



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría

DESARROLLO DE UNA GUÍA PARA ESTRUCTURAR PAVIMENTOS FLEXIBLES, CON BASE
EN LA REVISIÓN DE SECCIONES EXISTENTE EN LA REPÚBLICA MEXICANA

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres

Presenta:

Moisés Alejandro Rico Ruiz

Dirigido por:

Dr. J. Jesús Alonso Mota

SINODALES

Dr. J. Jesús Alonso Mota
Presidente

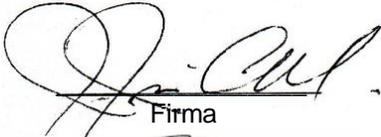
Dr. Mauricio Centeno Ortiz
Secretario

Dr. Omar Chávez Alegría
Vocal

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Suplente

M.C. César Augusto Granada Isaza
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Inigo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Septiembre 2013
México

RESUMEN

Muchas de las estructuras de pavimento de nuestro país están próximas o ya han llegado al final de su vida útil. En algunos casos, producto de un diseño que no consideró adecuadamente todas las variables que determinan el desempeño del pavimento. Este trabajo tiene por objeto establecer un catálogo de secciones de pavimento asfáltico para la República Mexicana, mediante el método de diseño del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El primer paso, consistió en regionalizar la República Mexicana considerando tres parámetros que influyen en el comportamiento del pavimento, estos son: precipitación pluvial máxima, temperatura máxima y temperatura mínima. De estos datos se derivó un mapa de zonificación, elaborado mediante la herramienta ArcMap versión 9.3. El segundo paso fue la caracterización del tránsito vehicular. Ésta partió de los aforos de tránsito de los últimos cinco años, indicados en los Datos Viales que recaba y publica la SCT. Con estos datos y considerando su distribución y comportamiento, se calcularon los ejes equivalentes de cada tramo. Posteriormente, se determinaron las características mecánicas de los materiales utilizados en los pavimentos de nuestro país, para lo cual fue necesario hacer sondeos a 271 kilómetros distribuidos a lo largo de la Red Federal actual. La distribución de los sondeos se realizó tomando en cuenta el mapa de zonificación previamente generado. El número de sondeos realizados surgió de un análisis estadístico, en el cual se determinó el número mínimo de los mismos para que el muestreo fuera representativo. El material producto de los sondeos fue evaluado en laboratorio. Con los resultados fue posible determinar valores “típicos” para cada capa del pavimento, mismos que se usaron en el diseño de las secciones de pavimentos. Al conjuntar todas las variables se diseñaron estructuras de pavimento para cada región y tipo de tránsito de manera integral, es decir, considerando todas las variables que tienen influencia en el comportamiento de la estructura del pavimento. Como aportación adicional, se realizó un comparativo de diseño de algunos tramos carreteros mediante el método AASHTO 2002 y el programa DISPAV-5.

(Palabras clave: catálogo, guía, secciones, pavimento, asfalto, DISPAV-5)

SUMMARY

Many of the pavement structures in our country are next or already have reached the end of their useful life. In some cases, due to a design that did not consider adequately all the variables that determine performance of pavement. This work aims to establish a catalog of asphalt pavement sections for Mexico, through the design method of the Engineering Institute of UNAM. The first step was to regionalize Mexico considering three parameters that influence pavement performance, these are maximum rainfall, maximum temperature and minimum temperature. From these data we derived a map of regionalization, developed through ArcMap version 9.3 tool. The second step was the characterization of traffic. Which came from the gauging traffic of the last five years of road data obtained and published by SCT. With these data and considering its distribution and behavior, equivalent axes were calculated for each road segment. Then, we determined the mechanical characteristics of the materials used in the pavement of our country, for which it was necessary to dig out 271 kilometers distributed along the current Federal System. This amount of kilometers was determined by a statistical analysis, which considered this amount as representative. The distribution of the dig outs were performed taking into account the previously generated map of regionalization. The number of dig outs emerged from a statistical analysis, in which we determined the minimum number of them so that the sample was representative. The material, product of the dig out was evaluated in laboratory. With the results it was possible to determine "typical" values for each layer of pavement, which were used in the design of sections. By combining all variants it was possible to design holistically pavement structures for each region and type of traffic, that is, considering all the variables that influence the behavior of the pavement structure. As an additional contribution, it was performed a comparative designs from some road segment by the AASHTO 2002 method and the DISPAV-5 program.

