = \mathbf{46795,176 \text{ bs.}}$$

- Costo para la imprimación:

Área del tramo = longitud * ancho

$$\text{Área del tramo} = 237 * 6$$

$$\text{Área del tramo} = \mathbf{1422 \text{ m}^2}$$

Costo = Área del tramo * precio unitario

$$\text{Costo} = 1422 * 21,65$$

$$\text{Costo de la imprimación} = \mathbf{30786,300 \text{ bs.}}$$

- Costo para la carpeta asfáltica:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor

$$\text{volumen del tramo} = 237 * 6 * 0,05$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{71,100 \text{ m}^3}$$

Costo = volumen del tramo * precio unitario

$$\text{Costo} = 71,100 * 2993,34$$

Costo para la carpeta asfáltica = 212826,474 bs.

Costo de reconstrucción para la calle María Claret = 440283,195 bs.

3.13.4. Presupuesto de reconstrucción para el tramo Guerrahuayco – San Andrés

Guerrahuayco – San Andrés	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	3450
Ancho de la calle	m.	7
Espesor de carpeta asfáltica	cm	7
Espesor capa base	cm	25
Espesor capa sub-base	cm	25

Datos:

Longitud del tramo = 3450 m

Ancho del tramo = 7 m

Espesor de carpeta asfáltica = 7cm = 0,07 m

Precio unitario de demolición = 165,870 bs / m³

Precio unitario de capa sub-base= 153,780 bs / m³

Precio unitario de capa base= 164,540 bs / m³

Precio unitario de imprimación = 21,650 bs / m³

Precio unitario de carpeta asfáltica = 2993,34 bs / m³

- Costo para la demolición:
 - Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor
 - volumen del tramo = 3450 * 7 * 0,47

- **volumen del tramo = 11350,500 m³**

- Costo = $11350,500 * 165,870$

- **Costo de la demolición = 1882707.435 bs.**

- Costo para la capa sub-base:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor de la capa sub-base

$$\text{volumen del tramo} = 3450 * 7 * 0,25$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{6037,500 \text{ m}^3}$$

$$\text{Costo} = 6037,500 * 153,78$$

$$\text{Costo de la capa sub-base} = \mathbf{928446,750 \text{ bs.}}$$

- Costo para la base:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor de la capa base

$$\text{volumen del tramo} = 3450 * 7 * 0,25$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{6037,500 \text{ m}^3}$$

$$\text{Costo} = 6037,500 * 164,54$$

$$\text{Costo de la capa base} = \mathbf{72265,970 \text{ bs.}}$$

- Costo para la imprimación:

Área del tramo = longitud * ancho

$$\text{Área del tramo} = 3450 * 7$$

$$\text{Área del tramo} = \mathbf{24150 \text{ m}^2}$$

Costo = Área del tramo * precio unitario

$$\text{Costo} = 24150 * 21,65$$

$$\text{Costo de la imprimación} = \mathbf{522847,500 \text{ bs.}}$$

- Costo para la carpeta asfáltica:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor

volumen del tramo = 3450 * 7 * 0,07

volumen del tramo = 1690,500 m³

Costo = volumen del tramo * precio unitario

Costo = 1690,500 * 2993,34

Costo para la carpeta asfáltica = 5060241,270 bs.

Costo de reconstrucción para el tramo Guerrahuayco –

San Andrés = 9387653,205 bs.

3.13.5. Presupuesto de reconstrucción para el tramo Monte Centro – cruce de San Pedro de Buena Vista

Monte Centro – cruce de San Pedro de Buena	Unidad	Cantidad
Longitud del tramo	m.	2840
Ancho de la calle	m.	7
Espesor de carpeta asfáltica	cm	6
Espesor capa base	cm	25
Espesor capa sub-base	cm	20

Datos:

Longitud del tramo = 2840 m

Ancho del tramo = 7 m

Espesor de carpeta asfáltica = 6 cm = 0,06 m

Precio unitario de demolición = 165,870 bs / m³

Precio unitario de capa sub-base= 153,780 bs / m³

Precio unitario de capa base= 164,540 bs / m³

Precio unitario de imprimación = 21,650 bs / m³

Precio unitario de carpeta asfáltica = 2993,34 bs / m³

- Costo para la demolición:
 - Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor
 - volumen del tramo = 2840 * 7 * 0,47
 - **volumen del tramo = 9343,600 m³**
 - Costo = 9343,600 * 165,870
 - **Costo de la demolición= 1549822,932 bs.**

- Costo para la capa sub-base:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor de la capa sub-base

volumen del tramo = 2840 * 7 * 0,20

volumen del tramo = 3976 m³

Costo = 3976 * 153,78

Costo de la capa sub-base = 611429,280 bs.

