

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Guía para la implementación de pavimentos flexibles en la región oriente  
de Guatemala

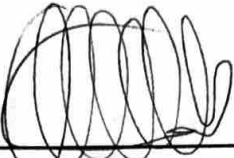
Trabajo de graduación presentado por Jose Vinnicio Mendoza Cappa para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

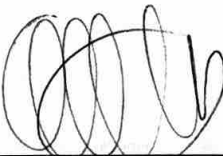
2024




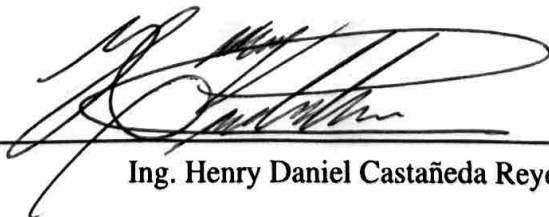
Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Alvaro José Rubio Haasler

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Alvaro José Rubio Haasler

(f)   
Ing. Andrés Fernando Herrera

(f)   
Ing. Henry Daniel Castañeda Reyes

Fecha de aprobación: Guatemala, 08 de enero de 2024.

# CONTENIDO

	Página
<b>LISTA DE CUADROS</b> . . . . .	VIII
<b>LISTA DE FIGURAS</b> . . . . .	X
<b>LISTADO DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES</b> . . . . .	XI
<b>RESUMEN</b> . . . . .	XII
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> . . . . .	1
<b>II. JUSTIFICACIÓN</b> . . . . .	2
<b>III. IMPORTANCIA</b> . . . . .	3
<b>IV. OBJETIVOS</b> . . . . .	4
A. Objetivo general . . . . .	4
B. Objetivos específicos . . . . .	4
<b>V. MARCO TEORICO</b> . . . . .	5
A. Carreteras en Guatemala . . . . .	5
1. Tipología de carreteras . . . . .	5
2. Clasificación a nivel nacional . . . . .	5
3. Tipos de rodadura . . . . .	7
B. Pavimento asfáltico . . . . .	7
1. Asfalto . . . . .	7
2. Asfaltos para pavimentos . . . . .	8
3. Agregados . . . . .	9
4. Pavimentos con cinta asfáltica . . . . .	9
5. Base y subbase . . . . .	9
6. Causas y reparación de fisuras . . . . .	10
7. Causas y reparación de deformaciones . . . . .	12
8. Desprendimientos . . . . .	14
9. Afloramientos . . . . .	15
C. Mantenimiento de pavimentos . . . . .	16
1. Definición de mantenimiento . . . . .	16
2. Mantenimiento de obras de drenaje . . . . .	16
3. Fallas en el pavimento . . . . .	17
4. Capacitación y personal competente . . . . .	17
D. Pavimento flexible en la región de estudio . . . . .	18
1. Clima monzónico . . . . .	18

E.	Pavimento flexible en condiciones extremas	21
1.	Altas temperaturas	21
2.	Precipitación	21
F.	Uso del asfalto en la región	22
1.	Flexibilidad y adaptabilidad a la humedad y movimientos del suelo	22
2.	Facilidad y costo del mantenimiento	22
3.	Costos de construcción	22
4.	Capacidad de absorber esfuerzos dinámicos	22
5.	Menor impacto en la operación del tráfico	22
G.	Casos de estudio del pavimento en climas tropicales o extremos	22
1.	Prueba piloto - Izabal	22
2.	Estados Unidos	24
3.	Malasia	26
4.	Pensilvania	28
5.	Ciudad de México	30
H.	Variables de diseño de pavimentos flexibles (asfalto)	33
1.	Tiempo	33
2.	Tráfico	34
I.	Confiabilidad	35
1.	Impacto ambiental	36
J.	Comportamiento del pavimento flexible (asfalto)	36
1.	Serviciabilidad	36
2.	Ahullamiento permisible	37
3.	Pérdida de agregados	37
K.	Propiedades del material en el diseño estructural	39
1.	Módulo resiliente efectivo de subrasante	39
2.	Módulo efectivo de reacción de la subrasante	39
3.	Caracterización de los materiales de las capas del pavimento flexible (asfalto)	39
4.	Coefficientes de capa	42
L.	Características estructurales del pavimento flexible (asfalto)	48
1.	Drenaje	48
M.	Diseño de pavimentos flexibles (asfalto)	50
1.	Determinación del número estructural	50
2.	Construcción por etapas	51
3.	Espesores de capa	51
4.	Análisis del diseño por capas	52
<b>VI.</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>54</b>
A.	FASE 1. Recolección de datos	54
B.	FASE 2. Secuencia de procedimientos	54
1.	Etapa 01 - ordenamiento y clasificación de datos	54
2.	Etapa - 02 Análisis de datos	54

C. Generación de resultados . . . . .	55
D. Presentación . . . . .	55
<b>VII. RESULTADOS Y DISCUSION . . . . .</b>	<b>56</b>
<b>VIII. CONCLUSIONES . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>IX. RECOMENDACIONES . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>X. BIBLIOGRAFÍA . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>XI. APÉNDICES . . . . .</b>	<b>63</b>
A. CA-9 Norte - Los Amates, Izabal . . . . .	63
B. CA-13 - Morales/Livingston, Izabal . . . . .	66
C. CA-9 Norte - Puerto Barrios, Izabal . . . . .	71

**LISTA DE CUADROS**

**Cuadro**

**Página**

1 Resultados de casos de estudio ..... 58

## LISTA DE FIGURAS

Ilustración		Página
1	Mapa de carreteras centroamericanas de Guatemala en el 2014 (Dirección General de Caminos, 2017).	6
2	Mapa de carreteras nacionales de Guatemala en el 2014 (Dirección General de Caminos, 2017).	6
3	Longitud de carreteras según clasificación y tipo de rodadura (Dirección General de Caminos, 2019; Ferrovia, 2021).	7
4	Piel de cocodrilo (Km. 250 CA-13)	11
5	Grietas longitudinales (Km. 251 CA-13)	12
6	Ahullamiento longitudinal (Km. 200 CA-9 Norte)	13
7	Ahullamiento transversal (Km. 254 CA-13)	13
8	Pérdida de agregados (Km. 205 CA-9 Norte).	15
9	Baches (Km. 215 CA-9 Norte)	17
10	Temperatura media anual (INSIVUMEH, 2022)	19
11	Precipitación media anual (INSIVUMEH, 2022)	20
12	Periodo de análisis	34
13	Valores de $D_L$ (AASHTO, 1993)	35
14	Niveles de confiabilidad sugeridos	36
15	Niveles mínimos de $P_l$	37
16	Valor de módulo resiliente efectivo del suelo de cimentación	40
17	Ejemplo de la aplicación del procedimiento de estimación del módulo efectivo $M_R$ (AASHTO, 1993)	41
18	Estimación de coeficiente estructural de capa de concreto asfáltico	43
19	Variación en el coeficiente estructural de capa base con diferentes parámetros de resistencia	44
20	Valores del módulo para la base	45
21	Espesor típico de diseño	45
22	Valores típicos para $k_1$ y $k_2$ de materiales de base y subbase no adheridas	45
23	Variaciones en el coeficiente de capa de subbase granular con diferentes parámetros	47
24	Valores para los materiales de subbase	47
25	Estados de refuerzos $\theta$ para la selección del modulo (AASHTO, 1993)	48
26	Variación de $a_2$ en bases tratadas con bitumen con los parámetros de resistencia de la base (AASHTO, 1993)	48
27	Calidad de drenaje y tiempo de remoción	49
28	Valores de $m_i$ recomendados	50
29	Ejemplo de determinación de numero estructural (AASHTO, 1993)	51
30	Espesor mínimo de capas	52
31	Ejemplo para determinar espesores de capas usando aproximaciones	53
32	Ahullamiento longitudinal (huella de rodadura) km.200	63

33	Grieta longitudinal km.201	63
34	Pérdida de agregado km.205 (área de curva)	64
35	Pérdida de agregado km.205	64
36	Baches km.215	65
37	Bache km.218	65
38	Bache y huella de rodadura km.247	66
39	Piel de cocodrilo km.250	66
40	Bache km.250	67
41	Grietas longitudinales km.251	67
42	Ahullamiento transversal km.254	68
43	Bache km.258	68
44	Grietas longitudinales km.260	69
45	Bache km.271	69
46	Huella de rodadura en puente río Dulce	70
47	Bache en el mercado de río Dulce	70
48	Bacheo km.283	71

## LISTADO DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

***Equivalent Single Axle Load (ESAL)***: número de repeticiones de carga equivalente de un eje simple de ruedas duales de carga estándar de 18,000 lb (8.2 toneladas) acumulado en el período de diseño considerado en el carril de diseño.

**kip**: equivalente a 1000 libras-fuerza.

**°C**: grados celsius.

***Pavement Serviceability Index (PSI)***: se refiere a es una medida del desempeño del pavimento.

**psi**: libra de fuerza por pulgada cuadrada es una unidad de presión.

***American Society for Testing and Materials (ASTM)***: Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales

***American Association of Highway and Transportation Officials (AASHTO)***: Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales.

**AASHO**: experimento realizado por la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales para determinar como el tráfico contribuye al deterioro del pavimento de las carreteras.

## RESUMEN

La región oriental de Guatemala enfrenta condiciones climáticas extremas, con altas temperaturas y fuertes lluvias, que aceleran el deterioro de los pavimentos flexibles. Estas condiciones generan deformaciones, fisuras y baches, lo que afecta la calidad y durabilidad de las carreteras. Actualmente, las normativas utilizadas en la construcción y mantenimiento de pavimentos provienen de estándares internacionales que no están adaptados a las particularidades locales, lo que provoca un rápido deterioro de las vías. Este estudio analiza el comportamiento de los pavimentos flexibles en la región oriental, evaluando las fallas comunes y los desafíos que enfrentan debido al clima y al tráfico pesado. Se recopilaron datos sobre la infraestructura existente y se revisaron casos de estudio en regiones con condiciones climáticas similares para identificar mejores prácticas. El análisis reveló que la falta de un sistema de drenaje eficiente y el uso de materiales inadecuados para el clima son las principales causas del rápido deterioro de las carreteras. Como resultado, se proponen una serie de directrices adaptadas a las condiciones locales, que incluyen la mejora de los sistemas de drenaje, el uso de mezclas asfálticas más resistentes a las altas temperaturas y la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo. Estas recomendaciones buscan aumentar la durabilidad de los pavimentos, reducir los costos de mantenimiento y mejorar la calidad de la infraestructura vial en la región oriental de Guatemala, contribuyendo a un sistema de transporte más eficiente y sostenible.

## I. INTRODUCCIÓN

El progreso económico y social de una nación depende en gran medida de la infraestructura vial. En Guatemala, el transporte une zonas urbanas y rurales, facilitando la movilidad de mercancías, individuos y servicios. Haciendo énfasis en el área de estudio, la región oriental de Guatemala enfrenta desafíos significativos debido a sus condiciones climáticas extremas en los departamentos de Zacapa, Chiquimula e Izabal. La región tiene un clima cálido con temperaturas que superan los 35 °C y una temporada de lluvias abundante, lo que resulta en niveles elevados de precipitación. Los pavimentos flexibles son el tipo de rodadura predominante en la zona, pero las condiciones actuales no son las más adecuadas para su durabilidad a largo plazo debido al flujo vehicular intenso y continuo. La disminución de la resistencia de las mezclas asfálticas, causada por las elevadas temperaturas, provoca deformaciones y hundimientos en las vías de comunicación. Las intensas precipitaciones provocan defectos estructurales en el pavimento, como baches y fisuras, al favorecer la penetración de agua en las capas inferiores. Es importante considerar este factor al analizar el deterioro de las superficies viales. Por consiguiente, la falta de un sistema de drenaje adecuado agrava la situación al dificultar la evacuación del agua, lo que provoca un mayor deterioro de las carreteras y reduce su durabilidad.

Las regulaciones y técnicas utilizadas en la edificación y conservación de carreteras en esta área se basan en normas internacionales, sin considerar las características específicas del clima y el suelo local, a pesar de los casos evidentes. Los estándares actuales no son suficientes para garantizar la resistencia a largo plazo de los pavimentos flexibles en el área oriental de Guatemala, debido a la variabilidad climática. Las vías de comunicación sufren un rápido deterioro, lo cual demanda reparaciones frecuentes y costosas como consecuencia. Las infraestructuras afectan tanto la economía regional como la calidad de vida de los habitantes que las utilizan.

Identificar y examinar elementos que inciden en la eficiencia de los pavimentos flexibles en la zona oriental de Guatemala para elaborar un manual técnico ajustado a las particularidades del entorno. Se recopilaron datos sobre la condición de las vías de comunicación en la zona y se analizaron las deficiencias más comunes en los pavimentos, como deformaciones, grietas y desprendimientos de asfalto. Se registraron casos de investigación en naciones con climas afines para reconocer prácticas efectivas y soluciones aplicables en Guatemala. Ejemplos incluyen áreas del sudeste asiático y zonas del sur de Estados Unidos.

Los principales desafíos que afectan a los pavimentos flexibles en la región se vinculan con la carencia de una infraestructura de drenaje apropiada y la insuficiente resistencia de las mezclas asfálticas a las elevadas temperaturas, según el examen de estos datos. Las técnicas de construcción actuales no son adecuadas para enfrentar condiciones climáticas extremas. Un incremento en los gastos de mantenimiento y una reducción en los estándares de calidad y seguridad de las infraestructuras viales son reflejo de un proceso de deterioro continuo.

## II. JUSTIFICACIÓN

Guatemala es un país aún en vías de desarrollo, por lo que en carreteras se refiere como un país no sobresaliente, ya que sus conexiones terrestres más adecuadas se encuentran bajo el mando de una entidad privada, haciendo referencia a su aspecto, mantenimiento, diseño y cuidado, además de no ser carreteras de asfalto, por lo que se supone que los encargados del diseño de dichas carreteras pudieran haber recibido formación en el extranjero o bien conocen las normativas internacionales para llevar a cabo un trabajo con requisitos mínimos y aceptables. Si bien una cinta asfáltica ya no es considerada la mejor opción para un tramo carretero, no se puede ignorar que, según un estudio realizado en 2014 por la red vial CAMINOS, se sabe que al menos el cuarenta y dos por ciento de todas las rutas a nivel nacional están hechas del tipo de rodadura asfáltica. Al ser realizado en ese año, se intuye que el número de carretas de esta rodadura haya crecido significativamente, agregando el hecho de que dentro del área de estudio predomina ampliamente el pavimento flexible en las carreteras. Tomando como prueba piloto y un área de estudio delimitada, el departamento de Izabal, más concretamente, los municipios de Morales, Los Amates y Puerto Barrios.

Dejando de lado la cantidad de carreteras de determinado tipo de rodadura, tomaremos en cuenta que el desarrollo y diseño de mezclas se encuentran cubiertos por normas extranjeras, por lo que el comportamiento y aplicación del pavimento flexible no será de acuerdo a la literatura y podría presentar notables dificultades. Dentro de la región oriente del país existen miles de kilómetros asfaltados, los cuales requieren mantenimiento y reparaciones. Dichas actividades se realizan de manera constante y con más frecuencia de lo habitual, esto debido a las adversidades climáticas que se encuentran en el área, con temperaturas sobrepasando los 36 °C a la sombra, lo que provoca que el asfalto, al estar sometido a cargas altas y constantes y a altas temperaturas, como lo son en las costas del país y la región oriente, donde el asfalto, al estar directamente bajo el sol, puede alcanzar una temperatura de 70 °C, provocando deformaciones permanentes, lo que conlleva irregularidades a lo largo del tramo, ya que este tipo de deformaciones no pueden recuperarse, como las deformaciones resilientes. Sumando además las lluvias frecuentes debido a su ubicación, más el hecho de una red de drenaje poco eficiente, provoca que el subrasante se vea afectado y, por ende, la carretera en sí, lo que conlleva a la reparación constante de los tramos. Tomando en cuenta la constante preocupación de la nación sobre el cuidado del medio ambiente, se busca una posible solución a la excesiva labor de reparación de tramos carreteros de asfalto, un derivado directo del petróleo, lo que genera aún más contaminación.

### III. IMPORTANCIA

Es esencial realizar una investigación exhaustiva y detallada sobre la implementación efectiva de pavimentos flexibles en la región oriental de Guatemala. Esta investigación contribuirá significativamente a mejorar la calidad y durabilidad de la infraestructura vial en un área geográfica afectada por condiciones climáticas extremas, como altas temperaturas constantes y precipitaciones torrenciales frecuentes, que aceleran el deterioro de las vías de comunicación terrestre. La adecuada condición de las carreteras que conectan los departamentos de Zacapa, Chiquimula e Izabal es crucial para facilitar el desplazamiento de personas, bienes y servicios, garantizando así la interconexión y el desarrollo económico de la región.

El presente estudio exhaustivo ofrecerá información de gran valor y pertinencia para las autoridades gubernamentales encargadas de la planificación y administración de la infraestructura vial. Esto posibilitará el desarrollo e implementación de políticas públicas que mejoren de forma eficaz y sostenible la inversión en la red de carreteras, ajustándolas de manera precisa a las particularidades y desafíos climáticos específicos de cada región. Los profesionales altamente capacitados en el campo de la ingeniería podrán aplicar las conclusiones detalladas de la investigación en el diseño y mantenimiento de vías más resistentes y sostenibles. Esto, a su vez, disminuirá de manera significativa la necesidad de llevar a cabo reparaciones frecuentes y costosas.

La investigación tendrá un impacto directo en todas las comunidades locales cercanas al mejorar la seguridad, confiabilidad y eficiencia del transporte. Esto, a su vez, contribuirá positivamente al desarrollo sostenible en los ámbitos social, cultural y económico de la región en su conjunto. La realización de mejoras significativas en las carreteras contribuirá al aumento del intercambio comercial, a la mejora del acceso a diversos servicios esenciales y al incremento del bienestar de las personas que se benefician de estas importantes infraestructuras de transporte.

Es fundamental considerar que, al aplicar estrategias para mejorar la utilización de materiales y técnicas de construcción sostenibles, se promoverá una gestión más efectiva de los recursos disponibles. Esto conducirá a una reducción notable del impacto ambiental asociado con la construcción y el mantenimiento de infraestructuras viales.

## **IV. OBJETIVOS**

### **A. Objetivo general**

Evaluar la utilización de pavimentos flexibles convencionales en la región oriental de Guatemala.

### **B. Objetivos específicos**

- Determinar las ventajas y desventajas de utilizar pavimentos flexibles en regiones con alto índice de precipitación y clima cálido.
- Documentar casos históricos que evidencien el comportamiento en pavimentos flexibles en regiones similares al área de estudio.
- Determinar las recomendaciones para el uso de pavimentos flexibles en el área de estudio.

## V. MARCO TEORICO

### A. Carreteras en Guatemala

De acuerdo con los datos proporcionados por la entidad correspondiente, se establece que la longitud total de la red de carreteras en el territorio nacional asciende a 16,860.68 kilómetros. De este total, únicamente 7,420.39 kilómetros están pavimentados, en contraste con los 9,501.259 kilómetros restantes que se caracterizan por no contar con pavimento, conocidos comúnmente como caminos de terracería. A nivel internacional, se define una carretera como una infraestructura concebida para optimizar la movilidad eficiente de peatones y vehículos en un contexto urbano. Esta definición se subdivide en tres categorías: primarias, secundarias y terciarias. Es importante destacar que en el país, la infraestructura vial presenta una diversidad de tipos de carreteras que abarcan las categorías de centroamericanas, nacionales, departamentales y rurales. Además, se observa una variación significativa en los materiales de construcción utilizados, incluyendo asfalto, concreto y terracería. Enfocándose de esta manera en las carreteras con cinta asfáltica como material de rodadura (Banco de Guatemala, [2018](#); Mora, [2024](#)).

#### 1. Tipología de carreteras.

- **Carreteras primarias:** estas carreteras se caracterizan por su función fundamental de interconectar las arterias viales principales a nivel nacional en la gran área metropolitana. Su rol principal radica en la unión de los centros urbanos centrales, las cabeceras de los cantones principales, los aeropuertos, las zonas industriales, comerciales y las áreas recreativas de gran importancia en todo el territorio del país.
- **Carreteras secundarias:** estas carreteras desempeñan un papel crucial al actuar como conexiones estratégicas entre los centros urbanos más destacados del área metropolitana, en casos en los que no existe cobertura por parte de las vías principales de la región. Estas vías secundarias cumplen la función de facilitar la movilidad y el acceso a las áreas urbanas intermedias, contribuyendo así a una red de transporte integral en el entorno metropolitano.
- **Carreteras terciarias:** estas carreteras cumplen una función fundamental como vías colectoras de tráfico, desempeñando un papel de conexión estratégica no solo entre las vías principales y secundarias, sino también entre los centros urbanos de segundo nivel, que engloban las cabeceras de cantones más pequeños y los distritos de mayor extensión. Su importancia radica en su capacidad para canalizar el flujo de vehículos y facilitar la movilidad entre las áreas urbanas intermedias, contribuyendo así al desarrollo de una infraestructura de transporte integral y eficiente (Flores, [2013](#); Gobierno de México, [2019](#)).

#### 2. Clasificación a nivel nacional.

- **Carreteras centroamericanas:** las rutas centroamericanas (CA) son vías nacionales de alta categoría, caracterizadas por un ancho de derecho de vía que abarca 25 metros o más, lo que incluye autopistas y carreteras con cuatro carriles o más. Estas rutas desempeñan un papel crucial al establecer conexiones entre la capital y puntos de gran relevancia, como fronteras internacionales, puertos estratégicos, o al atravesar el país en direcciones longitudinales o transversales.