(Key words: catalog, guide, sections, pavement, asphalt, DISPAV-5)

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres, hermanos y sobretodo a mi novia, amiga y futura esposa por su apoyo incondicional y constante impulso para terminar este paso tan importante en mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

El autor de esta tesis desea mostrar su agradecimiento al Dr. Mauricio Centeno Ortiz, por todo el apoyo y por las facilidades brindadas para la realización de las pruebas de laboratorio, así como por el arduo trabajo que consistió en revisar a detalle lo escrito en esta tesis.

También se desea expresar el agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo de beca otorgada para realizar la Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres. Además de agradecer al posgrado de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por la oportunidad de estudiar este nivel de estudios.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
INDICE	v
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE FIGURAS	xiv
INDICE DE ECUACIONES	xvi
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xvii
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. Conceptualización del problema	1
I.2. Antecedentes	3
I.3. Justificación	4
I.4. Objetivos e Hipótesis	4
I.4.1. Objetivo General	4
I.4.2. Objetivos Específicos	5
I.4.3. Hipótesis	5
II. ESTADO DEL ARTE	6
II.1. Situación actual de las carreteras en México	6
II.1.1. Evolución de los pavimentos flexibles en México	8
II.1.2. Definición, función y características de un pavimento flexible	9
II.2. Estructura de los pavimentos flexibles, funciones y características	11
II.2.1. La carpeta	12
II.2.2. La base	13

II.2.3. La sub-base	14
II.2.4. La subrasante	15
II.2.5. La subyacente	15
II.2.6. El cuerpo del terraplén	16
II.3. Factores a considerar en el diseño de estructuras de pavimentos flexibles	16
II.3.1. Cargas inducidas y generadas por el tránsito	17
II.3.2. Características del suelo que sustenta los pavimentos	18
II.3.3. Condiciones climatológicas (precipitación y temperatura)	18
II.4. Métodos de diseño	19
II.4.1. Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM	23
II.4.1.1. Programa DISPAV-5	28
II.4.2. Método de diseño del Instituto del Asfalto de los E.U.A.	35
II.4.3. Método de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 1993	40
II.4.4. Método de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 2002	47
II.5. Catálogos de secciones	50
II.5.1. Catálogo de Inglaterra	51
II.5.2. Catálogo de España	52
II.5.3. Catálogo de Francia	55
II.6. Métodos Geoestadísticos	56
II.6.1. Kriging	57
II.6.2. Kriging Ordinario	58
II.6.3. Inverso de Distancia Ponderado (IDW)	58
III. EXPERIMENTACIÓN	60

III.1. Proceso de información	61
III.1.1. Adquisición de variables	61
III.1.1.1. Terreno Natural	62
III.1.1.2. Variables climáticas	63
III.1.1.2.1. Temperatura	64
III.1.1.2.2. Precipitación pluvial	66
III.1.1.3. Tránsito	67
III.1.1.3.1. Clasificación Vehicular	67
III.1.1.3.2. Proyección del tránsito a futuro	68
III.1.1.3.3. Proyección a futuro, método de regresiones	69
III.1.1.3.4. Factor de crecimiento	70
III.1.1.3.5. Distribución del tránsito por carriles de circulación	70
III.1.1.3.6. Tránsito Equivalente en el Carril de Proyecto	71
III.1.2. Integración de variables	72
III.2. Extracción de muestras en campo	73
III.2.1. Análisis probabilístico del plan de muestreo	73
III.2.2. Obtención de muestreos	78
III.3. Ensayo de materiales en laboratorio	80
III.3.1. Pruebas a carpeta asfáltica	80
III.3.2. Pruebas a materiales granulares	84
III.4. Diseño de estructuras de pavimento con programa DISPAV-5	87
III.5. Análisis comparativo de secciones con AASHTO 2002	88
III.5.1. Comparativo de estructuras de pavimento	89
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	95
IV.1. Proceso de información	95
IV.1.1. Adquisición de variables	95