- Costo para la base:

Volumen del tramo = longitud * ancho * espesor de la capa base

volumen del tramo = 2840 * 7 * 0,25

volumen del tramo = 4970 m³

Costo = 4970 * 164,54

Costo de la capa base = 817763,800 bs.

- Costo para la imprimación:

$$\text{Área del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho}$$

$$\text{Área del tramo} = 2840 * 7$$

$$\text{Área del tramo} = \mathbf{19880 \text{ m}^2}$$

$$\text{Costo} = \text{Área del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo} = 19880 * 21,65$$

$$\text{Costo de la imprimación} = \mathbf{430402 \text{ bs.}}$$

- Costo para la carpeta asfáltica:

$$\text{Volumen del tramo} = \text{longitud} * \text{ancho} * \text{espesor}$$

$$\text{volumen del tramo} = 2840 * 7 * 0,06$$

$$\text{volumen del tramo} = \mathbf{1192,800 \text{ m}^3}$$

$$\text{Costo} = \text{volumen del tramo} * \text{precio unitario}$$

$$\text{Costo} = 1192,800 * 2993,34$$

$$\text{Costo para la carpeta asfáltica} = \mathbf{3570455,952 \text{ bs.}}$$

Costo de reconstrucción para el tramo Monte Centro – cruce de San Pedro de Buena Vista= 6979873,964 bs.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

El objetivo fundamental de este proyecto era aplicar modelos de predicción de ahuellamiento en pavimentos flexibles de nuestra región; de tal manera, se pueda determinar la condición de esta falla, su grado de severidad y el comportamiento de este deterioro conforme el tiempo y aportar una alternativa de solución al ahuellamiento en los tramos de estudio.

Una vez finalizado el trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se realizó la medición del ahuellamiento de los tramos ya sea urbanos o rurales obteniendo los siguientes resultados de ahuellamiento promedio de cada tramo de estudio:

Ahuellamientos en tramos urbanos:

Tramo	Ahuellamiento promedio (mm)
calle Sevilla	3,550
calle Ramón Rojas	2,500
calle María Claret	4,300

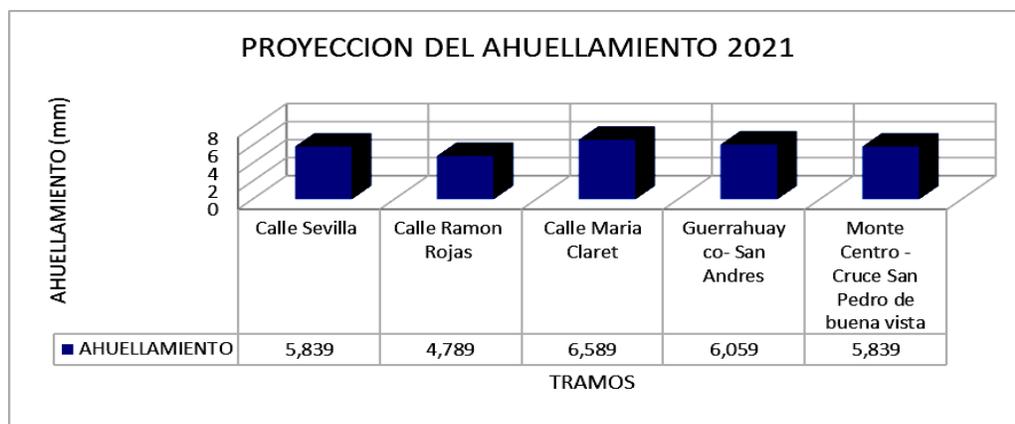
Ahuellamientos en tramos rurales:

Tramo	Ahuellamiento promedio (mm)
Guerrahuayco- San Andrés	3,770
Monte Centro - cruce San Pedro de Buena Vista	2,820