- **Carreteras rurales** los caminos rurales, dentro de la categorización de la red vial de la Dirección General de Caminos, se ubican en el tercer nivel de importancia. Estos caminos se caracterizan por tener un ancho total de rodadura de 4 metros y un ancho de derecho de vía que varía en el rango de 6 a 9 metros (Cetino, 2023; Ministerio de comunicaciones, 2012).

### 3. Tipos de rodadura.

- **Asfalto:** el pavimento asfáltico es un término genérico utilizado para hacer referencia a cualquier tipo de superficie de carretera que se construye utilizando asfalto. Por lo general, está compuesto por una capa superior que consta de agregados minerales que están unidos y recubiertos con asfalto. Además, puede incluir una o más capas de base o subbase que pueden consistir en diversos materiales como mezcla de agregados y asfalto, piedra triturada, escoria de alto horno o grava.
- **Concreto hidráulico:** en contraste, el pavimento de concreto hidráulico se desarrolla mediante la disposición de una combinación de áridos pétreos, cemento Portland y agua con el propósito de establecer una superficie de rodadura uniforme que garantice un adecuado sistema de drenaje, alta resistencia al deslizamiento, confort y seguridad para los usuarios.
- **Terracería:** la terracería se caracteriza por ser una infraestructura de transporte terrestre que se sitúa al nivel del suelo y se crea mediante la remoción de suelo o el uso continuo de una vía. En términos generales, esta forma de construcción facilita la circulación de vehículos.

CLASIFICACION	CENTRO AMERICANAS			NACIONALES			DEPARTAMENTALES			CAMINOS RURALES	TOTAL			TOTAL KILOMETROS
	ASFALTO	PAVIMENTO	TERRACERIA	ASFALTO	PAVIMENTO	TERRACERIA	ASFALTO	PAVIMENTO	TERRACERIA		ASFALTO	PAVIMENTO	TERRACERIA	
PRIMARIA	2.007.000	131.000	0.000	625.100	22.000	484.000	417.000	0.000	20.000	0.000	3.049.100	153.000	504.000	3.706.100
SECUNDARIA	7.180	0.000	0.000	756.000	0.000	254.000	677.300	0.000	114.000	0.000	1.440.480	0.000	368.000	1.808.480
TERCIARIA	0.000	0.000	0.000	397.800	22.000	350.800	2.227.561	50.450	3.885.063	0.000	2.625.361	72.480	4.235.863	6.933.674
CAMINOS RURALES	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.412.426	15.195	3.835	4.393.396	4.412.426
TOTAL PAIS	2.014.180	131.000	0.000	1.778.900	44.000	1.088.800	3.321.861	50.450	4.019.063	4.412.426	7.130.136	229.285	9.501.258	16.860.680

Figura 3. Longitud de carreteras según clasificación y tipo de rodadura (Dirección General de Caminos, 2019; Ferrovial, 2021).

## B. Pavimento asfáltico

### 1. Asfalto.

a. **Definición:** el asfalto es una sustancia de color que oscila entre un tono pardo oscuro y negro, y se caracteriza por su textura semisólida. Principalmente, está compuesto por betunes, que pueden encontrarse naturalmente o ser obtenidos a través de la destilación del petróleo, lo que le confiere sus propiedades (Sosa, 2012).

b. **Obtención y tipos:** en términos generales, se emplean dos procedimientos para obtener asfalto a partir del petróleo crudo:

- **Método de destilación por vapor:** en este método, el petróleo crudo se carga en columnas horizontales con una capacidad de hasta 1,200 barriles. Se aplica gradualmente calor externo, lo que aumenta la temperatura. A medida que la temperatura sube, los componentes más ligeros del petróleo comienzan a evaporarse y se destilan antes de recondensarse en forma líquida en una unidad separada conocida como condensador.

Cuando las fracciones más pesadas alcanzan una temperatura específica en el destilador, se introduce vapor vivo a través de un serpentín perforado ubicado en el fondo del destilador. Los vapores resultantes, que consisten en agua y aceite, se dirigen a los condensadores. Durante todo el proceso, la carga en el destilador se mantiene en constante agitación para prevenir el sobrecalentamiento local en el fondo de la columna. El vapor reduce el punto de ebullición de los aceites, lo que permite su eliminación cuando se acerca la densidad del residuo al punto deseado para obtener el asfalto. Con precaución, se incrementa el calor y la cantidad de vapor para asegurar que, al final del proceso, la relación entre vapor condensado y aceite sea alta, generalmente en el rango de 6 a 8. Cuando se ha alcanzado la consistencia deseada, se corta el suministro de vapor y se procede a bombear el asfalto hacia tanques de almacenamiento.

- **Destilación continua en columna:** el petróleo asfáltico crudo se bombea de manera constante a través de serpentines largos ubicados dentro de un horno. A medida que la carga se calienta, se mantiene bajo presión mediante una válvula. El aceite caliente, al salir de los serpentines, se vierte en la superficie de un evaporador. A medida que fluye hacia abajo dentro de la torre, pasa sobre una serie de platos. Durante este proceso, el aceite se vuelve progresivamente más pesado y, finalmente, cuando alcanza el fondo de la torre, se descarga a través de una válvula en forma de asfalto listo para su utilización (Gonzales, 2001).

### **Los tipos comerciales de asfalto son clasificados en dos categorías:**

- **Asfalto natural:** estos materiales se encontraban almacenados en capas geológicas, emergiendo como sustancias asfálticas que pueden ser de naturaleza blanda o dura, a menudo frágiles. Se presentan en forma de material negro que se encuentra en vetas dentro de formaciones rocosas o impregnadas en tipos de rocas como calizas, areniscas y similares.
- **Asfalto de petróleo:** este tipo de asfalto consiste en coloides dispersos en hidrocarburos presentes en el crudo de petróleo, y se obtienen a través de procesos de refinación. A partir del descubrimiento del proceso de refinación en 1900 y con el crecimiento en la popularidad de los automóviles, se procesaron grandes cantidades de petróleo para obtener asfalto. Con el tiempo, los procedimientos de refinamiento han mejorado, resultando en asfaltos de mayor calidad (Gonzales, 2001; PetroPeru, 2020).

### **2. Asfaltos para pavimentos.**

Los asfaltos comúnmente usados para la construcción de pavimentos flexibles se dividen en tres tipos:

- **Cemento de asfaltos:** se obtiene, por destilación del crudo del petróleo mediante diferentes técnicas de refinación. El producto obtenido en los fondos de la torre de vacío luego de procesos de destilación por unidades primarias y de vacío, es el cemento asfáltico de petróleo, de consistencia semisólida a temperatura ambiente. A temperatura ambiente el cemento asfáltico es negro, pegajoso, semisólido y altamente viscoso. Este es resistente y durable con excelente adhesividad y características a prueba de agua, altamente resistente a la acción de ácidos, álcalis y sales. El cemento asfáltico se usa en grandes cantidades, para la producción de mezclas asfálticas en caliente, primordialmente usado en la construcción de pavimentos flexibles en todo el mundo.

- **Emulsiones asfálticas:** la emulsión asfáltica, a veces simplemente denominada emulsión, consiste en una combinación de cemento asfáltico, agua y un agente emulsificante. Estas emulsiones se formulan con el propósito de disminuir la viscosidad del asfalto, lo que permite su aplicación en regiones con temperaturas más frías.
- **Asfaltos diluidos:** estos productos se obtienen al incorporar un destilado de petróleo al cemento asfáltico, lo que reduce su viscosidad y lo hace adecuado para aplicaciones en áreas con temperaturas más bajas. Una vez aplicado, el solvente se evapora, dejando el cemento asfáltico en la superficie. Este tipo de productos se divide en tres categorías:
  - **Asfaltos de curado rápido:** resulta de la incorporación de un disolvente ligero de alta volatilidad, generalmente gasolina o nafta, al cemento asfáltico. Se emplea principalmente como capa de ligante y para tratamientos superficiales.
  - **Asfaltos de curado medio:** se logra al añadir un disolvente de volatilidad intermedia, comúnmente queroseno, al cemento asfáltico.
  - **Asfaltos de curado lento:** se obtiene mediante la adición de aceites de baja volatilidad, como diésel u otros aceites similares, al cemento asfáltico (Gonzales, 2001).

### 3. Agregados.

Las mezclas asfálticas generalmente se componen de alrededor del 90 % de agregados pétreos en sus formas gruesas y finas, aproximadamente un 5 % de polvo mineral (conocido como filler) y otro 5 % de ligante asfáltico. Cada uno de estos componentes desempeña un papel fundamental en el desempeño adecuado del pavimento, y cualquier deficiencia en cualquiera de ellos puede afectar el conjunto. De estos elementos, el ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos factores que ejercen la mayor influencia tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total (Padilla, 2020; VISE, 2022).

### 4. Pavimentos con cinta asfáltica.

a. **Definición y características:** los pavimentos flexibles son aquellos cuya estructura tiene la capacidad de flexionarse y adaptarse a las cargas generadas por el tráfico, sin experimentar deformaciones permanentes. Estos pavimentos son ampliamente empleados en áreas con tráfico intenso, como carreteras, vías de acceso y áreas de estacionamiento, entre otros. Un pavimento flexible debe garantizar una superficie de rodaje uniforme y resistente a factores como la abrasión, las inclemencias climáticas y otros agentes dañinos. Además, debe ser capaz de transmitir las cargas generadas por el tráfico a las capas inferiores de manera eficiente. Entre las características fundamentales que debe poseer un pavimento flexible se incluyen la resistencia estructural, la capacidad de deformación, la impermeabilidad, la durabilidad, el costo, las necesidades de mantenimiento y el confort (García-Montenegro, 1992; Jiménez Acuña & Obando, 2009).

### 5. Base y subbase.

La base y subbase de una cinta asfáltica son componentes esenciales en la estructura del pavimento flexible, ya que proporcionan soporte estructural, estabilidad y drenaje, asegurando la correcta distribución de cargas del tráfico y evitando deformaciones prematuras en la superficie de rodadura. Su función principal es disminuir los esfuerzos que llegan a la subrasante, mejorar la capacidad portante del suelo natural y prevenir fallas estructurales como asentamientos diferenciales y deformaciones permanentes.

a. **Subbase:** es la capa inferior ubicada entre la subrasante y la base, funcionando como un filtro y soporte estructural intermedio. Su principal objetivo es incrementar la resistencia de la subrasante, distribuir uniformemente las cargas generadas por el tráfico y permitir el drenaje del agua infiltrada para evitar la saturación del pavimento. En suelos de baja capacidad de carga o alta plasticidad, la subbase también actúa como una capa estabilizadora que impide la migración de finos hacia la base y la superficie asfáltica, contribuyendo a la integridad estructural del pavimento. Para su construcción, se emplean materiales granulares bien gradados, con un contenido de finos no mayor al 15 %, suelos estabilizados con cal o cemento en terrenos con baja capacidad de soporte, y en algunos casos, geotextiles y geogrillas para mejorar la estabilidad en suelos con problemas de expansión y contracción. Para garantizar su adecuado desempeño, la subbase debe compactarse al menos al 95 % de densidad Proctor modificado y alcanzar un CBR mínimo de 20 %, dependiendo del tipo de tráfico al que será sometida.

b. **Base:** ubicada entre la subrasante y la base, actúa como un filtro y soporte estructural intermedio, permitiendo el drenaje del agua infiltrada y evitando la saturación del pavimento. En terrenos con baja resistencia o alta plasticidad, también cumple la función de evitar el bombeo de finos hacia la base y la superficie asfáltica, mejorando la estabilidad general del pavimento. Para su construcción, se utilizan materiales granulares bien gradados (arena-grava) con un contenido de finos no mayor al 15 %, suelos estabilizados con cal o cemento en terrenos con baja capacidad de soporte, y geotextiles o geogrillas en suelos con problemas de expansión y contracción. Para garantizar su desempeño estructural, la subbase debe compactarse al menos al 95 % de densidad Proctor modificado y contar con un CBR mínimo del 20 %, dependiendo del nivel de tráfico al que estará sometida. La correcta selección de materiales, compactación y diseño de la base y subbase influye directamente en la durabilidad y desempeño del pavimento flexible, permitiendo una infraestructura más resistente y eficiente frente a las cargas vehiculares y condiciones ambientales adversas.

c. **Importancia del drenaje en la base y subbase:** el agua es una de las principales causas de deterioro en los pavimentos flexibles, ya que puede reducir la resistencia de la subrasante, provocar erosión interna y acelerar la formación de fallas estructurales. Para evitar estos problemas, es fundamental contar con un sistema de drenaje eficiente en el diseño de la base y subbase. Entre las medidas más recomendadas para mejorar el drenaje, se encuentra el uso de materiales permeables en la subbase, permitiendo la rápida evacuación del agua y evitando la saturación del pavimento. Además, la instalación de subdrenes y sistemas de drenaje longitudinal es esencial en zonas con alta pluviosidad para evitar la acumulación de humedad y preservar la capacidad estructural del pavimento. Por otro lado, la aplicación de geotextiles entre la subbase y la subrasante ayuda a prevenir la migración de finos, lo que contribuye a mantener la estabilidad del suelo y a prolongar la vida útil del pavimento.

## 6. Causas y reparación de fisuras.

- **Baches:** los baches son grietas que tienen una longitud mínima de 15 centímetros y se encuentran en la superficie del pavimento. En otras palabras, un bache es una porción de asfalto que ha sido removida y reemplazada con o sin otros materiales después de la construcción inicial del pavimento. Para remediar este tipo de daños en el pavimento, se requiere llevar a cabo un proceso de parcheo, que implica una reconstrucción local del área afectada. El procedimiento es el siguiente:
  - En primer lugar, se delimita el área dañada y se procede a recortar la capa asfáltica.

- Luego, se retira el material suelto o inadecuado hasta llegar a una capa que esté en condiciones adecuadas.
- En el tercer paso, se coloca nuevo material de manera uniforme, compactándolo en capas sucesivas.
- Finalmente, se rellena con concreto asfáltico y se compacta hasta alcanzar el nivel original del pavimento.

Cuando las condiciones de tráfico no permiten seguir el procedimiento descrito, se opta por realizar una nivelación únicamente con concreto asfáltico, aunque esto no se recomienda debido a la limitada durabilidad de la reparación.

- **Piel de cocodrilo:** es aconsejable realizar una evaluación para detectar posibles problemas de drenaje. Si se constata que los daños se deben a una falta de drenaje subyacente, lo cual indica un nivel significativo de deterioro, se lleva a cabo una reconstrucción completa de la zona afectada del pavimento. Este proceso implica la instalación de un sistema de drenaje subterráneo, la remoción del material afectado por la humedad y su sustitución por uno nuevo. A continuación, se procede a rellenar el área con concreto asfáltico y compactarlo hasta que alcance el nivel original del pavimento.



*Figura 4.* Piel de cocodrilo (Km. 250 CA-13)

- **Fisuras en arco:** cuando se trata de grietas de pequeñas dimensiones, el enfoque consiste en aplicar productos asfálticos para sellarlas. Sin embargo, si las grietas son más extensas o notorias, se lleva a cabo un proceso de remoción de la capa superficial hasta que la grieta ya no sea visible, seguido por la aplicación de un parche de asfalto.
- **Grietas longitudinales:** cuando se identifica que el origen del problema está relacionado con el agua, se debe instalar un sistema de drenaje apropiado. En el caso de que las grietas aparezcan en los márgenes o bordes, se lleva a cabo un proceso de nivelación mediante la aplicación de una capa de asfalto.

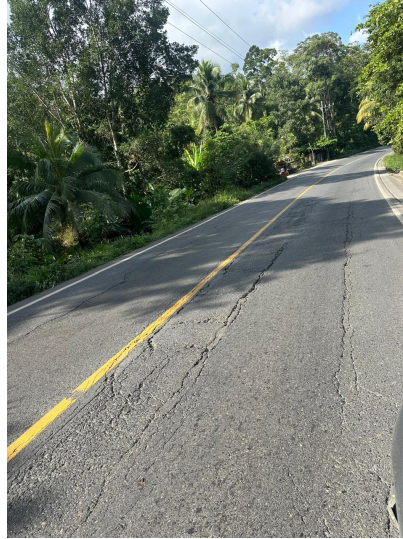


Figura 5. Grietas longitudinales (Km. 251 CA-13)

- **Grietas transversales:** la solución convencional para este problema suele ser el sellado de las grietas. En el caso de que el motivo sea la falta de espesor de la capa, se recomienda aplicar una microcarpeta de asfalto.
- **Grietas por flexión:** para abordar esta deficiencia, se lleva a cabo un proceso de parcheo parcial en la zona afectada y se evalúa la posibilidad de reconstruir la junta (Barrera, [2014](#); Quimsaitw, [2021](#); Rodríguez, [2005](#)).

## 7. Causas y reparación de deformaciones.

- **Ahullamientos**
  - **Longitudinales:** cuando la subrasante presenta saturación, es fundamental instalar dispositivos de subdrenaje. En caso de que el problema se origine debido a insuficiencias en las capas inferiores, es imprescindible llevar a cabo una reconstrucción integral de la sección afectada.



Figura 6. Ahullamiento longitudinal (Km. 200 CA-9 Norte)

- **Transversales:** en las zonas que presenten daños, es esencial elevar el pavimento hasta llegar a la capa que tenga una compactación insuficiente y, posteriormente, llevar a cabo una compactación adecuada antes de iniciar la reconstrucción del pavimento. En estos casos, es importante considerar la implementación de un sistema de subdrenaje. Si las condiciones no permiten seguir el procedimiento previamente mencionado, se debe optar por un proceso de fresado en la zona dañada, seguido de una nivelación sistemática mediante la aplicación de una mezcla asfáltica, hasta que se logre obtener el perfil correcto.



Figura 7. Ahullamiento transversal (Km. 254 CA-13)

- **Corrugaciones:** cuando la capa de rodadura sea un tratamiento superficial, se lleva a cabo un

proceso de escarificación en la sección dañada para mezclarla con la base existente, seguido de una adecuada compactación antes de aplicar la nueva capa asfáltica. Sin embargo, si se refiere a una capa de rodadura formalmente construida, que es más gruesa, la opción más recomendable es llevar a cabo una reconstrucción del área afectada. Esto implica la eliminación de la capa de rodadura dañada, seguida de una compactación adecuada de la base antes de aplicar una nueva capa de rodadura en la zona afectada (Barrera, 2014; Guerrero, 2016).

## 8. Desprendimientos.

- **Ojo de pescado:** un procedimiento convencional implica la limpieza del orificio, seguido de una compactación y el vertido de concreto asfáltico en su interior. Posteriormente, se procede a nivelar la superficie y compactarla para que quede al mismo nivel que la capa de rodadura.
- **Descascaramiento:** colocación de un tratamiento superficial de protección, siempre y cuando las grietas no sean profundas.
- **Pérdida de agregado:** si el área dañada es de dimensiones reducidas, se puede optar por aplicar un parche en la superficie. Sin embargo, en el caso de que la zona afectada sea extensa, resulta más apropiado aplicar un tratamiento completo, asegurándose de dosificar adecuadamente el asfalto para evitar irregularidades en la superficie (Barrera, 2014; Pacua, 2013).



Figura 8. Pérdida de agregados (Km. 205 CA-9 Norte).

## 9. Afloramientos.

- **De agua:** para abordar este problema, es esencial llevar a cabo la captación de las aguas subterráneas mediante dispositivos de drenaje apropiados. Una vez que el problema del exceso de agua se ha solucionado, se evalúa la necesidad de sellar las grietas y se procede en consecuencia.
- **De ligante:** en caso de que se presente un problema de exudación de asfalto, se tiene la opción principal de aplicar una capa de arena caliente. Sin embargo, si la exudación abarca una extensión considerable, se recomienda la colocación de una microcarpeta, la cual requiere una preparación previa del pavimento a través de la escarificación, asegurando que la dosificación sea la adecuada. Por otro lado, si la zona afectada es de tamaño reducido, es suficiente con retirar el material problemático y sustituirlo por uno apropiado (Barrera, [2014](#); MOPC, [2016](#)).

## C. Mantenimiento de pavimentos

### 1. Definición de mantenimiento.

El mantenimiento se puede definir como el conjunto de medidas y procedimientos destinados a preservar un objeto o devolverlo a un estado en el que pueda cumplir con una función específica. Estas medidas engloban tanto aspectos técnicos como administrativos (Asociación Española para la Calidad, 2019).

a. **Mantenimiento preventivo:** el mantenimiento preventivo se refiere a una técnica científica utilizada en la industria para respaldar las operaciones de producción y el funcionamiento general de las instalaciones empresariales. Este tipo de mantenimiento implica las siguientes actividades:

- Llevar a cabo inspecciones periódicas de los activos y equipos de la planta con el propósito de identificar condiciones que puedan dar lugar a interrupciones no planificadas en la producción o a una degradación perjudicial.
- Preservar la planta tomando medidas para prevenir, corregir o reparar los problemas identificados en una etapa temprana (IBM, 2022).

b. **Mantenimiento correctivo:** el mantenimiento correctivo, también conocido como mantenimiento no planificado, se enfoca en la corrección de las fallas o defectos identificados en los equipos o instalaciones. Representa la forma más elemental de mantenimiento y tiene como objetivo localizar y subsanar problemas o averías. En esencia, el mantenimiento correctivo se centra en la reparación de elementos dañados. Este tipo de mantenimiento se lleva a cabo en respuesta a eventos no predecibles, como fallos o averías en los equipos, y a menudo implica gastos imprevistos en reparaciones y piezas de repuesto, ya que puede requerir el reemplazo de componentes desgastados, especialmente en equipos informáticos (Tecsa, 2018).

### 2. Mantenimiento de obras de drenaje.

Las obras de drenaje son componentes fundamentales en cualquier sistema de transporte. A pesar de que su importancia puede parecer menor en comparación con estructuras más prominentes, como puentes y viaductos, es esencial recordar que un eventual colapso en estas obras de drenaje puede tener un impacto significativo en el funcionamiento general de la infraestructura de transporte, afectando la continuidad de los servicios ofrecidos (Campos et al., 2017; Pérez, 2021).

a. **Drenaje superficial:** el drenaje superficial involucra acciones como lo pueden ser: la captación de las aguas pluviales procedentes de la superficie y sus bordes, utilizando cunetas, alcantarillas, sumideros, u otros medios similares; la conducción de las aguas captadas hacia destinos apropiados, como cauces naturales, sistemas de alcantarillado, o hacia el nivel freático. Esto se logra mediante cajas de recolección y conductos longitudinales, ya sea directamente o a través de estructuras de drenaje transversal o canales, que pueden ser tanto a cielo abierto como subterráneos.

b. **Drenaje subterráneo:** para prevenir daños en los pavimentos y la infraestructura vial debido al agua, es esencial combinar la máxima impermeabilidad de la superficie con un sistema de drenaje interno adecuado. Sin embargo, no se debe depender exclusivamente de la impermeabilidad, ya que con el tiempo resulta difícil de mantener.

Cuando se renuevan pavimentos que cuentan con subbases poco permeables y drenajes laterales, el agua que penetra en la estructura debe recorrer una trayectoria casi horizontal, lo que disminuye la eficacia de los drenajes, a menos que los materiales utilizados posean una alta permeabilidad.

El propósito del drenaje es garantizar que las capas del pavimento no se saturen de agua, lo que implica que los caudales de salida previstos deben ser iguales o superiores a los caudales de entrada, incluyendo las infiltraciones.

### 3. Fallas en el pavimento.

Las fallas en estructuras como las de carreteras pueden deteriorarse con el paso del tiempo de manera gradual; esto se puede deber a diferentes factores, como lo pueden ser factores climáticos, asentamientos de suelo, falta de mantenimiento o por la antigüedad de la carretera, la cual ya cumplió e incluso sobrepasó su vida útil. Las fallas contempladas son: baches y grietas.

- **Grietas:** se dan debido al incremento de cargas, mala gestión de la calidad de los materiales implementados, temperaturas extremas, mal fraguado, acción continua de agua, etc.
- **Baches:** se dan debido al uso de materiales de baja calidad utilizados en la carpeta de rodadura, incrementos de carga, acumulación de agua, etcétera (Construneic, [2023](#)).



Figura 9. Baches (Km. 215 CA-9 Norte)

### 4. Capacitación y personal competente.

La capacitación se emplea comúnmente en diversas organizaciones con el propósito de mejorar las habilidades y conocimientos de su personal. Este proceso implica la participación en cursos, seminarios y otras formas de educación. Sin embargo, en la mayoría de las empresas que ofrecen capacitación, la evaluación se basa principalmente en la retroalimentación de los usuarios y en pruebas realizadas al final del programa de capacitación. Aunque esta información es valiosa para medir la satisfacción inmediata, no permite evaluar los impactos a largo plazo (Chimborazo, [2022](#)).

Mediante la capacitación se pueden establecer ciertos criterios para la prevención de percances y/o desastres, estas restricciones llamadas medidas de control. Son las diferentes técnicas, métodos y procedimientos utilizados para la atenuación o eliminación del riesgo. El establecimiento de las medidas de control es un proceso para el cual nos es posible proporcionar criterios generales, puesto que deberá hacerse en función de las características de la propia organización empresarial y el

proceso productivo. Cada uno de los factores de riesgo con sus respectivos riesgos debe someterse a una fase de estudio, en la que se analice la solución más operativa a los factores determinantes de la situación del riesgo estudiada (MCAD, 2023; Sailema, 2019).

#### **D. Pavimento flexible en la región de estudio**

##### **1. Clima monzónico.**

Izabal presenta un clima de tipo monzónico caracterizado por elevadas temperaturas y abundantes precipitaciones a lo largo del año. La temperatura promedio anual en Izabal alcanza entre los 24 y 28 °C, mientras que la precipitación media anual se sitúa desde 1500 hasta los 3000 milímetros. Durante aproximadamente 51 días al año, no se registran lluvias en la región. Además, la humedad media se mantiene en un 83 %, mientras que el Índice UV alcanza un nivel de 7 (INSIVUMEH, 2022).

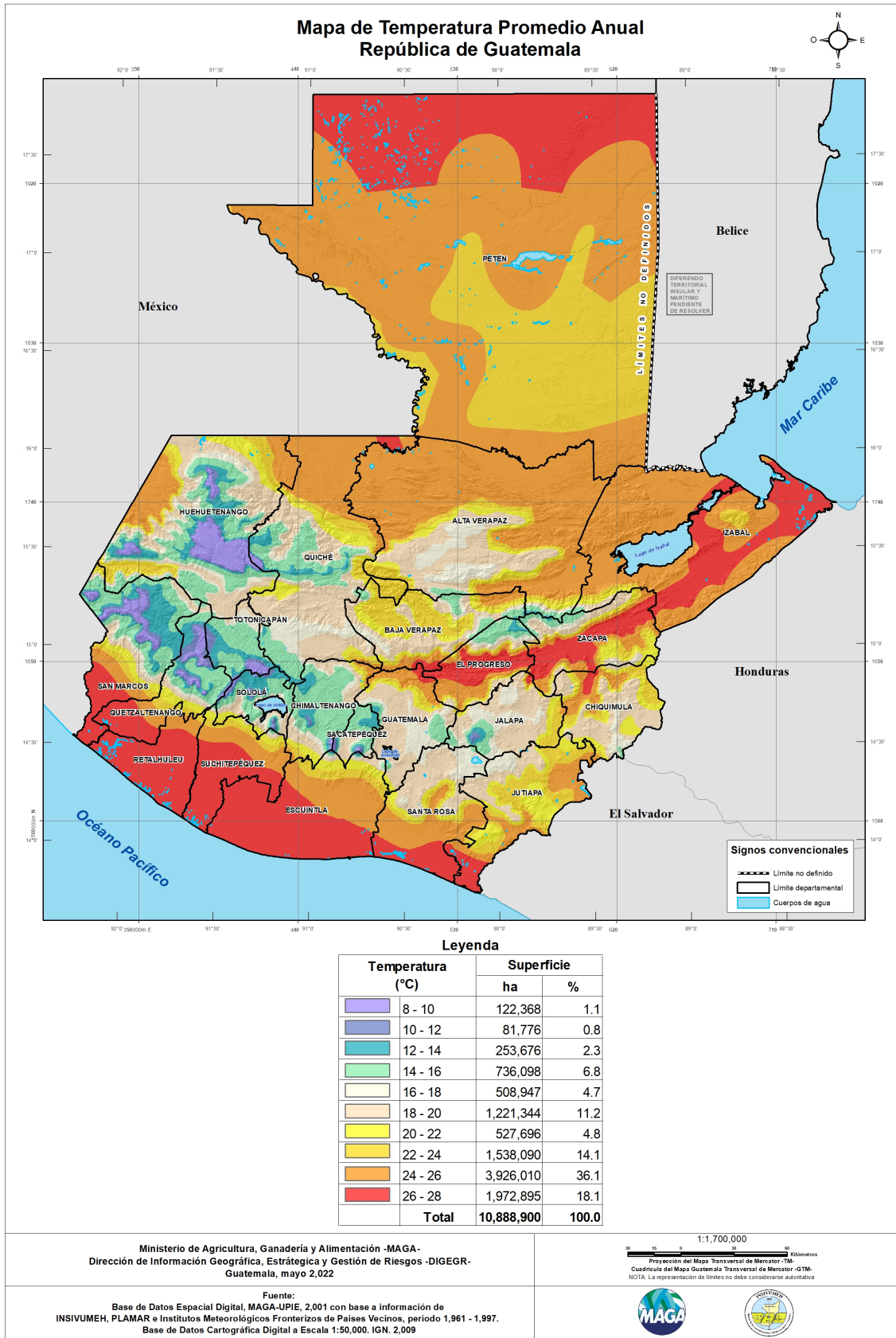


Figura 10. Temperatura media anual (INSIVUMEH, 2022)

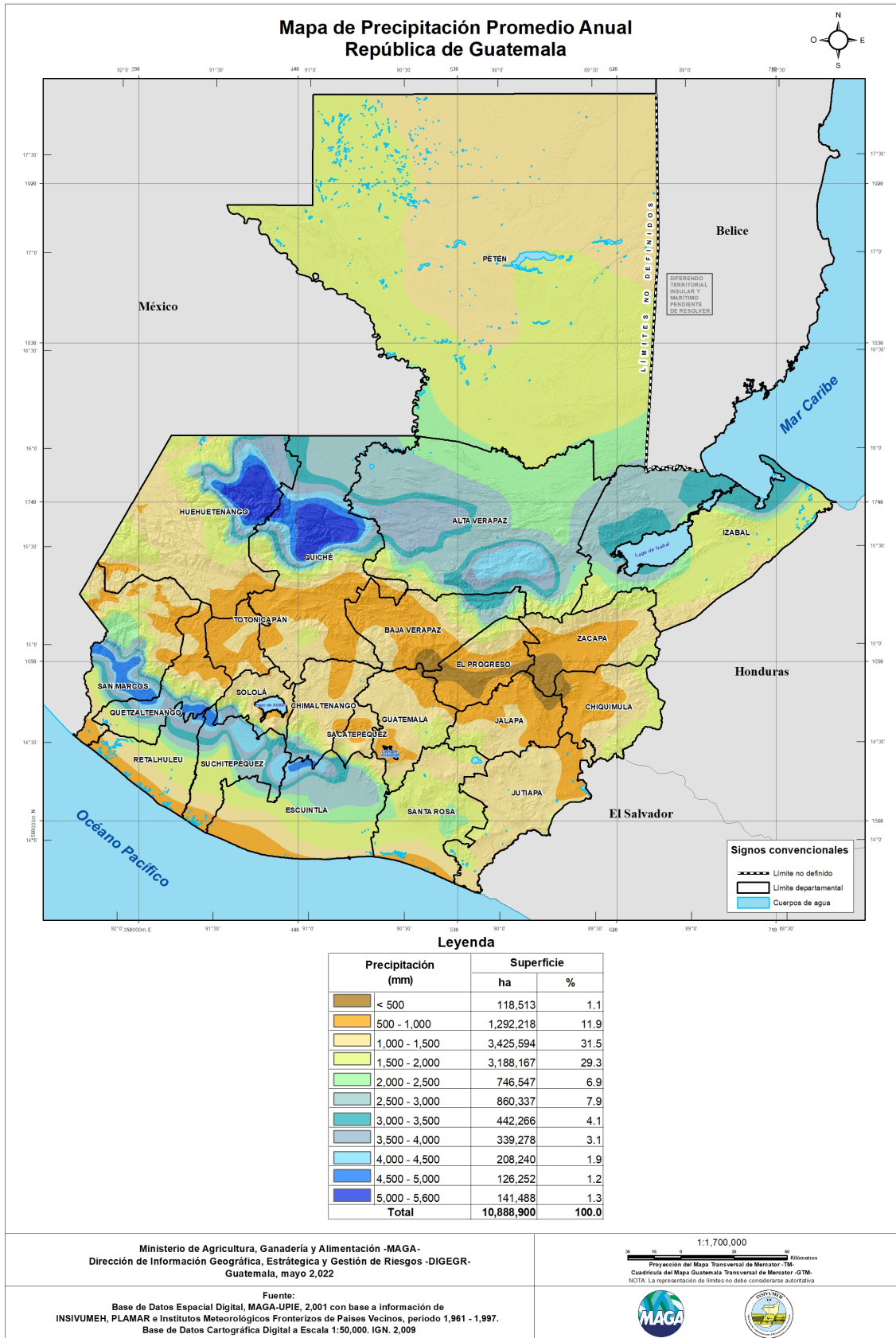


Figura 11. Precipitación media anual (INSIVUMEH, 2022)

## **E. Pavimento flexible en condiciones extremas**

### **1. Altas temperaturas.**

La respuesta del asfalto se deriva de su cualidad viscoelástica, lo que significa que su comportamiento está directamente influenciado por las condiciones de carga y la temperatura a la que se expone. En ambientes de altas temperaturas, la mezcla asfáltica tiende a adquirir características similares a las de un líquido viscoso.

Se ha reconocido que los climas extremos tienen un impacto significativo en la infraestructura vial, lo que puede resultar en demoras para los usuarios e incluso desencadenar accidentes de tráfico. En los últimos años, el cambio climático ha acentuado esta relación entre el asfalto y las temperaturas elevadas, especialmente en áreas geográficas de Guatemala, como las zonas desérticas y tropicales, donde las olas de calor superan los niveles promedio. Cuando la temperatura supera los 45 °C, se intensifica la deformación de la superficie de la carretera asfáltica, lo que resulta en la rápida formación de roderas y ondulaciones. Estos cambios estructurales tienen un impacto directo en la circulación vehicular y se atribuyen principalmente al tipo de mezcla utilizada en la construcción de la vía.

Si estas deformaciones no se reparan de manera inmediata, pueden acumular agua, lo que aumenta el riesgo de hidroplaneo para los vehículos, lo que representa un peligro para la seguridad de los conductores. Además, si el agua penetra las capas de base y subbase, puede comprometer su capacidad de soporte debido a la humedad. Otro efecto de las altas temperaturas en el asfalto es la modificación del módulo de rigidez del pavimento, lo que puede generar sensibilidad y, como resultado, agrietamiento o incluso deformación estructural. Las grietas en el asfalto también pueden originarse por un endurecimiento excesivo causado por altos niveles de radiación ultravioleta y una oxidación intensificada debido a las olas de calor (De La Cruz, [2019](#)).

### **2. Precipitación.**

Es crucial considerar que el proceso de asfaltado requiere condiciones climáticas adecuadas para garantizar un resultado óptimo y una superficie de carretera de alta calidad. De lo contrario, sería necesario repetir el trabajo una vez que la lluvia haya cesado y el terreno esté en condiciones óptimas para el asfaltado. Las temperaturas más idóneas para el proceso de asfaltado tradicional oscilan entre los 150 y 115 °C, con un tiempo de compactación que no suele exceder los 10 minutos, aunque en función de las condiciones ambientales, estos tiempos pueden prolongarse. La presencia de alta humedad y lluvias constantes puede afectar negativamente la calidad del asfaltado, lo que compromete la seguridad de la carretera. Por lo tanto, es necesario ser pacientes y esperar condiciones climáticas más favorables para llevar a cabo el proceso de asfaltado. Es importante destacar que el invierno representa la época menos favorable para realizar trabajos de pavimentación y asfaltado. Las lluvias persistentes características de esta estación son la principal razón por la que los resultados de los trabajos realizados durante este período no son óptimos ni duraderos. La mezcla de agua con los componentes granulares de las bases conlleva una disminución de su resistencia. Por lo tanto, el final de la primavera y el verano se perfilan como las mejores épocas del año para llevar a cabo el asfaltado de caminos y carreteras (De La Cruz, [2019](#)).

## **F. Uso del asfalto en la región**

### **1. Flexibilidad y adaptabilidad a la humedad y movimientos del suelo.**

El asfalto es un material flexible, lo que le permite absorber mejor los asentamientos diferenciales y las deformaciones del suelo, reduciendo el riesgo de fisuras estructurales severas. En regiones con alta humedad y subrasantes saturadas, el concreto, al ser un material rígido, puede desarrollar grietas transversales y levantamientos debido a la expansión del agua y la variación de temperatura en la base del pavimento.

### **2. Facilidad y costo del mantenimiento.**

El mantenimiento del asfalto es rápido y menos costoso, ya que los daños superficiales como baches, grietas y pérdida de agregados pueden repararse mediante sellado, fresado y recapeo en poco tiempo. En contraste, el concreto requiere demolición y reconstrucción de secciones completas cuando aparecen grietas estructurales, lo que implica mayores costos y tiempos de inhabilitación de la vía.

### **3. Costos de construcción.**

El asfalto tiene un menor costo inicial en comparación con el concreto. La instalación de pavimento flexible no requiere juntas de expansión, refuerzos estructurales complejos ni largos tiempos de curado, lo que permite una ejecución más rápida y económica. Si bien el concreto puede ofrecer una mayor vida útil en condiciones ideales, en entornos de alta humedad y tráfico pesado, el desgaste ocurre en ambos materiales, reduciendo la brecha en su durabilidad efectiva.

### **4. Capacidad de absorber esfuerzos dinámicos.**

El asfalto tiene una mejor capacidad para distribuir las cargas dinámicas del tráfico, reduciendo el impacto sobre las capas inferiores del pavimento. Esto minimiza el riesgo de fisuras estructurales en zonas de alto tránsito y frenado. En contraste, el concreto no tiene la misma capacidad de deformación controlada, por lo que tiende a desarrollar grietas prematuras en intersecciones y curvas.

### **5. Menor impacto en la operación del tráfico.**

La construcción y rehabilitación de pavimentos asfálticos tienen un menor impacto en la circulación vehicular, ya que pueden habilitarse en menos de 24 horas después de su colocación. En comparación, el concreto requiere un tiempo de curado prolongado, lo que aumenta las restricciones en el tránsito.

## **G. Casos de estudio del pavimento en climas tropicales o extremos**

### **1. Prueba piloto - Izabal.**

El clima monzónico de Izabal, caracterizado por altas precipitaciones y humedad relativa elevada, tiene un impacto significativo en el pavimento flexible, principalmente por la constante infiltración de agua en las capas inferiores. La precipitación anual en la región es de entre 1500 a 3000 mm, lo que provoca que el agua penetre en la subrasante y reduzca su capacidad de carga, generando asentamientos diferenciales y pérdida de estabilidad en la estructura del pavimento. La humedad relativa del 83 % mantiene el pavimento en un estado de saturación prolongada, lo que favorece la exudación asfáltica y el desprendimiento de agregados. En las zonas donde la acumulación de agua es persistente, el material granular pierde cohesión y disminuye la resistencia del pavimento, lo que incrementa la incidencia de fallas como grietas y baches. La falta de un drenaje eficiente permite que el agua permanezca atrapada en la base y subbase, aumentando el daño estructural con el tiempo.

La humedad elevada también afecta la adherencia entre el asfalto y los agregados, debilitando la superficie y favoreciendo la formación de grietas longitudinales y transversales.

Las altas temperaturas en Izabal alteran las propiedades mecánicas del pavimento flexible, debido a la naturaleza viscoelástica del asfalto. La temperatura superficial del pavimento puede alcanzar hasta 70°C durante el día, lo que reblandece el ligante asfáltico y reduce su rigidez estructural, facilitando la aparición de deformaciones plásticas. Este fenómeno se agrava en tramos con tráfico pesado, donde la combinación de altas temperaturas y cargas repetitivas genera ahullamientos y compactación excesiva del pavimento. La radiación solar intensa también acelera el envejecimiento del asfalto, provocando procesos de oxidación que lo vuelven más frágil y quebradizo. Durante la noche, la temperatura desciende rápidamente, generando tensiones térmicas que pueden derivar en grietas superficiales. La acción constante de la temperatura sobre el pavimento modifica su módulo de rigidez, afectando su resistencia a la fatiga y favoreciendo la aparición de fisuras en zonas de alta carga vehicular.

La vida útil del pavimento en Izabal se ve reducida debido a la combinación de factores climáticos y tráfico pesado. En la CA-9 Norte, una de las principales vías de la región, el tránsito de vehículos de carga genera esfuerzos repetitivos sobre el pavimento, acelerando la formación de fallas estructurales. La saturación de la subrasante por el alto índice de precipitación disminuye su capacidad portante, lo que contribuye al desarrollo de grietas por fatiga y asentamientos diferenciales en la superficie. Estudios indican que las condiciones climáticas de Izabal pueden reducir la vida útil del pavimento flexible en un 20-28 %, en comparación con otras regiones con climas menos agresivos. La interacción entre humedad, temperatura y carga vehicular provoca la pérdida de cohesión del material asfáltico, haciendo que las reparaciones sean recurrentes en tramos con mayor exposición a estos factores. La ausencia de un mantenimiento preventivo efectivo, junto con la falta de diseño adaptado a las condiciones locales, intensifica el deterioro de la infraestructura vial, afectando su desempeño a largo plazo.

La formación de grietas y baches en las carreteras de Izabal está influenciada por la combinación de fatiga del material, saturación de la base y variaciones de temperatura. En la CA-9 Norte, se han identificado grietas longitudinales en los km 201, 251 y 560, causadas por la expansión y contracción del pavimento debido a cambios de temperatura. También se han documentado baches en los km 215, 218, 250, 258 y 271, donde la infiltración de agua ha erosionado la base del pavimento, generando cavidades que colapsan bajo la carga del tráfico. En algunos tramos, la pérdida de agregados es un problema recurrente, especialmente en curvas y zonas de frenado, como en los km 205 y 283, donde la adherencia del asfalto se ve afectada por la humedad persistente. La piel de cocodrilo es otra falla común en la región, observada en el km 250, indicativa de una pérdida de capacidad estructural en la capa asfáltica debido a esfuerzos repetitivos y fatiga del material.