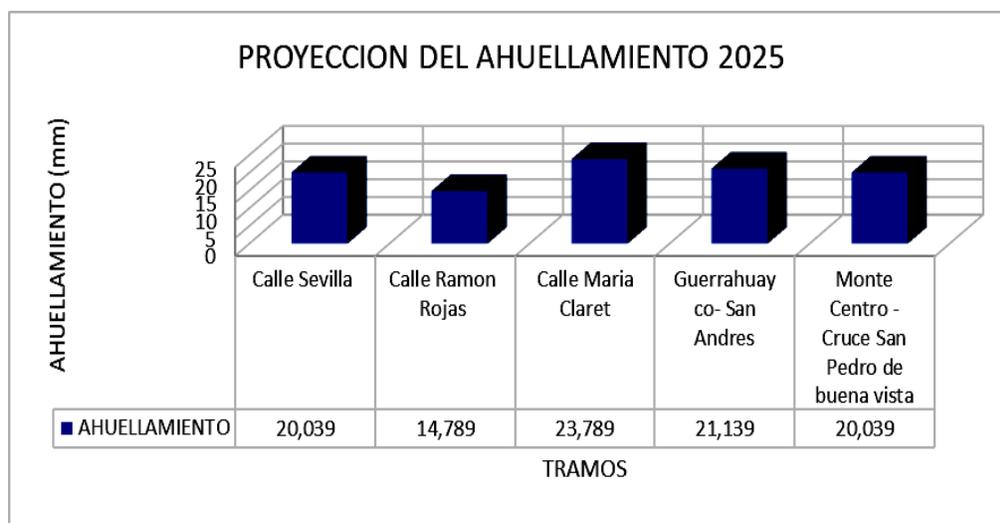
- La formación de ahuellamientos en los tramos estudiados tiene lugar especialmente en las áreas urbanas, como en semáforos e intersecciones, donde la velocidad del tráfico pesado es baja y las tensiones son mayores. Además, la formación de ahuellamientos puede tener lugar en los días calurosos de verano.
- Los ahuellamientos en los tramos estudiados, tanto urbanos como rurales se generan en la carpeta asfáltica y no en las capas inferiores por que al ser un ahuellamiento en capas inferiores sería muy notorio el tipo de falla y muy

preocupante porque se tendría que hacer una reconstrucción total del paquete estructural, debido a que la capa bases se contaminó con la sub-base y a la vez la carpeta asfáltica con la sub-base.

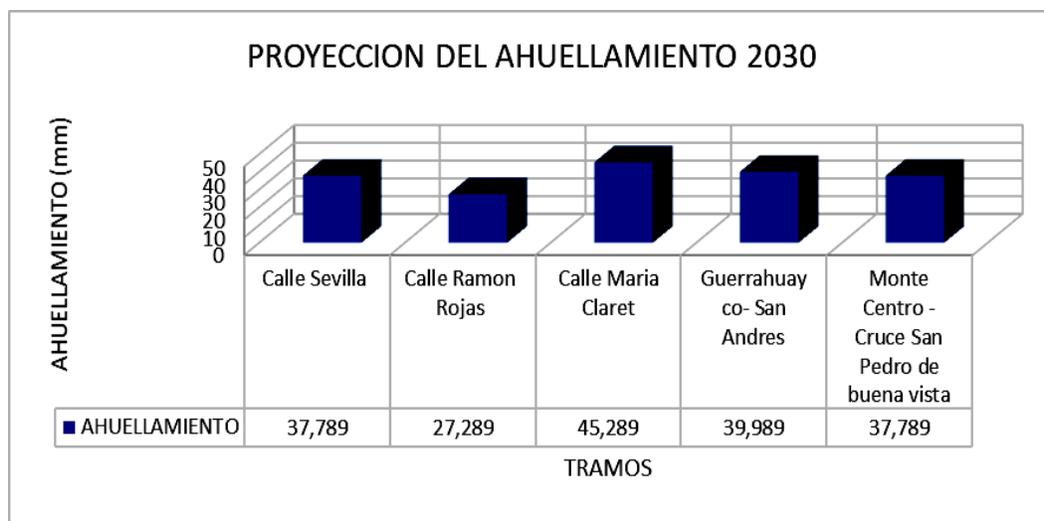
- Actualmente se puede concluir que los tramos de estudio tanto urbanos como rurales presentan un nivel de severidad bajo de ahuellamiento, con un ahuellamiento de severidad menor a 5 mm.
- Asimismo, del análisis realizado a cada tramo urbano, se determinó que la calle María Claret tiene mayor ahuellamiento promedio de 4,300 mm, y es el tramo que presenta más daños a comparación con los otros tramos estudiados.
- El pavimento flexible del tramo “Monte Centro – cruce San Pedro de Buena Vista” está superficialmente en una condición regular y tiene un ahuellamiento promedio de 2,820 mm, siendo menor que el tramo Guerrahuayco – San Andrés que tiene un ahuellamiento promedio de 3,770 mm según los resultados obtenidos.
- Al clasificar el grado de severidad del ahuellamiento obtuvimos que el tramo Guerrahuayco – San Andrés es el que mayor severidad tiene a comparación de los demás tramos en estudio.
- Los modelos de predicción del rendimiento representan un elemento clave de los sistemas de gestión de activos de infraestructura vial o de los sistemas de gestión de pavimentos. Por lo tanto, la implementación exitosa de estos sistemas depende en gran medida del modelo de predicción de rendimiento utilizado, ya que la precisión de las predicciones determina la razonabilidad de las decisiones.
- Se puede concluir que los modelos de predicción de ahuellamiento desarrollado en Argentina, Perú y Colombia, se pueden utilizar con mayor confiabilidad en las herramientas efectivas para analizar la formación de ahuellamientos en pavimentos asfálticos en los siguientes años.
- De acuerdo a los valores obtenidos de la predicción del ahuellamiento en los tramos de estudio utilizando la ecuación de Argentina se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en los gráficos siguientes:



Se puede ver que para el año 2021, los ahuellamientos de los tramos presentan una severidad media comprendida entre 5 mm – 10 mm.



Se observa que la proyección del ahuellamiento para el año 2025 muestra valores de ahuellamiento mayores a 10 mm, los cuales se encontrarían en un nivel de severidad alto.



De igual forma se observa que para el año 2030 los valores de ahuellamiento son mayores a 10 mm, los cuales se encontrarían en un nivel de severidad alta.

- Asimismo, se obtuvo los resultados con la ecuación de predicción de Colombia (ver en el Anexo 4), estos resultados varían con muy poco; obteniendo para el año 2021 un ahuellamiento entre 5 – 10 mm con una severidad media, para el año 2025 y 2030 ahuellamientos mayores a 10 mm mostrando un grado de severidad alto,
- De esta forma con la aplicación de los modelos de predicción de ahuellamiento en pavimentos flexibles, se logró determinar la condición de esta falla, su grado de severidad y el comportamiento de este deterioro conforme el tiempo.
- Con la ayuda del programa SPSS, se pudo encontrar el grado de confiabilidad de los modelos de predicción de ahuellamiento utilizados, así mismo se pudo validar los datos obtenidos en campo.
- A pesar de que el pavimento flexible esté en buen estado superficial y estructuralmente, se debe realizar las operaciones de mantenimiento recomendadas para alargar su vida útil y prevenir o controlar su deterioro. Las operaciones de mantenimiento y rehabilitación adecuadas se las debe realizar en función a las fallas y condición del pavimento flexible.

- Las intervenciones planteadas para el deterioro de ahuellamiento menor a 5 mm. corresponden a mantenimientos; las cuales se realizarán una microcarpeta.
- Para deterioros de ahuellamiento con severidad de 5 mm. A 10 mm. corresponde a trabajos de recapeo y el uso de una membrana viscoelastoplástica.
- Para deterioros de ahuellamiento con severidad mayor a 10 mm. corresponde a trabajos de reconstrucción.
- Con la siguiente tabla se puede seguir un plan de mantenimiento de los tramos dependiendo el grado de severidad proyectado con los tres modelos de predicción utilizados.

Tramo	Propuesta de solución al ahuellamiento		
	Actual (2020)	2022	2024
Calle Sevilla	microcarpeta	fresado y recapeo	reconstrucción
Calle Ramon Rojas	microcarpeta	fresado y recapeo	reconstrucción
Calle María Claret	microcarpeta	fresado y recapeo	reconstrucción
Guerrahuyco- San Andrés	microcarpeta	fresado y recapeo	reconstrucción
Monte Centro - Cruce San Pedro de Buena Vista	microcarpeta	fresado y recapeo	reconstrucción

- Con plan de mantenimiento se pudo incluir un presupuesto para cada tramo de estudio ya sea tramos urbanos o tramos rurales.
- Las causas que generan los ahuellamientos en el pavimento, deben ser estudiadas, debido a que forman parte importante en la toma de decisiones para su reparación, porque si reparamos únicamente la carpeta de rodadura y nuestra falla proviene de capas inferiores es muy probable que esta vuelva a causar problemas en un futuro muy próximo.
- Una incorrecta selección del método de reparación del ahuellamiento representa pérdidas económicas porque las fallas serían recurrentes, no obstante, la selección del método se basa no solo en el tipo de falla, sino también mediante factores económicos y es en este punto en el que se obtiene una discrepancia y debe ser atendida.