El ahuellamiento y la deformación plástica son fallas comunes en los pavimentos de Izabal, especialmente en intersecciones y zonas de tráfico detenido. En la CA-9 Norte, se ha registrado ahuellamiento en el puente de río Dulce y en el km 247, donde la constante aplicación de cargas vehiculares ha generado depresiones longitudinales en la superficie del pavimento. Estas deformaciones pueden alcanzar profundidades superiores a 20 mm, lo que afecta la calidad del rodaje y aumenta el riesgo de acumulación de agua, favoreciendo la formación de hidroplaneo. En algunos tramos, la compactación excesiva del pavimento ha reducido el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla asfáltica, lo que disminuye su capacidad de absorber esfuerzos y aumenta la probabilidad de deformaciones permanentes. La pérdida de rigidez estructural en capas superiores del pavimento, combinada con la saturación de la base, incrementa la susceptibilidad del asfalto a la formación de

surcos y desplazamientos laterales en zonas con alta carga de tráfico.

## 2. Estados Unidos.

El estudio realizado por Qiao et al., 2013, titulado *Análisis de los efectos de los factores climáticos sobre el rendimiento y la vida útil de los pavimentos flexibles*, investiga el impacto de las condiciones climáticas en la eficacia de los pavimentos flexibles. En este se presentan datos relevantes acerca de los factores principales que provocan el deterioro en diversas situaciones ambientales, como el efecto de la temperatura y la precipitación en la generación de surcos, fisuras y la disminución de la durabilidad del pavimento.

La recopilación de información se realizó utilizando datos climáticos recolectados en tres ubicaciones estratégicas en los Estados Unidos, las cuales fueron seleccionadas por sus particulares características climáticas. Los datos climáticos utilizados abarcan un historial de una década aproximadamente.

- La región de Virginia, ubicada en el sureste de los Estados Unidos, la cual se caracteriza por su vulnerabilidad a fenómenos climáticos extremos, tales como elevadas temperaturas y precipitaciones intensas. Los datos utilizados en el informe provienen del Aeropuerto Internacional de Richmond.
- En el medio oeste de Estados Unidos, específicamente en Minnesota, en donde se prevén los mayores incrementos de temperatura. Los datos empleados fueron recopilados en el Aeropuerto Internacional de Saint Paul.
- El estado de Washington, ubicado en el noroeste de los Estados Unidos, fue elegido como sitio de estudio debido a la conjunción de fluctuaciones en la temperatura y variaciones en los patrones de precipitación. Los datos son provenientes del Aeropuerto Internacional de Seattle-Tacoma.

Estas locaciones permitieron la modelación de los impactos climáticos en pavimentos flexibles en diversos climas y situaciones, lo que llevó a la realización de predicciones sobre el desempeño de los pavimentos ante posibles escenarios futuros de variabilidad climática.

El impacto de la temperatura en el comportamiento de los pavimentos es un aspecto crucial a considerar en el diseño y mantenimiento de infraestructuras viales. La variación de la temperatura puede provocar cambios significativos en las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos, lo cual puede afectar su durabilidad y resistencia a lo largo del tiempo. Por lo tanto, es fundamental realizar un análisis detallado de cómo la temperatura influye en el comportamiento de los pavimentos para garantizar su adecuado rendimiento y prolongar su vida útil.

Según la investigación realizada por Qiao y colaboradores en 2013, la temperatura se destaca como el principal factor ambiental que incide en el comportamiento de los pavimentos flexibles. El incremento de la temperatura promedio anual y las variaciones estacionales contribuyen al deterioro de los materiales asfálticos. Este fenómeno afecta principalmente la formación de surcos y la resistencia a las cargas dinámicas, como resultado del envejecimiento térmico. En climas cálidos, como en la región oriental de Guatemala, la superficie del pavimento puede llegar a temperaturas superiores a los 70 °C, lo cual constituye un fenómeno de relevancia particular.

Los datos del estudio, un aumento del 5 % en la temperatura media anual, lo que equivale a un incremento de 2.9 °F (1.6 °C), provoca una alteración significativa en la respuesta del pavimento. La proyección de la variación estacional, representada mediante una función seno, puede resultar en aumentos de temperatura de hasta 1.725°F (0.96°C), lo cual puede agravar las deformaciones y fallos en la estructura. El aumento de la temperatura tiene un impacto significativo en el fenómeno conocido como deformación plástica acelerada en la capa asfáltica, lo cual disminuye la capacidad de resistencia del pavimento ante las cargas del tráfico, provocando deformaciones permanentes.

Se estima que el aumento del 5 % en la temperatura resultaría en un incremento del 28 % en la formación de surcos en pavimentos flexibles sujetos a tráfico intenso. Además, se proyecta que este fenómeno tendría lugar. La fatiga del pavimento es un problema significativo en áreas con altos niveles de tráfico, ya que el pavimento se ve afectado por cargas cíclicas. El hundimiento resultante no solo impacta en la comodidad de los usuarios, sino que también disminuye significativamente la durabilidad del pavimento.

a. **Precipitación y humedad:** los efectos de la precipitación y la humedad en el pavimento son de suma importancia en la evaluación de la durabilidad de las estructuras viales. La interacción entre la lluvia y la humedad del suelo puede provocar daños significativos en el pavimento, afectando su resistencia y vida útil. Es fundamental considerar estos factores al diseñar y mantener adecuadamente las carreteras para garantizar su buen estado y seguridad para los usuarios.

La precipitación y la humedad subterránea son dos elementos climáticos que inciden de manera desfavorable en la eficiencia de los pavimentos flexibles. Según el estudio, un incremento del 5 % en los índices de precipitación conlleva a un aumento en la infiltración de agua en la estructura del pavimento, lo que resulta en una disminución del módulo resiliente de la subrasante y las capas granulares no ligadas. La reducción del módulo resiliente en más del 20 % afecta la capacidad del pavimento para conservar su integridad frente a cargas dinámicas.

La filtración de agua, junto con un sistema de drenaje ineficiente, puede agravar las deformaciones permanentes en la superficie del pavimento. En contextos de elevada humedad, se ha observado en un estudio una reducción de hasta el 30 % en la rigidez de la subrasante, lo cual aumenta la posibilidad de sufrir deformaciones permanentes y el riesgo de presentar fallos estructurales, como la fatiga por agrietamiento. La acumulación de agua en la subrasante, causada por la alta pluviosidad y un drenaje deficiente, es un fenómeno frecuente en ciertas regiones. Esta situación incrementa las tensiones internas del pavimento, lo que conlleva a una aceleración en su deterioro.

La importancia de instalar sistemas de drenaje eficientes en áreas con alta precipitación, como la región oriental de Guatemala, se resalta al proyectar los efectos de la humedad en el rendimiento del pavimento. Si no se tienen en cuenta estos aspectos durante el diseño del pavimento, se prevé una disminución significativa en su durabilidad, como se evidenció en la investigación, en la que la interacción de altos niveles de precipitación y temperatura disminuyó la vida útil de los pavimentos hasta en un 20 %.

b. **Formación de grietas en pavimentos bajo condiciones climáticas variables:** la formación de grietas en pavimentos es un fenómeno común que puede ocurrir debido a condiciones climáticas variables.

El agrietamiento es una forma común de falla en pavimentos flexibles que se ve agravada por las condiciones climáticas, en particular por las fluctuaciones de temperatura. Según el estudio, el agrietamiento longitudinal experimenta un notable incremento debido a variaciones estacionales

significativas. La proyección de un incremento del 5 % en la temperatura media anual\*\* muestra que las grietas longitudinales aumentarán en 16.9 pies por milla. Esto evidencia la sensibilidad del pavimento flexible a las variaciones de temperatura y su limitada capacidad para mitigar las tensiones térmicas.

El envejecimiento térmico del asfalto agrava las grietas por fatiga, las cuales son comunes en pavimentos que soportan tráfico continuo. La disminución de la flexibilidad de la capa asfáltica debido a la variación de temperatura conlleva a un aumento en la formación de grietas cuando se somete a cargas repetidas. Según proyecciones, un aumento del 5 % en la temperatura media anual podría resultar en un incremento del 25 % en la tasa de grietas por fatiga. Esto sugiere que los pavimentos diseñados para climas más fríos podrían no ser apropiados para áreas con temperaturas extremas, como las presentes en Guatemala.

c. **Vida útil del pavimento bajo condiciones climáticas extremas:** la durabilidad de los pavimentos flexibles se ve significativamente afectada por las condiciones climáticas. Según el estudio, se estimó que un aumento moderado del 5 % en la temperatura y la precipitación podría ocasionar una disminución de la durabilidad de los pavimentos de hasta un 20-28 %. La principal causa de esta reducción es el aumento en la formación de grietas y la rigidez del pavimento debido al envejecimiento térmico, lo cual aumenta la susceptibilidad a fallas por fatiga y deformaciones permanentes.

El estudio analizó la reacción de los pavimentos en diversas zonas y determinó que los pavimentos en áreas de clima cálido, como en Virginia, experimentaron una disminución significativamente mayor en su durabilidad en comparación con los pavimentos en regiones más frías como Minnesota. Este hallazgo indica que las condiciones climáticas extremas, como las presentes en la región oriental de Guatemala, demandan un diseño más sólido y especializado. Este diseño debe contemplar el uso de materiales con mayor capacidad de resistencia a las altas temperaturas, así como a la exposición simultánea al agua y al tráfico.

d. **Consideraciones finales:** el estudio de los elementos climáticos realizado por Qiao et al. (2013), ofrece una perspectiva completa acerca de la influencia directa de la temperatura y la precipitación en el desempeño de los pavimentos flexibles. Los datos cuantitativos recopilados indican que las fluctuaciones en el clima, a pesar de ser moderadas, pueden ocasionar consecuencias devastadoras en la durabilidad y eficiencia del pavimento si no se implementan medidas correctivas durante la fase de diseño. La formación de surcos, el agrietamiento por fatiga y la reducción de la rigidez del pavimento son los principales modos de falla acelerados por estas condiciones. Por lo tanto, es crucial emplear materiales modificados que presenten mayor resistencia a las variaciones térmicas y a la infiltración de agua. Los sistemas de drenaje desempeñan una función fundamental en la preservación de la integridad del pavimento, sobre todo en áreas con altos índices de precipitaciones (Qiao et al., 2013).

### 3. Malasia.

El estudio lleva por título *Investigación sobre los efectos de la humedad en el asfalto caliente en condiciones climáticas tropicales*. La investigación analiza el impacto de la humedad en la resistencia y el desempeño de las mezclas asfálticas en naciones de climas tropicales, como es el caso de Malasia. El estudio tuvo como enfoque la evaluación de las disparidades entre dos técnicas de diseño de mezclas asfálticas: Superpave y Marshall, con la finalidad de determinar cuál de ellas ofrece un

desempeño óptimo en entornos tropicales, los cuales se caracterizan por altas temperaturas y niveles significativos de lluvia.

El estudio se realizó empleando materiales provenientes de dos canteras ubicadas en Malasia: la cantera Selangor (QS), situada cerca de Kuala Lumpur, y la cantera Johor (QJ), localizada en el sur del país. En estas áreas, las temperaturas medias diurnas varían entre 35 y 45 °C, acompañadas de lluvias frecuentes que alcanzan entre 2000 mm y 3000 mm de precipitación anual, según una investigación sobre daños ambientales.

a. **Impacto de la humedad en pavimentos asfálticos:** el impacto de la humedad en los pavimentos asfálticos es un aspecto crucial a considerar en el diseño y mantenimiento de infraestructuras viales. En climas tropicales, la construcción de pavimentos enfrenta un importante desafío relacionado con la susceptibilidad a la humedad. Esta se refiere a la capacidad del pavimento para soportar los efectos adversos provocados por la presencia de agua. La penetración de agua en la mezcla asfáltica deteriora la unión entre el asfalto y los agregados, lo cual puede resultar en fallas tempranas tales como desprendimiento del asfalto, grietas y deformaciones. En los climas tropicales, la intensidad elevada de las precipitaciones y las temperaturas extremas contribuyen al agravamiento de estos efectos, los cuales aceleran el deterioro de la estructura del pavimento. De acuerdo con la investigación, en Malasia se registra un promedio de 100 a 150 días de lluvia anuales, caracterizados por precipitaciones intensas que inciden en el rápido deterioro de las superficies de las carreteras.

Se emplearon dos pruebas fundamentales, la prueba Lottman modificada (AASHTO T283) y la prueba de rendimiento simple (SPT), para analizar la susceptibilidad de las mezclas a la humedad. Los ensayos presentan datos acerca del comportamiento de las mezclas en condiciones de humedad y sequedad, imitando los impactos del tráfico y situaciones climáticas adversas.

b. **Comparación de métodos de diseño, Superpave vs. Marshall:** en la investigación se analizaron dos enfoques de diseño comúnmente empleados en la elaboración de pavimentos: el método Marshall y el método Superpave. El método Superpave, concebido en el contexto del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras de los Estados Unidos (SHRP, por sus siglas en inglés), tiene como objetivo principal incrementar la durabilidad de los pavimentos en situaciones de climas adversos y elevado tráfico vehicular. El método Marshall, que es considerado más tradicional, ha sido extensamente aplicado en proyectos de infraestructura en Malasia.

c. **Evaluación de la formación de surcos y módulo resiliente:** la evaluación de la formación de surcos y el módulo resiliente es un aspecto importante a considerar en el estudio. En climas tropicales, la formación de surcos o ahuellamiento es una preocupación destacada debido a la combinación de altas temperaturas que ablandan el asfalto y el tráfico pesado que ocasiona deformación permanente. En el presente estudio, se empleó un equipo de seguimiento de ruedas con el fin de cuantificar la deformación de las mezclas asfálticas sometidas a cargas a una temperatura de 60 °C, la cual es representativa de la temperatura superficial de los pavimentos en regiones de clima tropical.

Los resultados obtenidos revelaron una disparidad de importancia en la magnitud de los surcos generados entre las combinaciones de asfalto Superpave y Marshall.

El método Superpave establece que los surcos en la superficie de la carretera deben tener un ancho comprendido entre 0.8 mm y 3.0 mm. Las dimensiones de los surcos oscilan entre 4.1 mm y 6.5 mm, según Marshall. Las diferencias observadas sugieren que las mezclas Superpave presentan una mayor resistencia a la deformación por fatiga y altas temperaturas, lo que resulta en una mayor

durabilidad del pavimento y una disminución en la frecuencia de mantenimiento requerido.

En lo que respecta al módulo resiliente, el cual evalúa la capacidad del pavimento para resistir tensiones cíclicas sin sufrir deformaciones permanentes, se observó que las mezclas Superpave presentaron un desempeño superior en comparación con las mezclas Marshall. A una temperatura de 25 °C, se registró un valor del módulo resiliente más alto de 3721 MPa para la mezcla Superpave 9.5-B2, en contraste con los 728 MPa alcanzados por la mezcla Marshall 9.5-B1. El resultado obtenido confirma la mayor eficacia de las mezclas Superpave en cuanto a su resistencia estructural en ambientes tropicales, según lo indicado en la investigación sobre el deterioro de las carreteras.

d. **Apreciaciones finales:** los resultados obtenidos en la investigación indican que las mezclas elaboradas a través del método Superpave presentan una mayor resistencia al deterioro causado por la humedad y a la deformación permanente en contraste con las mezclas diseñadas según el método Marshall. Las mezclas Superpave se caracterizan por su alta resistencia a la infiltración de agua, evidenciada por su elevado índice de TSR. Además, poseen una mayor capacidad para conservar su rigidez frente a condiciones de alta temperatura y cargas pesadas. Las características de las mezclas Superpave las hacen especialmente apropiadas para su aplicación en regiones tropicales, como por ejemplo en Malasia. En este tipo de climas, las elevadas temperaturas y la humedad son elementos determinantes que contribuyen a acelerar el deterioro de las superficies pavimentadas.

En síntesis, las mezclas Superpave, en particular aquellas con ligantes tipo PEN 60/70 (B2), presentan un desempeño superior en entornos tropicales. Estas mezclas se caracterizan por una mayor resistencia a la deformación por fatiga, un módulo resiliente elevado y una menor susceptibilidad a los efectos negativos de la humedad. La adopción del diseño Superpave en países con climas similares podría mejorar notablemente la durabilidad de los pavimentos, lo que resultaría en una reducción de los costos de mantenimiento y en una prolongación de la vida útil de las carreteras (Ahmad et al., 2014).

#### 4. Pensilvania.

a. **Mezcla asfáltica en caliente para intersecciones en climas cálidos:** el estudio titulado *Mezcla asfáltica en caliente para intersecciones en climas cálidos*, Kandhal et al., 1998, examina las dificultades asociadas con la ruptura superficial en carreteras asfálticas en cruces viales, especialmente en áreas con condiciones climáticas cálidas. El presente estudio se realizó en la ciudad de Pittsburgh, en el estado de Pensilvania. En él se presentan recomendaciones para reducir la deformación en pavimentos expuestos a tráfico lento o detenido, en situaciones de elevadas temperaturas.

b. **Problema de los surcos en pavimentos asfálticos:** el problema de los surcos en pavimentos asfálticos es una preocupación común en la ingeniería de carreteras. Este fenómeno se caracteriza por la formación de hendiduras longitudinales en la superficie del pavimento, lo que puede deberse a diversos factores como el tránsito vehicular, las condiciones climáticas y la calidad de los materiales utilizados en la construcción de la carretera. La presencia de surcos en el pavimento no solo afecta la comodidad y seguridad de los usuarios de la vía.

El foco principal de investigación en este estudio es el fenómeno de la formación de surcos en pavimentos de asfalto mezclado en caliente (HMA) en intersecciones, donde los vehículos se detienen o circulan a velocidades reducidas. En climas cálidos, la rigidez del HMA disminuye debido a las altas temperaturas, lo que provoca la formación de depresiones longitudinales conocidas como surcos. Estos surcos se originan por la acción de cargas vehiculares repetidas y tráfico estacionario.

Los estudios realizados en intersecciones señalizadas de Pittsburgh revelaron que las mezclas asfálticas en dichas zonas exhibían:

- La presencia de pocos vacíos en el agregado mineral (VMA) es un aspecto importante a considerar.
- Los niveles de aire atrapado son mínimos.
- El empleo de arenas subredondeadas y de baja angularidad

La densificación excesiva de las mezclas asfálticas bajo condiciones de tráfico lento o detenido puede ser causada por varios factores, lo que resulta en deformación permanente, formación de surcos y, en ocasiones, deslizamiento del pavimento asfáltico.

c. **Evaluación de campo y análisis de deformación:** el análisis realizado en el terreno reveló que las profundidades de los surcos en las intersecciones de la ciudad de Pittsburgh presentan variaciones significativas en contraste con las secciones ubicadas lejos de dichas intersecciones. En intersecciones como la de Lincoln Highway, se registraron profundidades de hasta 38 mm; en contraste, fuera de las intersecciones, la profundidad promedio fue de 13 mm. Los estudios también han demostrado que el nivel de VMA en las mezclas era significativamente reducido en las intersecciones. De acuerdo con los hallazgos en el laboratorio, se establece que una mezcla ideal debe contener un mínimo del 16 % de vacíos con mezcla asfáltica (VMA) para asegurar una durabilidad apropiada y permitir el espacio adecuado para el ligante asfáltico y los vacíos de aire. No obstante, los valores medios registrados en la investigación de campo mostraron que los índices de módulo de mezcla (VMA, por sus siglas en inglés) alcanzaron niveles tan bajos como 12.7 % en determinadas situaciones, lo que resultó en una mayor susceptibilidad de las mezclas asfálticas a la deformación.

d. **Relación entre la densidad y el contenido de vacíos de aire:** según el estudio realizado, se ha establecido que los pavimentos adyacentes a las intersecciones experimentan una compactación excesiva como consecuencia del tráfico detenido, lo cual ocasiona una significativa disminución de los espacios de aire en la mezcla asfáltica. En algunas intersecciones, el contenido de huecos de aire se redujo significativamente a un 1.0 %, en contraste con el rango recomendado del 3-4 % para pavimentos asfálticos destinados a soportar tráfico. Los valores bajos de vacíos de aire en el pavimento provocan la pérdida de estabilidad y lo hacen propenso a sufrir deformaciones permanentes, como surcos y empujes.

En la intersección de Banksville Road, se registró un ejemplo de esto, donde se encontraron surcos de 17 mm de profundidad, además de valores de vacíos de aire de tan solo un 2 %. La densificación por tráfico repetido es la causa de este fenómeno, ya que disminuye los espacios de aire hasta un punto crítico, lo que impacta la estabilidad de la mezcla.

e. **Recomendaciones para mejorar el rendimiento de los pavimentos en intersecciones:** según los hallazgos de las investigaciones realizadas en terreno y los estudios de laboratorio, se sugiere la utilización de una combinación de asfalto con matriz de piedra (SMA) en las intersecciones con el fin de reducir la formación de surcos y aumentar la resistencia al desgaste. Las características principales de este tipo de combinación son las siguientes:

- La superficie de rodadura de mezcla asfáltica modificada tiene un espesor de 50 mm y utiliza un tamaño de agregado nominal de 12.5 mm.

- La capa intermedia de mezcla asfáltica tiene un espesor de 50 mm y utiliza un tamaño nominal de agregado de 19 mm.
- La capa base está compuesta por una mezcla de piedra grande con granulometría densa, con un espesor de 150 mm, y es diseñada utilizando el método Superpave o el método Marshall modificado.

Se recomienda especialmente el empleo de mezclas asfálticas densas en caliente para la capa superficial de los pavimentos, ya que la mayoría de los problemas relacionados con el desgaste se concentran en los primeros 100 mm de espesor. El contacto directo entre las piedras en la mezcla SMA brinda una estabilidad considerablemente superior en comparación con las mezclas convencionales. Esto resulta en una disminución del riesgo de deformación permanente cuando se somete a cargas vehiculares lentas o estacionarias.

Se sugirió el empleo de ligantes asfálticos más rígidos, especialmente en regiones con climas cálidos, con el fin de prevenir la deformación del asfalto ante altas temperaturas. Con el fin de alcanzar esta meta, se planteó la selección de ligantes con dos grados de rigidez superiores a los habituales para la temperatura de diseño del lugar del proyecto.

f. **Resultados de las pruebas de campo:** se observó una disparidad sustancial en la compactación al realizar ensayos de densidad en núcleos extraídos tanto en intersecciones como fuera de ellas. En algunas intersecciones de las áreas de tráfico lento, las mezclas asfálticas fueron compactadas en exceso, disminuyendo los porcentajes de porosidad a menos del 2 %, lo cual incrementó la vulnerabilidad a la formación de surcos.

El estudio también verificó que las mezclas asfálticas con una alta proporción de asfalto y un bajo nivel de vacíos de aire presentan una menor resistencia al flujo plástico, lo que origina empujes en las zonas de tráfico detenido. Con el fin de prevenir estas dificultades, los autores sugieren aumentar el contenido de VMA y emplear agregados más angulares en la mezcla.

g. **Apreciaciones finales:** este estudio resalta la importancia de emplear mezclas asfálticas diseñadas de manera específica para intersecciones ubicadas en regiones con climas cálidos. En estos lugares, las altas temperaturas y la presencia de tráfico detenido o circulando a baja velocidad contribuyen al rápido desgaste superficial de la carretera, conocido como formación de surcos. En la construcción de pavimentos, es recomendable utilizar SMA en los primeros 100 mm del pavimento. Esto implica combinar agregados angulares, un contenido apropiado de ligante y vacíos de aire, así como emplear ligantes asfálticos más rígidos con el fin de aumentar la resistencia al flujo plástico.

Según los resultados del estudio, la aplicación de las recomendaciones mencionadas puede disminuir de manera considerable la deformación permanente en pavimentos asfálticos de intersecciones y aumentar la longevidad del pavimento, especialmente en regiones con climas cálidos.

## 5. Ciudad de México.

a. **Efecto de los diferentes pavimentos en las condiciones de confort térmico humano:** el objetivo del estudio realizado por Aguilar González et al. (2017), es analizar el impacto de diferentes tipos de pavimentos, como el asfalto y el concreto, en las condiciones de confort térmico de las personas en entornos urbanos con climas cálidos. En la Ciudad de México se llevó a cabo la investigación, donde las condiciones de radiación solar intensa, altas temperaturas y el fenómeno de

isla de calor urbana hacen que la consideración del confort térmico sea un aspecto fundamental en la planificación urbana.

b. **Influencia del material del pavimento en la temperatura superficial:** según el estudio, los pavimentos de asfalto poseen la capacidad de absorber una mayor cantidad de radiación solar debido a su bajo coeficiente de reflectancia solar. En consecuencia, las temperaturas en la superficie del asfalto pueden llegar a alcanzar los 60 °C, a diferencia de los pavimentos de concreto, que presentan temperaturas más bajas, con valores máximos de alrededor de 45 °C en condiciones similares de exposición solar. La disparidad de hasta 15 °C entre los dos materiales mencionados incide directamente en el bienestar térmico de los transeúntes y en la temperatura del entorno circundante.

La capacidad de retención de calor del asfalto, en conjunto con el tráfico de vehículos y la infraestructura urbana, es un factor que contribuye al fenómeno conocido como efecto de isla de calor urbana, el cual se caracteriza por temperaturas más elevadas en áreas urbanas en comparación con las zonas rurales adyacentes. Específicamente, el asfalto funciona como un emisor de calor, emitiendo energía térmica durante la noche y extendiendo los efectos del calor más allá del cese de la radiación solar directa.

c. **Métodos de evaluación de confort térmico:** el estudio evaluó el impacto de los pavimentos en el confort térmico humano mediante el uso del Universal Thermal Climate Index (UTCI). Este índice tiene en cuenta diversos factores climáticos, como la temperatura del aire, la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa. El índice mencionado se empleó para calcular el grado de estrés térmico que experimentaban los transeúntes en áreas pavimentadas con asfalto y concreto.

El análisis reveló que en las zonas pavimentadas con asfalto, el Índice de Temperatura y Humedad (UTCI) alcanzó niveles de hasta 45 °C, lo que denota un elevado grado de estrés térmico durante las horas de máxima exposición solar. Por el contrario, en zonas donde el suelo está cubierto de concreto, se registraron valores de UTCI entre 5 y 10 °C inferiores, lo que indica una mayor comodidad para los peatones.

El estudio también evaluó la radiación térmica emitida por los pavimentos mediante el uso de termómetros infrarrojos. En áreas donde predominan las superficies asfaltadas, se observa que los pavimentos de asfalto emiten una mayor cantidad de radiación en comparación con el concreto, lo que resulta en una intensificación del estrés térmico. Las mediciones realizadas señalan que los materiales con baja reflectancia solar, como el asfalto, no solo aumentan la temperatura superficial diurna, sino que también favorecen la conservación de altas temperaturas nocturnas.

d. **Impacto en el confort humano:** según el estudio, los pavimentos de asfalto presentan un desafío significativo en cuanto al confort térmico en regiones con climas cálidos. Las elevadas temperaturas de la superficie contribuyen al incremento del estrés térmico experimentado por los peatones, particularmente en zonas urbanas con una alta densidad de pavimentación. Los pavimentos de concreto, debido a su alta reflectancia solar y su capacidad de absorber menos calor, se presentaron como una opción más beneficiosa para contrarrestar el incremento de la temperatura en las zonas peatonales.

En las zonas urbanas analizadas, se observó un notable empeoramiento de las condiciones de confort térmico durante las horas del mediodía, momento en el cual las temperaturas máximas eran alcanzadas por las superficies de asfalto. Los niveles de estrés térmico experimentaron un notable

incremento en áreas con pavimentos de asfalto en contraste con aquellas que cuentan con pavimentos de concreto, debido a la menor capacidad de reflexión de calor que presenta el asfalto, lo cual resulta en un entorno menos confortable para las personas que transitan por la zona.

e. **Resultados de las mediciones de campo:** los datos obtenidos de las mediciones de temperatura superficial en las zonas pavimentadas con asfalto y concreto revelaron de manera precisa las disparidades en el comportamiento térmico de dichos materiales. Durante las horas de máxima exposición solar, se observó que los pavimentos de asfalto, al tener una mayor capacidad de absorción de radiación solar, alcanzaron temperaturas promedio más elevadas de hasta 60 °C, en contraste con los pavimentos de concreto que se mantuvieron entre 40 y 45 °C. Este fenómeno se debe a las propiedades térmicas diferenciadas de los materiales utilizados en la construcción de los pavimentos.

Se observó una diferencia significativa en las mediciones del índice de temperatura y viento corregida (UTCI) en los distintos tipos de pavimentos. Los pavimentos de asfalto exhibieron un índice UTCI de hasta 45 °C, generando un nivel de estrés térmico extremo para los peatones. En contraste, los pavimentos de concreto mostraron un UTCI más moderado, oscilando entre 35 y 40 °C, lo que sugiere una condición de estrés térmico menos severa.

f. **Estrategias de mitigación y recomendaciones:** en el ámbito de la gestión de riesgos, es fundamental implementar estrategias de mitigación efectivas para reducir la probabilidad de ocurrencia de eventos adversos y minimizar su impacto en las organizaciones. En este sentido, es importante considerar algunas recomendaciones clave para mejorar la resiliencia y la capacidad de respuesta ante situaciones de crisis.

Según los resultados obtenidos, se recomienda el uso de pavimentos de concreto en áreas urbanas con climas cálidos, especialmente en espacios peatonales y zonas de alta densidad de tráfico peatonal, con el fin de mejorar el confort térmico y mitigar los efectos del calor en los transeúntes. Algunas de las estrategias principales recomendadas son las siguientes:

- La selección de materiales con mayor índice de reflectancia solar es fundamental para reducir la absorción de calor en entornos urbanos. Se recomienda incrementar el uso de pavimentos de concreto o materiales con tratamientos de superficies reflectantes en lugar de asfalto.
- La integración de vegetación urbana consiste en complementar los pavimentos con áreas verdes o árboles. Esta práctica puede disminuir las temperaturas superficiales al crear zonas de sombra y reducir el impacto del calor en la infraestructura circundante.
- Se recomienda la utilización de pavimentos permeables en áreas urbanas con el fin de reducir la temperatura superficial, gestionar el agua de lluvia y mejorar el confort térmico.

g. **Apreciaciones finales:** el estudio llega a la conclusión de que la elección del material utilizado para pavimentar es fundamental para reducir el impacto del estrés térmico en zonas urbanas con climas cálidos. En ciudades como la Ciudad de México, donde las altas temperaturas y la exposición prolongada al sol contribuyen significativamente al fenómeno de isla de calor urbana, los pavimentos de concreto se presentan como una alternativa más beneficiosa para mejorar las condiciones de confort térmico. Esto se debe a su mayor reflectancia solar y menor capacidad de absorción de calor. En áreas urbanas, es común encontrar pavimentos de asfalto. Sin embargo, es necesario implementar estrategias de diseño urbano que integren áreas verdes y tecnologías de

pavimento permeable para mitigar los impactos adversos en el bienestar térmico de las personas (Aguilar González et al., 2017).

## H. Variables de diseño de pavimentos flexibles (asfalto)

### 1. Tiempo.

En esta sección se discuten los factores que influyen y limitan el diseño del pavimento en función del tiempo, así como la importancia de seleccionar los datos de entrada correctamente para los períodos de comportamiento y análisis. Tanto para pavimentos con alto como con bajo volumen de tráfico, estos elementos deben tenerse en cuenta. Las limitaciones temporales permiten al diseñador elegir una variedad de enfoques que varían desde la durabilidad inicial de la estructura hasta el período de análisis completo, donde el período de comportamiento coincide con el período de análisis. Estas opciones incluyen la opción de construcción por etapas, que implica una estructura inicial seguida de capas adicionales planificadas.

Los datos de entrada para pavimentos de alto tráfico deben demostrar la capacidad de la estructura para soportar cargas pesadas durante largos períodos de tiempo. Por otro lado, para pavimentos de bajo tráfico, el enfoque puede ser más flexible, permitiendo ajustes en el diseño a medida que se realizan observaciones y se obtienen datos adicionales. Este método permite un diseño más adaptable y efectivo, pero garantiza que el pavimento permanezca útil y duradero dentro del plazo establecido.

Las estrategias de diseño pueden incluir la construcción de una estructura inicial sólida que cumpla con los requisitos de carga y durabilidad desde el principio, o la implementación de una construcción por etapas, donde se agregan capas sucesivas según lo planificado, lo que puede ser más rentable y adaptable a los cambios en el tráfico y el uso.

**Periodo de comportamiento:** es el tiempo que una estructura nueva mantiene su funcionalidad antes de que sea necesaria una rehabilitación significativa. Incluye el tiempo que transcurre entre las diferentes rehabilitaciones y abarca desde el momento en que la estructura comienza a deteriorarse hasta el punto en que alcanza un nivel de servicio aceptable. El diseñador debe establecer límites basados en la experiencia y las políticas de la agencia, reconociendo que el mantenimiento tiene un impacto significativo en este período. Las prácticas de mantenimiento actuales, como las observadas en el *Estudio de carreteras experimentales AASHO*, son esenciales para garantizar que el pavimento sea duradero y funcional.

**Periodo de análisis:** se refiere al período de tiempo durante el cual se evaluará el rendimiento del pavimento. Este concepto es similar al concepto tradicional de "vida de diseño". Este período abarca cualquier estrategia de diseño y puede requerir la planificación de la construcción por etapas, incluidas las operaciones de rehabilitación subsecuentes y la estructura inicial. Para evaluar estrategias a largo plazo basadas en los costos del ciclo de vida, ahora se recomienda considerar períodos más largos cuando se diseñan pavimentos. Extender el período de análisis para incluir al menos una rehabilitación es fundamental, especialmente en vías urbanas de alto tráfico, donde se pueden considerar períodos aún más extensos.

Clasificación de la Vía	Período de Análisis (Años)
Urbana de Alto Volúmen de Tráfico	30 - 50
Rural de Alto Volúmen de Tráfico	20 - 50
Pavimentada de Bajo Volúmen de Tráfico	15 - 25
No Pavimentada de Bajo Volúmen de Tráfico	10 - 20

Figura 12. Periodo de análisis

## 2. Tráfico.

Los procedimientos de diseño de carreteras se fundamentan en las cargas acumuladas esperadas de un eje simple equivalente (ESAL) de 18 kips durante el período de análisis  $W_{18}$ . En el presente documento se describe el procedimiento para la conversión del tráfico vehicular variado a unidades equivalentes de carga de eje estándar de 18 kips (ESAL), incluyendo valores detallados de equivalencia.

En los diseños de infraestructuras viales que se proyectan para una durabilidad sin necesidad de rehabilitación durante todo el período de análisis, es suficiente tener información acerca del volumen total de tráfico vehicular que transitará en dicho lapso. En el caso de planificar una construcción progresiva que involucre trabajos de rehabilitación o repavimentación, es fundamental elaborar un gráfico que muestre la evolución del tráfico acumulado en términos de equivalentes de carga de eje estándar de 18 kips a lo largo del tiempo. El gráfico proporciona una representación visual de la distribución del tráfico a lo largo de diferentes períodos de tiempo.

El tráfico proyectado, suministrado por el equipo de planificación, consiste en la cantidad de solicitudes de ejes ESAL de 18 kips anticipadas en la vía. Para definir el tráfico en el carril de diseño, el diseñador debe multiplicar el flujo de vehículos por la dirección y el número de carriles, en caso de que sean más de dos  $W_{18}$ .

$$W_{18} = D_D * D_L * w_{18}$$

- $D_D$ : el factor de distribución direccional se define como una relación que considera las unidades equivalentes de carga por eje (ESAL) en diferentes direcciones, como este-oeste, norte-sur, entre otras.
- $D_L$ : el factor de distribución de carril es una relación que tiene en cuenta la distribución del tráfico en una dirección con dos o más carriles.
- $w_{18}$ : las unidades equivalentes de carga de 18 kips se han acumulado para una sección específica de la carretera en el estudio de análisis de tráfico proporcionado por los ingenieros.

Número de Carriles en cada dirección	% de ESAL de 18 kips en el Carril de Diseño
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4	50 - 75

Figura 13. Valores de  $D_L$  (AASHTO, 1993)

## I. Confiabilidad

Los conceptos de confiabilidad son empleados con el propósito de garantizar la durabilidad a lo largo de todo el período de análisis de las diversas alternativas de diseño de pavimentos. Al considerar posibles variaciones en la predicción del tráfico y del comportamiento del pavimento, este enfoque aporta un nivel de certeza al procedimiento de diseño. Esto garantiza un nivel de seguridad para asegurar la resistencia de las secciones del pavimento durante el período de diseño.

Es fundamental reducir el riesgo de fallas en los pavimentos a medida que crecen los niveles de tráfico y las demandas de la audiencia. Para lograr esto, se deben seleccionar niveles de confiabilidad más elevados, asignando valores superiores a las vías de mayor tráfico y valores inferiores a las carreteras locales.

El control de la confiabilidad del diseño y el comportamiento del pavimento se lleva a cabo a través de la utilización de un factor de confiabilidad  $F_R$ . Este factor se multiplica por el tráfico proyectado durante el período de diseño  $W_{18}$  con el fin de determinar las aplicaciones de tráfico de diseño  $W_{18}$  que serán empleadas en la ecuación de diseño. La confiabilidad de este factor está determinada por la Desviación Estándar Total  $S_o$ , la cual tiene en cuenta las posibles fluctuaciones en el tráfico proyectado y la variabilidad habitual en la condición del pavimento.

Al abordar la incertidumbre en el diseño como una variable independiente, el diseñador puede optar por emplear estimaciones promedio para cada dato de entrada en lugar de valores prudentes. Es necesario tener en cuenta la variación en todas las variables de diseño al evaluar el nivel de confiabilidad y la desviación estándar total.

La aplicación de los conceptos de confiabilidad requiere seguir ciertos pasos definidos:

- Determinar la clasificación funcional de las vialidades y evaluar la presencia de condiciones urbanas o rurales.
- Seleccionar el nivel de confiabilidad.
- Seleccionar una desviación estándar  $S_o$  que sea representativa de las condiciones locales. La predicción del error para pavimentos flexibles es de 0.35, lo que implica una desviación estándar de 0.45.

Clasificación Funcional	Nivel de Confiabilidad Recomendado	
	Urbano	Rural
Interestatal y Otras Vías Libres	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias Principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Figura 14. Niveles de confiabilidad sugeridos

### 1. Impacto ambiental.

El comportamiento del pavimento puede ser significativamente afectado por el medio ambiente. Las variaciones en la temperatura y la humedad pueden incidir en la resistencia, durabilidad y capacidad de carga tanto del pavimento como de los suelos que se encuentran debajo de este. Los efectos ambientales, como la expansión del suelo, los levantamientos, la congelación por heladas y la desintegración, pueden disminuir la calidad del mantenimiento y la eficacia del pavimento. El comportamiento del pavimento se ve afectado por diversos factores adicionales, tales como el envejecimiento, la sequedad y el deterioro causado por la exposición.

Para evaluar dichos efectos, es imprescindible tener en cuenta los parámetros utilizados para medir la expansión del suelo y el levantamiento causado por las heladas. En el análisis de diseño de estructuras de pavimento, es necesario considerar aquellos factores que puedan provocar una disminución notable en la funcionalidad o calidad de manejo. Esta evaluación debe llevarse a cabo en todas las estructuras de pavimento, a excepción de aquellas que estén cubiertas por agregados. Los factores mencionados pueden ser integrados en el procedimiento de diseño a través de la inclusión de modelos de predicción correspondientes (AASHTO, 1993).

## J. Comportamiento del pavimento flexible (asfalto)

### 1. Serviciabilidad.

La serviciabilidad de un pavimento se define como su aptitud para resistir el tráfico vehicular, tanto de automóviles como de camiones. La medida principal es el índice de serviciabilidad presente (PSI), el cual se encuentra en un rango de 0 (indicando un camino intransitable) a 5 (indicando un camino en perfectas condiciones). El diseño de pavimentos se fundamenta en el concepto de comportamiento-serviciabilidad. Este enfoque facilita la planificación de pavimentos al tener en cuenta un determinado volumen de tráfico y un nivel mínimo de serviciabilidad deseado al término de su vida útil.

El índice de serviciabilidad terminal  $P_t$  indica el umbral mínimo de serviciabilidad que debe alcanzarse antes de considerar la realización de labores de rehabilitación, refuerzo o reconstrucción. Para las vías principales, se recomienda un índice de presión de inflado (PSI) de 2.5 o superior, mientras que para las vías con menor flujo vehicular, se aconseja un PSI de 2.0. El umbral mínimo de funcionalidad puede determinarse considerando la aprobación por parte de la sociedad.

Nivel de Serviciabilidad Final	% de personas que lo considera inaceptable
3.0	12
2.5	55
2.0	85

Figura 15. Niveles mínimos de  $P_t$

En el caso de carreteras de menor jerarquía, donde las consideraciones económicas demandan minimizar la inversión inicial, se recomienda disminuir el período de diseño o el volumen total de tráfico en lugar de proyectar para una capacidad de servicio inferior a 2.0.

La duración necesaria para que una estructura de pavimento alcance su capacidad total de servicio está condicionada por el nivel de tráfico que soporta y por su estado inicial de servicio  $P_o$ . Por consiguiente, resulta fundamental analizar detenidamente la elección del Punto de Servicio de Interconexión (PSI) terminal. Es fundamental considerar que los valores de Índice de Servicio de Pavimento  $P_o$  registrados en la Carretera Experimental AASHTO fueron de 4.2 en el caso de pavimentos flexibles. Una vez que se hayan establecido los valores de  $P_o$  y  $P_t$ , es necesario aplicar la siguiente ecuación para determinar la variación total en el índice de serviciabilidad (AASHTO, 1993).

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

## 2. Ahullamiento permisible.

En esta guía de diseño, el ahullamiento se contempla únicamente como un parámetro de comportamiento aplicable a vías con pavimento de grava. A pesar de ser una cuestión relevante en la construcción de pavimentos de concreto asfáltico, no se dispone de un modelo de diseño específico para su incorporación en el presente manual. Es relevante resaltar que la profundidad de la huella anticipada en el modelo para caminos de grava no alude a un hundimiento superficial que pueda ser corregido con una motoniveladora, sino a un hundimiento severo relacionado con la deformación de la estructura del pavimento y el soporte de la subrasante. La profundidad de la huella permisible para un camino de grava está determinada por el nivel de tráfico diario promedio y generalmente oscila entre 1.0 y 2.0 pulgadas (AASHTO, 1993).

## 3. Pérdida de agregados.

En los caminos de grava superficial, la pérdida de agregados debido al tráfico y la erosión representa un desafío adicional. La disminución de material en el pavimento reduce su resistencia estructural, lo que provoca un aumento en el desgaste de la superficie.