- Para que un pavimento sea duradero debe: ser bien diseñado, seguir estrictamente las especificaciones técnicas de materiales y equipo, asegurarse de tener una correcta ejecución y métodos constructivos.
- Como esta falla es la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes, es necesario incrementar la resistencia de las mezclas no solo utilizando cemento asfáltico más viscoso, sino también asfalto que se comporte más como un sólido elástico a altas temperaturas del pavimento y así tenga una mejor recuperación elástica que evite el ahuecamiento.
- El micropavimento es una mezcla asfáltica de alto rendimiento para protección, compuesta por agregados, emulsión asfáltica, filler mineral, y agua, la cual es aplicada de manera efectiva como sello de pavimentos envejecidos, sello de grietas superficiales, detienen la desintegración y dotan de propiedades antideslizantes, también cuenta con propiedades impermeabilizantes. Se aplica para mantenimiento preventivo o correctivo con espesores desde 3 a 10 mm.
- Al elegir qué tipo de geotextil se debe emplear en la adherencia con el asfalto, se consideró que las probetas o muestras del material deben presentar ciertas propiedades físicas para su correcto comportamiento de adherencia. Tales propiedades físicas como; el gramaje, que nos indica la masa por unidad de superficie.
- Estudios realizados por la empresa Geosistemas PAVCO, indican que $\frac{2}{3}$ de los esfuerzos transmitidos por las cargas de tráfico son absorbidos y soportados por el ligante asfáltico que posee el conjunto adherencia geotextil/asfalto. El restante $\frac{1}{3}$ es soportado por el material geotextil empleado. Esto no quiere decir que ambos materiales trabajen de manera separada, sino que la combinación de las propiedades y funciones específicas del conjunto adherencia geotextil/asfalto brindan un comportamiento ideal, como, por ejemplo, frente al fenómeno de reflejo de fisuras en un recapado de concreto asfáltico. Por tanto, dicha membrana viscoelastoplástica debe estar bien fundamentada en la idea de conjunto adherencia.

4.2. Recomendaciones

Se sugiere las siguientes recomendaciones para facilitar la realización de futuros trabajos:

- Contar con todos los equipos de seguridad necesarios para realizar la evaluación en campo como ser, conos, chalecos fosforescentes, etc. ya que, al ser mayormente tramos de caminos, los vehículos se trasladan a grandes velocidades.
- Al momento de realizar la toma de datos de ahuellamiento, se deberá ser muy precisos para realizar una toma de datos adecuada, asimismo se debe contar con colaboradores y con los equipos de seguridad necesarios para la evaluación en campo.
- No se debe medir el ahuellamiento en singularidades, tales como puentes, tapas de alcantarilla u otras que alteren localmente el perfil transversal del carril.
- Luego de haber analizado el ahuellamiento y el estado en el que se encuentra el pavimento en los tramos de estudio, se recomienda realizar un correcto mantenimiento periódico, descrito en el Capítulo III. Una incorrecta selección del método de reparación representa pérdidas económicas porque las fallas por ahuellamiento serían recurrentes, no obstante, la selección del método se basa no solo en el grado de severidad del ahuellamiento, sino también mediante factores económicos y es en este punto en el que se obtiene una discrepancia y debe ser atendida.
- Se recomienda realizar un mejor control de calidad de los materiales y del proceso constructivo que se utilizan en la construcción de las capas del pavimento, puesto que, de eso depende el tiempo de servicio al que puede estar abierto al tránsito sin generar incomodidad en los usuarios.
- Es muy importante hacer una correcta elección del tipo de ligante asfáltico de acuerdo a la zona donde será colocada la mezcla asfáltica, para evitar que la temperatura influya en gran medida en la deformabilidad de la mezcla asfáltica.

- En cuanto al uso del asfalto solo puede ser calentado tres veces, si se supera esta restricción el producto presentará una variación considerable en sus propiedades físicas y químicas lo cual conlleva a que el material se torne inutilizable e inaplicable en cualquier práctica de laboratorio u obra civil.
- Es recomendable no realizar trabajos en condiciones húmedas o saturadas. Seguir al pie de la letra las técnicas recomendadas para la aplicación de los materiales y, sobre todo, revisar las especificaciones y calidad de los materiales que se emplean.
- Es de suma importancia la implementación de sistemas y métodos de seguridad ocupacional en las obras de carreteras, para salvaguardar la vida humana y evitar disgustos y problemas con los usuarios de la vía.
- Asimismo, implementar un plan de gestión de conservación vial, el cual, se debe centrar en un continuo monitoreo del ahuellamiento y se debe aplicar el mantenimiento preventivo antes de que se formen ahuellamientos de gran consideración y su reparación perjudique la condición operacional en la vía.