Para resolver esta cuestión, es fundamental calcular tanto el espesor total de los agregados que se perderán durante el periodo de diseño como el espesor mínimo de agregados necesario para garantizar la funcionalidad de la superficie del pavimento. No obstante, la disponibilidad de información para pronosticar la tasa de disminución de agregados es limitada. No obstante, existen diversas ecuaciones propuestas para esta estimación, siendo relevante la formulada en Brasil, dada la similitud de las condiciones climáticas con el área de interés en Guatemala.

$$GL = (B/25.4)/(0.0045LADT + 3380.6/R \div 0.467G)$$

- GL: pérdida de agregados en pulgadas, durante el período de tiempo en consideración.
- B: número de operaciones de nivelación (con la motoniveladora) durante el período de tiempo en consideración.
- LADT: tráfico diario promedio en el carril de diseño (para caminos de una sola vía, usar el tráfico total en ambas direcciones)
- R: radio promedio de las curvas, en pies
- G: valor absoluto de la pendiente, en porcentaje .

Sin embargo, esta ecuación no presenta la pérdida en rutas con un alto número de transporte pesado en circulación; sin embargo existe una que sí considera este factor.

$$GL = 0.12 \div 0.1223(LT)$$

- GL: Pérdida de agregados en pulgadas, durante el período de tiempo en consideración.
- LT: Número de camiones cargados en miles.

La última ecuación, planteada por un estudio británico llevado a cabo en Kenia, agrega el concepto de años a la ecuación; sin embargo, solo es aplicable para la circulación de vehículos particulares (AASHTO, 1993).

$$AGL = [T^2/(T^2 + 5Q)] * f(4.2 + 0.092T + 0.889R^2 + 1.88VC)$$

- AGL: pérdida anual de agregados, en pulgadas.
- T: volumen de tráfico anual en ambas direcciones, en miles de vehículos.
- R: precipitación pluvial anual, en pulgadas
- VC: porcentaje de gradiente promedio en el camino
- f: 0.037 para gravas lateríticas  
0.043 para gravas cuarcíticas  
0.028 para gravas volcánicas  
0.059 para gravas coralíferas

## **K. Propiedades del material en el diseño estructural**

### **1. Módulo resiliente efectivo de subrasante.**

Se emplea el concepto de módulo resiliente para caracterizar los materiales en la guía de diseño. Es necesario realizar pruebas de laboratorio que simulen las condiciones de las estaciones húmedas para determinar el módulo resiliente en suelos de subrasante. Los módulos resilientes estacionales pueden correlacionarse con las propiedades del suelo. Es fundamental evaluar el impacto de las diferentes estaciones del año en el pavimento para calcular el módulo resiliente de la subrasante. Es necesario ensayar las muestras bajo diversas condiciones de humedad para obtener resultados significativamente diferentes en los módulos resilientes. En situaciones donde es complicado reproducir las condiciones de ensayo, como en condiciones de heladas y primavera húmeda, es factible emplear valores prácticos del módulo resiliente. Se analizan las relaciones entre el módulo resiliente y el contenido de humedad en el laboratorio. Se calcula el módulo resiliente de cada estación para determinar la variación estacional. Mida deflexiones para calcular el módulo resiliente de pavimentos en servicio. Su eficacia se demuestra en distintos momentos a lo largo del año. En el diseño de pavimentos flexibles, es necesario expresar los datos estacionales en función del módulo resiliente de la subrasante. Se suman los daños de cada estación individualmente para obtener el cálculo del daño anual. Al diseñar pavimentos flexibles, se debe considerar el criterio de serviciabilidad. Divide las secciones de diseño con coeficientes de variación superiores a 0.15 en secciones más pequeñas. Para calcular el promedio del daño relativo, sume los valores estimados de daño relativo de cada módulo estacional en sus respectivos períodos. Se calcula el módulo resiliente efectivo de la subrasante  $M_R$  según el criterio de serviciabilidad para el diseño de pavimentos flexibles (AASHTO, 1993).

### **2. Módulo efectivo de reacción de la subrasante.**

De manera similar al módulo resiliente efectivo del suelo de subrasante para pavimentos flexibles, se desarrollará un módulo efectivo de reacción de la subrasante (valor-k) para pavimentos rígidos. Dado que el valor-k es proporcional al módulo resiliente del suelo de subrasante, se usarán los períodos de duración de las estaciones y los módulos estacionales como datos de entrada para estimar un valor-k efectivo de diseño.

Debido a los efectos de las características de la subbase sobre el valor-k efectivo de diseño, estas determinaciones se incluyen en un procedimiento de diseño iterativo paso a paso (AASHTO, 1993).

### **3. Caracterización de los materiales de las capas del pavimento flexible (asfalto).**

Se ha establecido que, entre la variedad de propiedades de materiales y métodos de ensayo de laboratorio disponibles para evaluar la resistencia de los materiales estructurales utilizados en pavimentos, solo uno ha sido seleccionado como referencia para el diseño. Para el diseño de pavimentos flexibles, es crucial tener un entendimiento profundo de los coeficientes de capa que han sido tradicionalmente utilizados. A pesar de esto, el módulo elástico juega un papel esencial en la caracterización de los materiales.

El módulo elástico es una propiedad fundamental en ingeniería para cualquier material utilizado en pavimentación o subrasante. No obstante, en el caso de materiales que experimentan deformaciones permanentes importantes bajo carga, esta característica podría no ser indicativa de su verdadero comportamiento. El módulo resiliente, que representa la relación entre el esfuerzo y la deformación en condiciones de carga normales, se considera una medida más apropiada. La resistencia del material juega un papel crucial en los procedimientos futuros basados en criterios mecánicos, los cuales podrán tener en cuenta tanto la resistencia como la rigidez.

En el caso de materiales de base estabilizada que puedan experimentar agrietamiento en determinadas condiciones, la rigidez puede no ser un parámetro adecuado para evaluar el deterioro. A pesar de que el concepto de módulo resiliente es válido para diversos materiales, en este manual se emplea la designación  $M_R$  exclusivamente en referencia al suelo de subrasante. Se emplean diferentes notaciones para los módulos de elasticidad de las subbases  $E_{sa}$ , bases  $E_{BS}$ , concreto asfáltico  $E_{Ac}$  y concreto de cemento Portland  $E_c$ .

El procedimiento para calcular el módulo resiliente puede diferir dependiendo del tipo de material utilizado. Sin embargo, pueden tomarse en consideración algunos valores estandarizados según el clima de la región de estudio en el momento del experimento.

<b>Roadbed Moisture Condition</b>	<b>Roadbed Soil Resilient Modulus (psi)</b>
Wet	5,000
Dry	6,500
Spring-Thaw	4,000
Frozen	20,000

Figura 16. Valor de módulo resiliente efectivo del suelo de cimentación

El proceso comienza con la introducción del módulo estacional en los intervalos temporales correspondientes. Si la duración de la estación más corta es de quince días, entonces todas las estaciones deben ser divididas en intervalos de quince días, de manera que se complete cada uno de los períodos correspondientes. Si la duración de la estación más breve es de un mes, entonces todas las estaciones deben ser establecidas en función de meses enteros y solo se permitirá completar un mes a la vez.

El paso siguiente implica calcular los valores del daño relativo ( $u_r$ ) para cada módulo estacional. Para llevar a cabo este procedimiento, se utiliza la escala vertical de la ecuación correspondiente, tal como se ilustra en la Figura 2.3. Como ilustración, se puede mencionar que el índice de daño relativo asociado a un módulo resiliente de la subrasante de 4,000 psi es de 0.51.

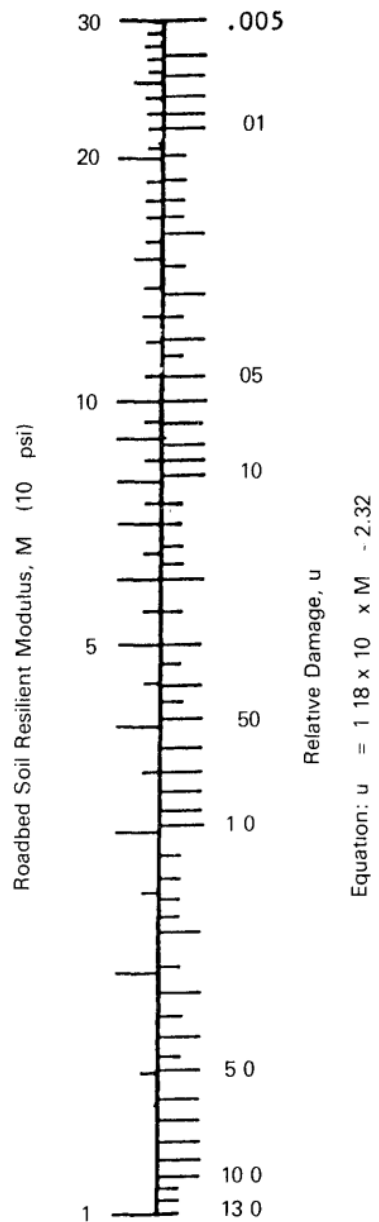
Para determinar el daño relativo promedio, es necesario sumar los valores  $u_r$  y luego dividir el resultado por el número de incrementos de estaciones, ya sea 12 o 24. Posteriormente, el módulo resiliente efectivo del suelo de subrasante ( $M_R$ ) se determinará como el valor que representa el daño relativo promedio en la escala  $M_{R-u}$ . En la Figura 9 se presenta un ejemplo de la aplicación del procedimiento de estimación del módulo efectivo  $M_R$ . Se reitera la importancia de utilizar exclusivamente el valor efectivo  $M_R$  en el diseño de pavimentos flexibles, siguiendo el criterio de servicio.

Month	Roadbed Soil Modulus, M (psi)	Relative Damage u
Jan	6,500	0.167
	20,000	0.012
Feb	20,000	0.012
	4,000	0.515
Mar	5,000	0.307
	5,000	0.307
Apr	5,000	0.307
	5,000	0.307
May	5,000	0.307
	5,000	0.307
June	6,500	0.167
	6,500	0.167
July	6,500	0.167
	6,500	0.167
Aug	6,500	0.167
	6,500	0.167
Sept	6,500	0.167
	5,000	0.307
Oct	5,000	0.307
	5,000	0.307
Nov	5,000	0.307
	6,500	0.167
Dec	6,500	0.167
	6,500	0.167
Summation: u =		5.446

$$\text{Average: } \frac{5.46}{24} = 0.227$$

Effective Roadbed Soil Resilient Modulus,  $M_R$  (psi) 5,700  
(corresponds to  $u_f$ )

Figura 17. Ejemplo de la aplicación del procedimiento de estimación del módulo efectivo  $M_R$  (AASHTO, 1993)



El primer paso de este proceso consiste en ingresar el módulo estacional en sus respectivos períodos de tiempo. Si la estación más corta es de medio mes, luego todas las estaciones deberán ser divididas en términos de medios meses, llenando cada uno de los espacios. Si la estación más corta

es de un mes, luego todas las estaciones deberán ser definidas en términos de meses completos y solamente un espacio por mes podrá ser rellenado.

El siguiente paso consiste en estimar los valores del daño relativo  $u_t$  correspondientes a cada módulo estacional. Esto se hace usando la escala vertical de la ecuación correspondiente mostrada en la Figura 9. Por ejemplo, el daño relativo correspondiente a un módulo resiliente de la subrasante de 4,000 psi es 0.51.

A continuación, los valores  $u$  deberán ser sumados y divididos por el número de incrementos de estaciones (12 o 24) para determinar el daño relativo promedio. El módulo resiliente efectivo del suelo de subrasante  $M_R$  será luego, el valor correspondiente al daño relativo promedio en la escala  $M_R - u_t$ . Nuevamente, se enfatiza en que este valor efectivo  $M$  deberá ser usado solamente para el diseño de pavimentos flexibles basados en el criterio de servicio.

#### 4. Coeficientes de capa.

Esta sección describe un método para estimar los coeficientes estructurales de capa AASHTO (valores  $a_i$ ), necesarios para el diseño estructural de pavimentos flexibles estándar. Se asigna un valor de este coeficiente a cada capa de material en la estructura del pavimento para convertir los espesores de capa en el número estructural (SN). Este coeficiente de capa representa la relación empírica entre el SN y el espesor, y mide la capacidad relativa del material para funcionar como un componente estructural del pavimento. La ecuación general del número estructural refleja el impacto relativo de los coeficientes de capa ( $a_i$ ) y el espesor ( $D_i$ ).

$$SN = \sum a_i * D_i$$

Aunque el módulo elástico (resiliente) se ha adoptado como una medida de la calidad del material, es necesario identificar los coeficientes de capa correspondientes debido a su papel en la aproximación al número estructural de diseño. Aunque existen correlaciones para determinar el módulo a partir de ensayos como el valor-R, se recomienda la medición directa usando los métodos AASHTO T274 para materiales granulares y ASTM D4123 para concreto asfáltico y otros materiales estabilizados.

Investigaciones y estudios de campo indican que muchos factores influyen en los coeficientes de capa, por lo que la experiencia de la agencia en la implementación de estos resultados es crucial. Por ejemplo, el coeficiente de capa puede variar con el espesor, el soporte de las capas inferiores y la posición en la estructura del pavimento.

Es importante notar que los valores del módulo resiliente obtenidos en el laboratorio pueden diferir significativamente de las condiciones in-situ. La presencia de una capa no adherida muy blanda sobre una capa rígida inferior puede resultar en una descompactación y una correspondiente reducción de la rigidez. Como guía, la relación del módulo resiliente de la capa más superficial a la de la capa más baja no debe exceder los valores que resulten en esfuerzos tensionales en capas de materiales granulares no adheridos.

La estimación de estos coeficientes se divide en cinco categorías según el tipo y función del material de la capa: concreto asfáltico, base granular, subbase granular, base tratada con cemento y base tratada con asfalto. También son aceptables otros materiales como la cal, cenizas volantes con cal y cenizas volantes con cemento, y cada agencia debe desarrollar sus propias guías (AASHTO, 1993).

**Capa superficial de concreto asfáltico.** La Figura 18 presenta una carta para estimar el coeficiente estructural de capa de una superficie de concreto asfáltico de gradación densa, basándose en su módulo elástico (resiliente)  $E_{Ac}$  a 68°F (20°C). Es recomendable tener precaución con los valores del módulo que superan los 450,000 psi. Aunque los concretos asfálticos con módulos más elevados son más rígidos y resistentes a la flexión, también son más susceptibles a agrietamientos térmicos y por fatiga.

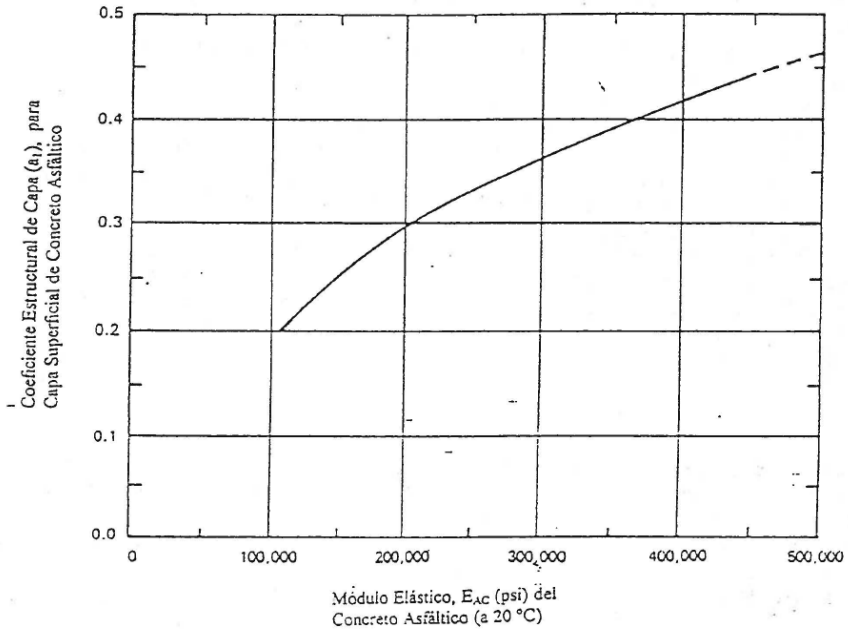
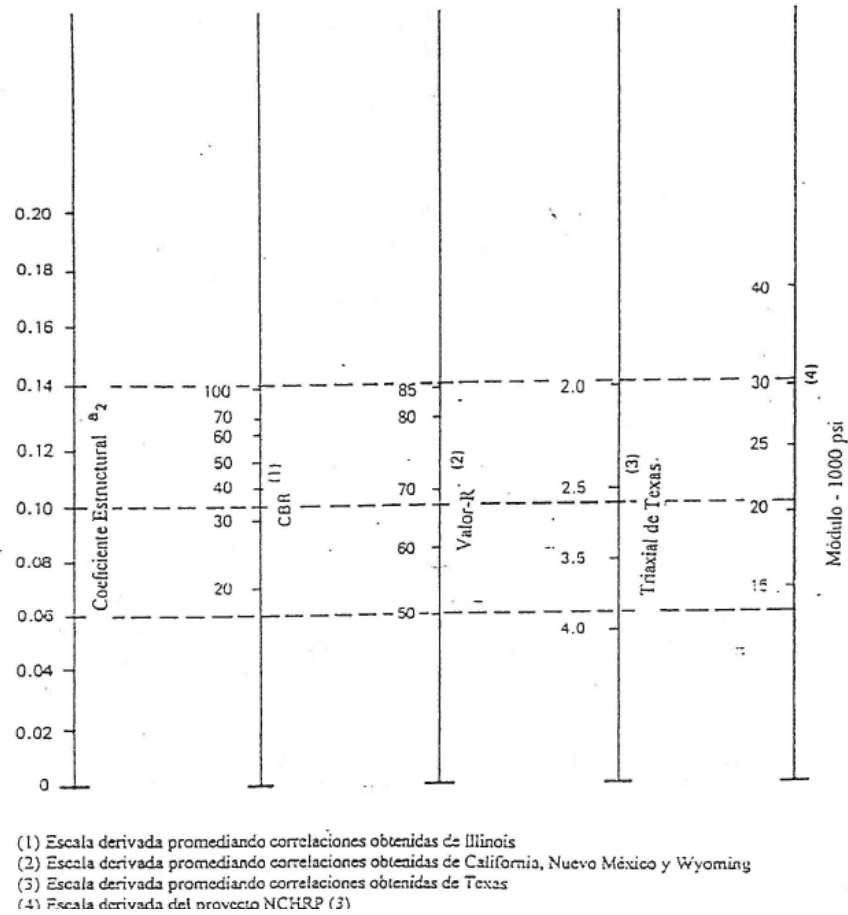


Figura 18. Estimación de coeficiente estructural de capa de concreto asfáltico

**Capas de base granular.** La Figura 19 proporciona una carta para estimar el coeficiente de capa estructural  $a_2$ , basado en uno de cuatro resultados diferentes de ensayos de laboratorio, incluyendo el módulo resiliente de la base  $E_{ss}$ . La base de la Carretera Experimental AASHTO se utiliza para esta correlación.

Figura 19. Variación en el coeficiente estructural de capa base con diferentes parámetros de resistencia



También puede estimarse el coeficiente de capa,  $a_2$  para una base de material granular, a partir de su módulo elástico o resiliente  $E_{BS}$ :

$$a_2 = 0.249 * \log(E_{BS}) - 0.997$$

Para capas de base de agregados,  $E_{BS}$  es una función del estado de esfuerzos  $\theta$  dentro de la capa.

$$E_{BS} = k_1 * \theta * k_2$$

- $\theta$  = Estado de esfuerzos o suma de los esfuerzos principales  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$  psi
- $k_1 k_2$  = Constantes de regresión, las cuales son en función del tipo de material

**Valores típicos de  $k_1$  y  $k_2$**

- $k_1$  = 3,000 a 8,000
- $k_2$  = 0.5 a 0.7

Estado de Humedad	Ecuación	Estado de Esfuerzos (psi)			
		$\theta=5$	$\theta=10$	$\theta=20$	$\theta=30$
Seco	$8,000\theta^{0.6}$	21,012	31,848	48,273	61,569
Húmedo	$4,000\theta^{0.6}$	10,506	15,924	24,136	30,748
Mojado	$3,200\theta^{0.6}$	8,404	12,739	19,309	24,627

Figura 20. Valores del módulo para la base

$E_{BS}$  es una función no solamente de la humedad, sino también del estado de esfuerzos  $\theta$ . Los valores del estado de esfuerzos dentro de la capa de base varían con el módulo de subrasante y el espesor de la capa superficial. Los valores típicos a usar en el diseño son:

Espesor del Concreto Asfáltico (pulgadas)	Módulo resiliente del suelo de subrasante (psi)		
	3,000	7,500	15,000
Menos de 2	20	25	30
2 - 4	10	15	20
4 - 6	5	10	15
Mayor de 6	5	5	5

Figura 21. Espesor típico de diseño

Se alienta a cada agencia a desarrollar relaciones específicas para sus materiales de base (por ejemplo,  $MR = k_1 (\theta) k_2$ ) utilizando el método AASHTO T 274. Sin embargo, en ausencia de estos datos, se pueden usar los datos del siguiente cuadro.

Condición de Humedad	$k_1$ *	$k_2$ *
(a) Base		
Seco	6,000-10,000	0.5-0.7
Húmedo	4,000-6,000	0.5-0.7
Mojado	2,000-4,000	0.5-0.7
(b) Sub base		
Seco	6,000-8,000	0.4-0.6
Húmedo	4,000-6,000	0.4-0.6
Mojado	1,500-4,000	0.4-0.6

Figura 22. Valores típicos para  $k_1$  y  $k_2$  de materiales de base y subbase no adheridas

(AASHTO, 1993)

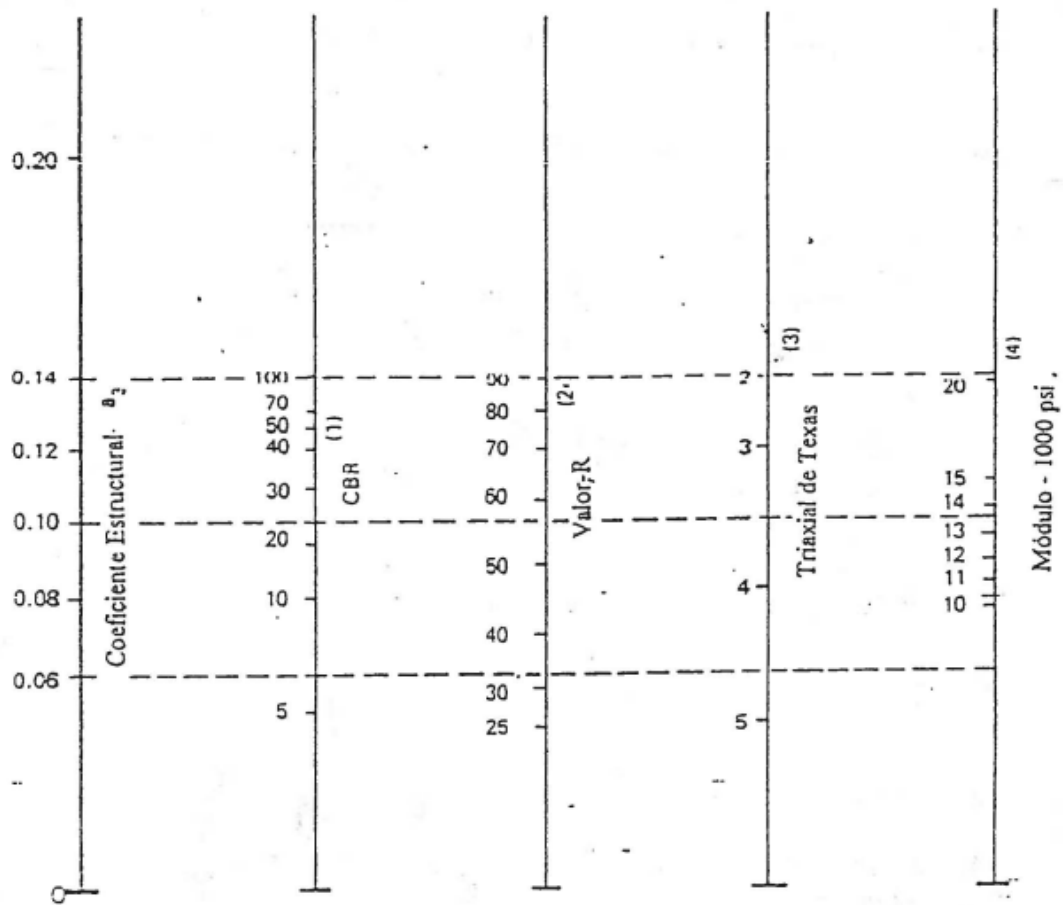
### Capas de subbase granular

La Figura 23 presenta una carta para estimar el coeficiente de capa  $a_3$  basado en uno de cuatro diferentes resultados de ensayos de laboratorio sobre materiales de subbase granular, incluyendo el

módulo resiliente de la subbase. La ecuación base de la carretera experimental AASHO se utiliza para estas correlaciones.

La relación de  $E_{SB}$  versus  $a_2$ , similar a la de los materiales granulares, es:

$$a_3 = 0.227 * \log(E_{SB}) - 0.839$$



- (1) Escala derivada de las correlaciones obtenidas de Illinois
- (2) Escala derivada de las correlaciones obtenidas del Instituto del Asfalto, California, Nuevo México y Wyoming
- (3) Escala derivada de las correlaciones obtenidas de Texas
- (4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Figura 23. Variaciones en el coeficiente de capa de subbase granular con diferentes parámetros

Para capas de subbase de agregados, el módulo resiliente de la subbase (Esa) está afectado por el estado de esfuerzos  $\theta$  de manera similar a la capa de base. Los valores típicos de  $k_1$  van de 1,500 a 6,000, mientras que  $k_2$  varía entre 0.4 y 0.6. Los valores para los materiales de subbase en la Carretera Experimental AASHO fueron:

Estado de Humedad	Relación desarrollada	Estado de Esfuerzos (psi)		
		$\theta=5$	$\theta=7.5$	$\theta=10$
Húmedo	$M_R = 5,400 \theta^{0.6}$	14,183	18,090	21,497
Mojado	$M_R = 4,600 \theta^{0.6}$	12,082	15,410	18,312

Figura 24. Valores para los materiales de subbase

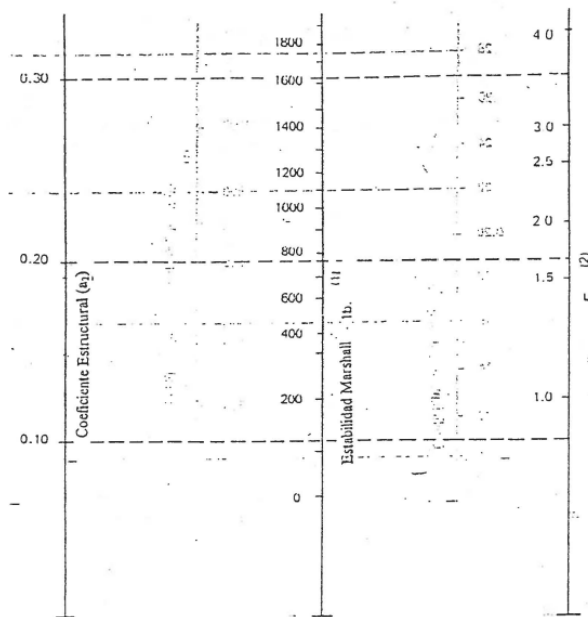
Los estados de esfuerzos ( $\theta$ ) que pueden ser usados como una guía para seleccionar el valor del módulo, para espesores de subbases comprendidos entre 6 y 12 pulgadas son:

Espesor de Concreto Asfáltico (pulgadas)	Estado de Esfuerzos (psi)
Menos de 2	10.0
2 - 4	7.5
Mayor de 4	5.0

Figura 25. Estados de refuerzos  $\theta$  para la selección del modulo (AASHTO, 1993)

### Bases tratadas con productos asfálticos

La Figura 26 presenta una carta para estimar el coeficiente de capa estructural  $a_2$  para un material de base tratado con productos asfálticos, ya sea a partir de su módulo elástico  $E_{BS}$  o, alternatively, a partir de su estabilidad Marshall (AASHTO T 245, ASTM D1559).



(1) Escala derivada de las correlaciones obtenidas de Illinois.  
(2) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Figura 26. Variación de  $a_2$  en bases tratadas con bitumen con los parámetros de resistencia de la base (AASHTO, 1993)

## L. Características estructurales del pavimento flexible (asfalto)

### 1. Drenaje.

Esta sección se enfoca en seleccionar los datos necesarios para manejar los efectos de diferentes niveles de drenaje en la predicción del comportamiento de los pavimentos. No se incluye una guía para el diseño detallado de drenajes ni procedimientos constructivos, ni se establecen criterios sobre la efectividad de distintos métodos de drenaje. Es responsabilidad del ingeniero de diseño determi-

nar el nivel de drenaje adecuado para las condiciones específicas del proyecto. A continuación, se presentan definiciones generales de diferentes niveles de drenaje en la estructura del pavimento.

Calidad de Drenaje	Tiempo de Remoción del Agua
Excelente	2 Horas
Bueno	1 día
Regular	1 Semana
Pobre	1 Mes
Muy Pobre	No Drena

Figura 27. Calidad de drenaje y tiempo de remoción

**Pavimentos flexibles.** El tratamiento del nivel esperado de drenaje para un pavimento flexible se realiza mediante el uso de coeficientes de capa modificados, utilizando un coeficiente de capa efectivo mayor para mejorar las condiciones de drenaje. El factor que modifica el coeficiente de capa se denomina valor ( $m_i$ ) y se integra en la ecuación del número estructural  $SN$  junto con el coeficiente de capa ( $a_i$ ) y el espesor ( $D_i$ ).

$$SN = a_1 * D_1 \div a_2 * D_2 * m_2 \div a_3 * D_3 * m_3$$

La Figura 20 presenta los valores  $m_i$  recomendados en función de la calidad del drenaje y el porcentaje de tiempo durante el año en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación. Esto depende de las precipitaciones anuales promedio y las condiciones de drenaje que aún se mantienen. Como base de comparación, el valor de  $m_i$  para las condiciones de la Carretera Experimental AASHO es 1.0, independientemente del tipo de material.

**TABLA 2.4** Valores de  $m_i$  recomendados para los Coeficientes de Capa Modificados de Materiales de Base y Subbase no Tratada en Pavimentos Flexibles

Calidad del Drenaje	% del Tiempo que la Estructura del Pavimento está Expuesta a Niveles de Humedad Cercanos a la Saturación			
	< 1	1 - 5	5 - 25	> 25
Excelente	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Bueno	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Regular	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80
Pobre	1.15 - 1.05	1.05 - 0.8	0.80 - 0.60	0.60
Muy Pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

Figura 28. Valores de  $m_i$  recomendados

**Nota:** esto solo es aplicado sobre las capas de base y subbase no tratadas (AASHTO, 1993).

## M. Diseño de pavimentos flexibles (asfalto)

Esta sección describe el diseño para pavimentos de concreto asfáltico (CA) y tratamientos superficiales (TS) con niveles de tránsito significativos (más de 50,000 ESAL de 18 kips) durante todo el período de funcionamiento. El diseño de las superficies de CA y TS se basa en identificar el número estructural (NE) del pavimento flexible para soportar las cargas proyectadas por ejes. El proyectista determina si se requiere una superficie de TS simple o doble, o una superficie pavimentada de CA, según las condiciones específicas. En el apéndice H se presenta un ejemplo de aplicación del procedimiento de diseño de un pavimento flexible.

### 1. Determinación del número estructural.

El ejemplo adjunto presenta el nomograma recomendado para determinar el número estructural de diseño (NE) requerido para condiciones específicas, incluyendo:

- 1) El tránsito futuro estimado,  $W_{18}$ , para el período de diseño.
- 2) La confiabilidad, R, asumiendo que todos los datos de entrada son valores promedio.
- 3) La desviación estándar total,  $S_o$ .
- 4) El módulo resiliente efectivo del material del suelo de fundación, MR.
- 5) La pérdida de serviciabilidad de diseño,  $\Delta PSI = P_o - P_t$ .

SOLUCION DEL NOMOGRAMA

$$\log_{10} W_{18} = z_R \cdot S_0 + 5.36 \cdot \log_{10} (SN+1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log_{10} M_R - 8.07$$

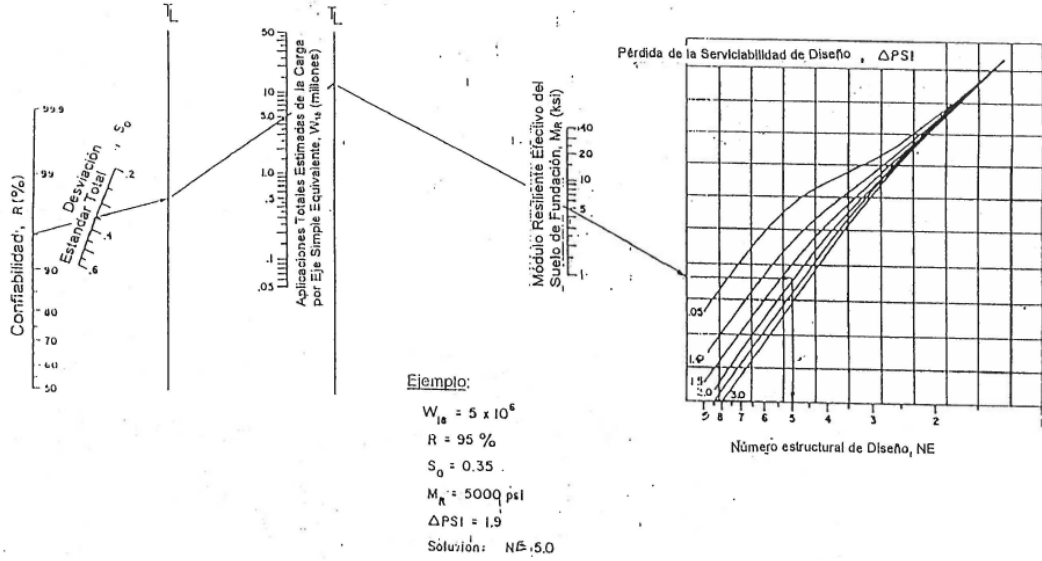


Figura 29. Ejemplo de determinación de numero estructural (AASHTO, 1993)

**2. Construcción por etapas.**

La experiencia en algunos estados ha mostrado que, además de la resistencia de un pavimento flexible, puede haber un período máximo de funcionamiento asociado con una estructura inicial sujeta a un nivel significativo de tránsito de camiones. Si el período de análisis es de 20 años o más y el período máximo de funcionamiento es menor, puede ser necesario considerar la construcción por etapas (rehabilitación planificada) en el diseño. Esto es especialmente relevante para análisis económicos de ciclo de vida, donde se evalúa el intercambio entre los espesores de la estructura inicial y las sobrecapas futuras.

En estas situaciones, es crucial verificar las restricciones sobre el período mínimo de funcionamiento dentro de las diferentes estrategias alternativas. También es importante combinar la confiabilidad para cada etapa de la estrategia. Por ejemplo, si cada etapa de una estrategia de tres etapas tiene un 90 % de confiabilidad, la confiabilidad total es del 72.9 %. Si se desea una confiabilidad total del 95 %, cada etapa debe tener una confiabilidad del 98.3 %. La combinación de confiabilidad puede ser crítica, y deben considerarse oportunidades para corregir problemas posteriores (AASHTO, 1993).

**3. Espesores de capa.**

Una vez determinado el número estructural de diseño (NE) para un pavimento, se deben identificar los espesores de las capas de pavimento que, combinados, proporcionen la capacidad de carga correspondiente al NE de diseño. La ecuación para convertir el NE en espesores reales de superficie,

Espesores mínimos (pulgadas)		
Trafico, ESAL's	Concreto Asfáltico	Base de Agregados
menos de 50,000	1.0 (o tratamiento superficial)	4
50,001-150,000	2.0	4
150,001-500,000	2.5	4
500,001-2,000,000	3.0	6
2,000,001-7,000,000	3.5	6
mayor que 7,000,000	4.0	6

Figura 30. Espesor mínimo de capas

base y subbase es:

$$NE = a_1 * D_1 \div a_2 * m_2 \div a_3 * D_3 * m_3$$

- $a_1, a_2, a_3$  = son los coeficientes estructurales de las capas de superficie, base y subbase.
- $D_1, D_2, D_3$  = son los espesores de las capas de superficie, base y subbase.

Esta ecuación asegura que los espesores combinados de las diferentes capas del pavimento cumplan con el número estructural de diseño necesario para soportar las cargas previstas.

La ecuación del NE no tiene una solución única, lo que permite múltiples combinaciones de espesores de capas que son válidas. Los espesores de las capas de un pavimento flexible deben redondearse a la media pulgada más cercana. Al seleccionar los espesores de capa, es crucial considerar tanto la efectividad de costos como las restricciones de construcción y mantenimiento para evitar diseños impracticables.

Económicamente, si la relación de costos entre la capa 1 y la capa 2 es menor que la relación del número de veces el coeficiente de capa y el coeficiente de drenaje, el diseño más rentable será el que utilice el mínimo espesor de base. Es importante tener en cuenta que generalmente no es práctico ni económico usar espesores menores a ciertos mínimos. Por lo tanto, se establecen los siguientes espesores mínimos prácticos para cada capa de pavimento:

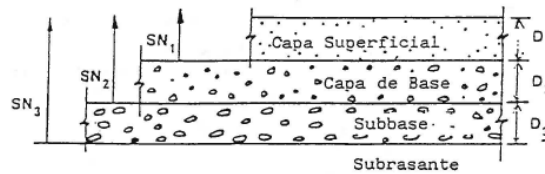
Dado que los espesores mínimos pueden variar según las prácticas y condiciones locales, es posible que las agencias de diseño quieran ajustarlos según sus necesidades específicas. Las agencias también deben establecer espesores efectivos y coeficientes de capa para tratamientos superficiales simples y dobles. Aunque el espesor de la capa de tratamiento superficial puede ser insignificante en el cálculo del NE, sus efectos en las propiedades de la base y la subbase pueden ser significativos debido a la reducción en la infiltración de agua superficial (AASHTO, 1993).

#### 4. Análisis del diseño por capas.

Es importante reconocer que, para los pavimentos flexibles, la estructura es un sistema estratificado y debe diseñarse en consecuencia. Según los principios mostrados, primero se debe calcular el número estructural requerido sobre el suelo de fundación. Luego, se debe calcular el número estructural requerido sobre las capas de subbase y base, utilizando los valores de resistencia aplicables para cada una.

Trabajando con las diferencias entre los números estructurales calculados para cada capa, se puede determinar el espesor máximo permisible de cada una. Por ejemplo, el número estructural máximo permisible para el material de subbase debe ser igual al número estructural requerido sobre la subbase menos el número estructural requerido sobre el suelo de fundación. De manera similar, se pueden determinar los números estructurales de las otras capas. Los espesores de las capas respectivas se pueden calcular como se muestra en la Figura 31.

Es importante tener en cuenta que este procedimiento no es adecuado para determinar el NE sobre materiales de subbase o base con un módulo superior a 40,000 psi. En estos casos, los espesores de las capas sobre estos materiales deben decidirse considerando la relación costo-efectividad y los espesores mínimos prácticos (AASHTO, 1993).



$$D^*_1 > \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN^*_1 = a_1 D^*_1 \geq SN_1$$

$$D^*_2 > \frac{SN_2 - SN^*_1}{a_2 m_2}$$

$$SN^*_1 + SN^*_2 \geq SN_2$$

$$D^*_3 > \frac{SN_3 - (SN^*_1 + SN^*_2)}{a_3 m_3}$$

- 1) a, D, m y SN representan los valores mínimos requeridos
- 2) Un asterisco junto a D o a SN, indica el valor actualmente usado el cual debe ser igual o mayor al valor requerido.

Figura 31. Ejemplo para determinar espesores de capas usando aproximaciones

## **VI. METODOLOGIA**

### **A. FASE 1. Recolección de datos**

Durante la fase de recolección de datos se buscó la obtención y organización de información crucial con el propósito de fundamentar la creación de directrices precisas y pertinentes dirigidas a la mejora de la calidad y longevidad de los pavimentos asfálticos en Guatemala.

En esta etapa, se llevó a cabo una inmersión exhaustiva en diversas fuentes de datos, abarcando normativas tanto nacionales como internacionales, así como archivos geoespaciales, documentos académicos y regulaciones específicas vinculadas al pavimento asfáltico. Esto habilitó la comprensión de la diversidad de estándares, metodologías y requisitos actualmente vigentes en Latinoamérica y distintas regiones del mundo con problemáticas o condiciones climatológicas similares, al tiempo que proporcionó una retroalimentación sobre las mejores prácticas a nivel global, lo que, haciendo uso de la experiencia de expertos en el campo, permitió que la información acumulada funcione como sólido punto de partida para abordar los desafíos asociados al diseño, mantenimiento y reparación de pavimento asfáltico en Guatemala.

Adicionalmente, se aprovechó la experiencia y conocimientos de instituciones destacadas, tales como la Dirección General de Caminos de Guatemala, el Instituto de Asfalto de Guatemala, y renombradas entidades académicas como la Universidad del Valle de Guatemala y la Universidad San Carlos de Guatemala, así como la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales.

### **B. FASE 2. Secuencia de procedimientos**

#### **1. Etapa 01 - ordenamiento y clasificación de datos.**

En esta fase, se llevó a cabo la tabulación de datos que engloba la información detallada sobre las carreteras que se encuentran dentro del territorio nacional de Guatemala. El propósito principal de esta acción fue estructurar y mantener un control riguroso sobre la información relevante, enfocándose en campos críticos que abarcan aspectos como la longitud de las carreteras, la jurisdicción a la que pertenecen, el tipo de carpeta de rodadura utilizada, su clasificación vial, la entidad responsable de su administración y el estado actual de las mismas.

Para llevar a cabo esta tarea, se recopilaron diversos cuadros y mapas que contaban con la información que se requería. Este enfoque brindó un alto grado de flexibilidad y accesibilidad a los datos, facilitó su manejo y disponibilidad para cualquier persona que requiera acceder y analizar esta información. La estandarización y organización de los datos en cuadros y mapas permitió una gestión eficaz y una fácil consulta, optimizando así el proceso de análisis y evaluación de la infraestructura vial en el territorio guatemalteco.

#### **2. Etapa - 02 Análisis de datos.**

En esta etapa, se llevó a cabo un diagnóstico de los datos previamente sometidos a procesos de

filtrado y organización. El propósito fue orientarnos hacia nuestra muestra de estudio, que abarca específicamente las carreteras con pavimento asfáltico. El enfoque principal de este diagnóstico fue la evaluación detallada de aspectos relacionados con el diseño, el mantenimiento y la reparación de estas carreteras. Asimismo, se analizó el comportamiento de este tipo de carreteras en otras regiones del mundo y se realizó una comparación con el área de estudio.

El objetivo fundamental fue identificar y destacar procedimientos y estrategias adecuadas para cada carretera que forma parte de la muestra de estudio. Esta muestra se ha extraído de la población general de carreteras en el territorio de Guatemala.

### **C. Generación de resultados**

En virtud de los datos previamente establecidos, se llevó a cabo la generación de un archivo recopilatorio de prácticas eficientes y de ejemplos de su correcta aplicación. Este archivo servirá para representar teóricamente las diversas carreteras que se encuentran dentro del conjunto de muestras de estudio y resaltarán las múltiples características que permiten su clasificación, manejo o reconstrucción .

Así mismo, empleando la información provista por las distintas entidades, se procedió a la creación de un documento técnico que aborda los aspectos relativos al diseño, mantenimiento y reparación de las carreteras incluidas en el conjunto de muestras de estudio. Este documento se desarrolló en conformidad con las normativas aprobadas y las mejores prácticas en el campo de la ingeniería vial alrededor del mundo, con el propósito de proporcionar directrices precisas y prácticas que respalden la gestión eficaz de las carreteras pavimentadas con asfalto en cuestión.

### **D. Presentación**

El documento generado previamente, concebido como resultados de la investigación, fue empleado con el propósito de su presentación y exposición. En el documento se incluyen los mapas geoespaciales obtenidos gracias a las entidades correspondientes. Además, se destacan los documentos técnicos, los cuales asumieron la denominación de "guía de diseño, mantenimiento y reparación de cintas asfálticas con parámetros nacionales".

Esta guía se desarrolló con base en los hallazgos de la investigación, en conformidad con las regulaciones y estándares nacionales pertinentes. Se presentó como herramientas técnicas y normativas que proporcionaron directrices precisas y sistemáticas para el diseño, mantenimiento y reparación de cintas asfálticas, en concordancia con las prácticas y regulaciones nacionales aplicables, además de prácticas y soluciones internacionales.

## VII. RESULTADOS Y DISCUSION

La implementación de pavimentos flexibles en la región oriental de Guatemala ha permitido identificar patrones consistentes en el comportamiento de estos pavimentos frente a una amplia variedad de condiciones climáticas y ambientales. El análisis se centró principalmente en la evaluación de la reacción de los pavimentos frente a una variedad de factores ambientales, como la temperatura superficial, la humedad relativa, la resistencia a la abrasión, la durabilidad de los materiales empleados y el confort térmico para los usuarios, aspectos esenciales en entornos con condiciones climáticas cálidas y húmedas, como las que se encuentran en la región objeto de estudio.

Uno de los descubrimientos más significativos que se han realizado en este ámbito de estudio es la influencia determinante que ejercen las elevadas temperaturas en la resistencia estructural y en la durabilidad a largo plazo de las diversas capas que conforman los pavimentos flexibles. En particular, los pavimentos asfálticos suelen caracterizarse por tener una baja reflectancia solar y una alta capacidad de absorción de calor, lo cual conlleva a que las temperaturas superficiales sean sumamente elevadas, alcanzando incluso valores de hasta 70 °C en zonas como la región oriental de Guatemala durante los períodos más calurosos del año. Estas condiciones climáticas adversas, tales como la lluvia intensa y la exposición prolongada al sol, tienen la capacidad de acelerar de manera considerable el proceso de deterioro del pavimento, lo cual se refleja en la aparición de hendiduras, grietas y baches que impactan de forma negativa en la calidad de la superficie de la carretera. Esta problemática no solo implica un peligro potencial para la integridad de los vehículos que circulan por la carretera, sino que también amenaza la seguridad tanto de los conductores como de los peatones que transitan por la zona. Este fenómeno también ha sido observado en numerosos estudios realizados en diferentes regiones geográficas similares, como la Ciudad de México y el estado de Pensilvania, donde se han documentado picos de temperatura superficiales extremadamente elevados, alcanzando valores de hasta 60 y 70 °C, respectivamente.

Por el contrario, los pavimentos de concreto presentan una capacidad notablemente superior para reflejar la radiación solar y para absorber una cantidad menor de calor, lo cual se traduce en temperaturas superficiales considerablemente más bajas, generalmente oscilando entre los 40 °C y 45 °C, lo que contribuye a un ambiente más fresco y confortable en áreas urbanas densamente pobladas. Esto no solo contribuye de manera positiva y beneficiosa a la durabilidad y resistencia del pavimento, sino que también aporta significativamente y de forma notable a un mayor confort térmico para los usuarios y peatones, al disminuir de manera considerable y significativa el estrés térmico en áreas urbanas. El análisis del índice universal de clima térmico (UTCI) llevado a cabo en el marco de esta investigación científica ha puesto de manifiesto de manera contundente y clara que las áreas urbanas pavimentadas con concreto presentan significativas mejoras en las condiciones de confort térmico en contraste con aquellas pavimentadas con asfalto, lo cual refuerza de manera inequívoca y sin lugar a dudas la recomendación de optar por la instalación de pavimentos de concreto en regiones caracterizadas por climas cálidos y soleados.

Otro aspecto de suma importancia que ha sido abordado en el estudio realizado es el impacto significativo que puede tener la humedad atmosférica y la cantidad de precipitación pluvial en el rendimiento operativo y la durabilidad estructural de los pavimentos flexibles. La investigación científica realizada recientemente ha confirmado que la presencia constante de agua y niveles extremadamente elevados de humedad tienen un impacto significativo en el proceso acelerado de deterioro del pavimento, generando efectos negativos de manera particular en las capas más profundas de la subrasante y en los materiales granulares que conforman la estructura de la vía. Estos

hallazgos resaltan la importancia de implementar medidas preventivas para mitigar los daños causados por estas condiciones ambientales desfavorables. Este fenómeno climático es particularmente relevante en áreas geográficas con altos índices de precipitaciones, como, por ejemplo, la región oriental de Guatemala y zonas tropicales como en Malasia. Las mezclas asfálticas convencionales, elaboradas siguiendo el procedimiento establecido por el método Marshall, han evidenciado una notable susceptibilidad a la presencia de humedad, presentando índices de resistencia a la humedad (TSR) tan bajos como un 82.2 %. Por otro lado, es importante destacar que las mezclas asfálticas de última generación, como por ejemplo Superpave y Stone Mastic Asphalt (SMA), han demostrado una resistencia a la humedad, lo que les ha permitido alcanzar niveles de TSR superiores al 94 %.

El fenómeno del ahuellamiento prematuro en los pavimentos flexibles es ampliamente reconocido como uno de los desafíos más significativos en zonas urbanas con una alta concentración de vehículos en circulación. La minuciosa investigación realizada reveló que, en situaciones de altas temperaturas sostenidas y cargas repetitivas considerablemente significativas, las deformaciones en los pavimentos asfálticos convencionales pueden llegar a alcanzar profundidades de hasta 38 milímetros, lo cual representa una amenaza para la integridad y eficacia de las vías. No obstante, es fundamental resaltar que los pavimentos construidos con mezclas asfálticas SMA han evidenciado una destacada capacidad para reducir de forma significativa la manifestación de marcas de desgaste, lo cual ha posibilitado mantener las deformaciones por debajo de los 3 milímetros de manera efectiva. Este importante logro se atribuye principalmente a la notable fortaleza estructural que poseen este tipo de pavimentos, la cual se ve potenciada por la interacción directa y efectiva entre los diversos agregados que los conforman.

Finalmente, es importante resaltar la relevancia fundamental de llevar a cabo la implementación de un sistema de drenaje altamente eficiente y efectivo con el objetivo principal de prevenir y evitar la constante y continua acumulación de agua en las profundidades de las capas inferiores del pavimento, lo cual constituye una problemática persistente y de larga data en la región geográfica oriental de Guatemala. La acumulación excesiva de humedad en la subrasante, originada por la ausencia de un sistema de drenaje adecuado, contribuye de forma significativa al deterioro prematuro de los pavimentos y eleva considerablemente la probabilidad de ocurrencia de fallos estructurales que podrían poner en peligro la integridad de la infraestructura vial. La investigación concluye de manera categórica que la adecuada implementación de medidas de drenaje apropiadas, en conjunto con la utilización de tecnologías de última generación como el sistema Superpave, se convierte en un factor fundamental para potenciar la durabilidad de los pavimentos flexibles frente a condiciones climáticas extremas.

En resumen, los resultados de la investigación subrayan la importancia de realizar una selección de los materiales empleados en el proceso de pavimentación, teniendo en cuenta las múltiples y específicas condiciones climáticas que distinguen a cada área en particular. La implementación de pavimentos de concreto hidráulico en zonas geográficas caracterizadas por altas temperaturas y una exposición prolongada a la radiación solar, la incorporación estratégica de tecnologías innovadoras como Superpave y mezclas asfálticas modificadas con polímeros SMA, y el continuo perfeccionamiento de las infraestructuras de drenaje pluvial se presentan como medidas esenciales y prioritarias para fortalecer de manera significativa la durabilidad, la resistencia estructural y la eficiencia operativa de las carreteras flexibles que atraviesan el área oriental de Guatemala.

Lugar de estudio	Clima	Precipitación	Humedad	Temperatura Superficial	Resistencia a la Humedad	Posibles soluciones
Ciudad de México, México	Tropical cálido	Alta (~3000 mm/año)	Elevada (más del 75%)	Asfalto: hasta 60°C; Concreto: 45°C	Baja en asfalto, moderada en concreto	Uso de mezclas SMA y drenajes eficientes para reducir retención de calor y mejorar drenaje.
Selangor y Johor, Malasia	Tropical lluvioso	Alta (~2500 mm/año)	Media a alta	Asfalto: hasta 60°C	Baja en Marshall, mejor en SMA	Uso de mezclas Superpave y asfaltos modificados para mejorar resistencia a la humedad.
Pittsburgh, Pensilvania, EUA	Cálido y húmedo	Alta (frecuente)	Muy alta (impacto en subrasante)	Hasta 70°C en asfalto	Baja en asfalto, mejor en Superpave	Aplicación de asfaltos modificados con polímeros y mejora en el drenaje subterráneo.
Estados Unidos, en general	Clima templado	Moderada (~1000 mm/año)	Alta en verano	Asfalto: hasta 55°C; Concreto: 40°C	Alta en concreto, baja en asfalto	Uso de concreto en zonas de alta humedad estacional y asfaltos drenantes en otras áreas.
Izabal, Guatemala	Monzónico	Alta (1500-3000 mm/año)	Alta (83%)	Asfalto: hasta 70°C	Baja en asfalto, afectación en adherencia	Implementación de sistemas de drenaje eficientes y uso de asfaltos modificados con polímeros.

**Cuadro 1**  
*Resultados de casos de estudio*

## VIII. CONCLUSIONES

- La falta de adecuación de normativas extranjeras en el diseño y construcción de pavimentos flexibles en la región oriental de Guatemala ha generado una rápida degradación de las carreteras debido a que estas normativas no se ajustan completamente a las condiciones locales. La ausencia de regulaciones específicas que tomen en cuenta las condiciones climáticas extremas de la región resalta la imperiosa necesidad de elaborar directrices técnicas apropiadas.
- Las condiciones climáticas de la región oriental, marcadas por elevadas temperaturas y fuertes lluvias, ejercen una influencia en la resistencia a largo plazo de los pavimentos flexibles. La deformación y la aparición de fisuras en el pavimento se ven incrementadas por diversos factores, lo cual negativamente la calidad y el desempeño de las carreteras.
- La carencia de una infraestructura de drenaje adecuada es uno de los problemas principales en la región, lo cual empeora las deficiencias estructurales en el pavimento. La acumulación de agua en las capas inferiores disminuye la capacidad de carga del pavimento, lo que provoca una aceleración en su deterioro.
- En la región oriental, es predominante la ejecución de mantenimiento reactivo en los pavimentos, lo cual se traduce en intervenciones correctivas frecuentes motivadas por fallas visibles. Por ende, se destaca la necesidad de implementar el mantenimiento preventivo como una medida para mejorar la infraestructura vial en dicha región. Se puede concluir que la implementación de un sistema de mantenimiento preventivo apropiado podría generar una reducción considerable en los costos a largo plazo y contribuir a aumentar la durabilidad de las carreteras.

## IX. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la creación e implementación de normativas locales específicas en el ámbito de la planificación urbana, el diseño arquitectónico y el mantenimiento de infraestructuras. Estas normativas deben adaptarse a las condiciones climáticas desfavorables que caracterizan la región oriental de Guatemala. Las regulaciones pertinentes deben incluir criterios específicos para la aplicación de pavimentos flexibles en áreas con climas cálidos y altos índices de lluvia.
- Es importante realizar una inversión apropiada en la optimización y modernización del sistema de drenaje, tanto en su aspecto superficial como subterráneo a lo largo de las vías de comunicación. Esto se hace con el propósito de prevenir posibles daños causados por el agua en la subrasante y otros estratos que componen el pavimento. La durabilidad y resistencia de la infraestructura vial dependen en gran medida de un sistema de drenaje pluvial adecuado. Este sistema prolonga la vida útil de las carreteras y disminuir los gastos de mantenimiento a largo plazo.
- Es esencial promover iniciativas y estrategias que fomenten la educación continua y el desarrollo profesional de los ingenieros y técnicos encargados de la planificación, ejecución y mantenimiento de infraestructuras viales, como los pavimentos. La capacitación permanente debe ser establecida e impulsada con el objetivo de garantizar la calidad y eficiencia en dichas labores. Los programas de desarrollo urbano sostenible deben centrarse en la incorporación de tecnologías novedosas y en la utilización de enfoques constructivos que se adapten de forma eficiente a las características y necesidades particulares de cada área geográfica.
- Fomentar y promocionar la investigación y aplicación de materiales novedosos, especialmente aquellos con mayor capacidad de resistencia a condiciones climáticas adversas. Es necesario llevar a cabo investigaciones sobre nuevas combinaciones de materiales asfálticos que puedan ofrecer una resistencia mejorada a condiciones extremas de temperatura y altos niveles de precipitación. Asimismo, es importante explorar opciones más amigables con el medio ambiente que fomenten la sostenibilidad a largo plazo.

## X. BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (1993). *Guide Of Design Of Paviment Structures* (inf. téc.). American Association of State Highway y Transportations Officials.
- Aguilar González, M. Á., Gutiérrez San Vicente, L. F., & Cárdenas Rodríguez, Á. C. (2017). *Effect of different pavements on human thermal comfort conditions*. *Atmósfera*.
- Ahmad, J., Yusoff, N. I., Hainin, M. R., Rahman, M. Y. A., & Hossain, M. (2014). Investigación sobre daños inducidos por humedad en asfalto mezclado en caliente en condiciones climáticas tropicales. *Construction and Building Materials*.
- Asociación Española para la Calidad. (2019). Conocimiento AEC. *Asociación Española para la Calidad*.
- Banco de Guatemala. (2018). *Indice de Precios Materiales de Construcción República de Guatemala* (inf. téc.). Banco de Guatemala. <https://www.banguat.gob.gt/es/page/indice-de-precios-materiales-de-construccion-republica-de-guatemala>
- Barrera, J. (2014). *FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES: CAUSAS, EFECTOS Y SOLUCIONES* [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala].
- Campos, J., González, J., Díaz, S., & Galán, A. (2017). Metodología para la evaluación del riesgo y la priorización de inversiones en el mantenimiento de obras de drenaje transversal. *bUniversidad de Castilla-La Mancha*.
- Cetino, R. (2023). Clasificación de las rutas y carreteras en Guatemala. [https://aprende.guatemala.com/historia/geografia/clasificacion-de-las-rutas-y-carreteras-en-guatemala/#:~:text=Rutas%20Departamentales%20\(RD\),rutas%20centroamericanas%20o%20rutas%20nacionales.](https://aprende.guatemala.com/historia/geografia/clasificacion-de-las-rutas-y-carreteras-en-guatemala/#:~:text=Rutas%20Departamentales%20(RD),rutas%20centroamericanas%20o%20rutas%20nacionales.)
- Chimborazo, K. (2022). *EFECTOS DE LA CAPACITACIÓN EN EL PERSONAL DE LA CONSTRUCCIÓN: CASO ECOSUR ECUADOR* (inf. téc.). UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO.
- Construneic. (2023). Fallas de los pavimentos flexibles. <https://construneic.com/pavimentos/fallas-de-los-pavimentos-flexibles/>.
- De La Cruz, J. (2019). Los Asfaltos y El Clima. *Scribd*.
- Dirección General de Caminos. (2017). *Red Vial de Guatemala* (inf. téc.). Dirección General de Caminos.
- Dirección General de Caminos. (2019). *Red vial de Guatemala* (inf. téc.). Dirección general de caminos.
- Ferrovial. (2021). Asfalto. <https://www.ferrovial.com/es/recursos/asfalto/>.
- Flores, D. (2013). *Definiciones relacionadas con el Capítulo de Vialidad*. (inf. téc.). SCIJ.
- García-Montenegro, M. B. (1992). *INTERPRETACION SOBRE EL USO CORRECTO DE PAVIMENTOS ASFALTICOS MEZCLADOS EN CALIENTE* [Tesis de maestría, UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA].
- Gobierno de México. (2019). Normativa para la Infraestructura del Transporte. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.
- Gonzales, A., Silene; Ordoñez. (2001). *MANUAL DE LABORATORIO ENSAYOS PARA PAVIMENTOS VOLUMEN I* [Tesis de maestría, UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA DEL PERU].

- Guerrero, N. H. (2016). LA DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y EL CONSECUENTE DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN EL PERÚ. *Revistas UPR*.
- IBM. (2022). ¿Qué es el mantenimiento preventivo? <https://www.ibm.com/es-es/topics/what-is-preventive-maintenance>.
- INSIVUMEH. (2022). *Estado del Clima en Guatemala* (inf. téc.). INSIVUMEH.
- Jiménez Acuña, M., & Obando, D. S. (2009). Mezclas asfálticas en frío en Costa Rica, conceptos, ensayos y especificaciones.
- Kandhal, P. S., Mallick, R. B., & Brown, E. R. (1998). *HOT MIX ASPHALT FOR INTERSECTIONS IN HOT CLIMATE* (inf. téc.). National Center for Asphalt Technology.
- MCAD, M. (2023). Fallas de los pavimentos flexibles. *La capacitación del personal en la industria de la construcción: estrategias efectivas y beneficios para el éxito*.
- Ministerio de comunicaciones, i. y. v. (2012). Red vial de Guatemala. <https://caminos.gob.gt/files/Mapa-Guatemala2014.pdf>.
- MOPC. (2016). *IDENTIFICACIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS Y TÉCNICAS DE REPARACIÓN* (inf. téc.). MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y COMUNICACIONES.
- Mora, V. (2024). *Tipos de vías*. Inmuebles24.
- Pacua, G. (2013). *Desintegraciones por Desprendimiento/Descubrimiento de agregados* [Tesis de maestría, UNIERSIDAD RICARDO PALMA].
- Padilla, A. (2020). Mezcla asfáltica. UPC.
- Pérez, J. A. (2021). Mantenimiento de los elementos de desagüe y de drenaje en carreteras. <https://blog.structuralia.com/mantenimiento-de-los-elementos-de-desague-y-de-drenaje-en-carreteras>.
- PetroPeru. (2020). Asfaltos. <https://asfaltos.petroperu.com.pe/descripcion-tipos.php>.
- Qiao, Y., Flintsch, G. W., Dawson, A. R., & Parry, T. (2013). Examining Effects of Climatic Factors on Flexible Pavement Performance and Service Life. , Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Quimsaitw. (2021). Cómo reparar grietas en asfalto. <https://www.quimsaitw.com/como-reparar-grietas-en-asfalto/>.
- Rodríguez, R. A. A. (2005). *MODIFICACIÓN DE UN ASFALTO CON CAUCHO RECICLADO DE LLANTA PARA SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS* [Tesis de maestría, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER].
- Sailema, E. (2019). *MEDIDAS DE CONTROL DE RIESGOS MECÁNICOS PARA UNA EMPRESA PRODUCTORA DE ASFALTO* [Tesis de maestría, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA].
- Sosa, J. (2012). *ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL ASFALTO PRODUCIDO EN LA REFINE-RÍA ESTATAL DE ESMERALDAS* [Tesis de maestría, UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR].
- Tecsa. (2018). ¿QUÉ ES EL MANTENIMIENTO CORRECTIVO? <https://www.tecsagro.com.mx/blog/mantenimiento-correctivo/>.
- WISE. (2022). ¿CÓMO SE CLASIFICAN LOS AGREGADOS PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA? <https://blog.wise.com.mx/como-se-clasifican-los-agregados-para-la-mezcla-asfaltica>.

## XI. APÉNDICES

### A. CA-9 Norte - Los Amates, Izabal



*Figura 32.* Ahullamiento longitudinal (huella de rodadura) km.200



*Figura 33.* Grieta longitudinal km.201



*Figura 34. Pérdida de agregado km.205 (área de curva)*



*Figura 35. Pérdida de agregado km.205*



*Figura 36.* Baches km.215



*Figura 37.* Bache km.218

**B. CA-13 - Morales/Livingston, Izabal**



*Figura 38. Bache y huella de rodadura km.247*



*Figura 39. Piel de cocodrilo km.250*



*Figura 40.* Bache km.250



*Figura 41.* Grietas longitudinales km.251



*Figura 42.* Ahullamiento transversal km.254



*Figura 43.* Bache km.258



*Figura 44.* Grietas longitudinales km.260



*Figura 45.* Bache km.271



*Figura 46.* Huella de rodadura en puente río Dulce



*Figura 47.* Bache en el mercado de río Dulce

**C. CA-9 Norte - Puerto Barrios, Izabal**



*Figura 48.* Bacheo km.283