IV.1.1.1. Terreno Natural	95
IV.1.1.2. Variables climáticas	95
IV.1.1.2.1. Temperatura	96
IV.1.1.2.2. Precipitación	99
IV.1.2. Integración de variables	100
IV.2. Extracción de muestras en campo	103
IV.2.1. Análisis probabilístico del plan de muestreo	103
IV.3. Ensayo de materiales en laboratorio	103
IV.3.1. Pruebas a carpeta asfáltica	103
IV.3.2. Pruebas a materiales granulares	105
IV.4. Diseño de estructuras de pavimento con programa DISPAV-5	105
IV.4.1.1. Diseños para carreteras normales	107
IV.4.1.2. Diseños para carreteras de altas especificaciones	110
IV.4.1.3. Discusión del catálogo de secciones	116
IV.4.5. Análisis comparativo de secciones con AASHTO 2002	116
IV.4.5.1. Comparativo de estructuras de pavimento	118
V. CONCLUSIONES	128
LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	134
BIBLIOGRAFÍA	135
ANEXOS	141
ANEXO A. VALORES DE PESOS Y DIMENSIONES APROBADOS POR LA SCT EN EL AÑO 2008.	142
ANEXO B. COEFICIENTES DE DAÑO A DIFERENTES TIPOS DE VEHICULOS.	148
ANEXO C. TRAMOS CARRETEROS PRINCIPALES Y SECUNDARIOS DE ACUERDO A LA DGST DE CADA ENTIDAD FEDERATIVA.	159

ANEXO D. TRAMOS CARRETEROS MUESTREADOS.	168
ANEXO E. KILOMETROS MUESTREADOS POR CADA TRAMO CARRETERO.	173
ANEXO F. MODULO RESILIENTE DE CADA TRAMO CARRETERO.	178

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	Página
II.1. Clasificación de los métodos de diseño para pavimentos flexibles	21
II.2. Valor relativo de soporte crítico estimado para pavimentos, para subrasantes compactadas 95% del volumétrico seco máximo Proctor.	25
II.3. Ejemplo formato de registro de datos de composición vehicular con porcentajes de cargados y vacíos.	26
II.4. VRS máximo para todos los niveles de tránsito, (VRS_p).	30
II.5. Factores de corrección para obtener el número de tránsito de diseño.	36
II.6. Porcentaje de camiones en el carril de diseño.	37
II.7. Factores de equivalencia de carga.	38
II.8. Valor percentil para diseño de subrasante, de acuerdo al nivel del tránsito.	39
II.9. Valores para diferentes pruebas, con materiales de bases y sub-bases.	39
II.10. Factor de distribución por carril.	41
II.11. Períodos de diseño en función del tipo de carretera.	43
II.12. Valores de confiabilidad "R".	43
II.13. Capacidad del drenaje para remover la humedad.	46
II.14. Valores (m_i) recomendados para modificar los coeficientes estructurales de capa de bases y sub-bases sin tratamiento, en pavimentos flexibles.	46
II.15. Espesores mínimos, en pulgadas, en función de los ejes equivalentes.	47
III.1. Clasificación vehicular del tránsito.	68

III.2. Distribución del tránsito en el carril de proyecto.	71
III.3. Tramos principales y secundarios de acuerdo a la DGST de cada entidad federativa.	73
III.4. Probabilidad de éxito (p) y de fracaso (q).	75
III.5. Tramos carreteros muestreados.	77
III.6. Ejemplo de Obtención de M_R en concreto asfáltico.	83
III.7. Datos de cada tramo carretero considerados para el análisis de cada sección estructural.	90
III.8. ESAL's proyectados en los distintos tramos carreteros analizados.	91
III.9. Tramos carreteros analizados.	93
III.10. Datos usados en la carpeta asfáltica.	94
IV.1. Resultados de técnica IDW y Kriging.	95
IV.2. Pesos asignados al rango de cada variable atmosférica	101
IV.3. Rangos resultantes de análisis multicriterio en variables atmosféricas	102
IV.4. Kilómetros a muestrear por tramo	103
IV.5. Módulo Resiliente de cada tramo carretero	104
IV.6. Módulos Resilientes en mezclas asfálticas	105
IV.7. Módulos Resilientes y CBR en Bases	105
IV.8. Módulos Resilientes y CBR en Subbase y Subrasante	106
IV.9. Características mecánicas consideradas en cada región	106
IV.10. Categorías de tránsito (millones de ejes equivalentes)	106
IV.11. Diseños de carreteras normales propuestos para las cinco regiones con tránsito 1	108
IV.12. Diseños de carreteras normales propuestos para las cinco regiones con tránsito 2	109

IV.13. Diseños de carreteras normales propuestos para las cinco regiones con tránsito 3	110
IV.14. Diseños de carreteras de altas especificaciones propuestos para las cinco regiones con tránsito 1	111
IV.15. Diseños de carreteras de altas especificaciones propuestos para las cinco regiones con tránsito 2	112
IV.16. Diseños de carreteras de altas especificaciones propuestos para las cinco regiones con tránsito 3	113
IV.17. Diseños de carreteras de altas especificaciones propuestos para las cinco regiones con tránsito 4	114
IV.18. Diseños de carreteras de altas especificaciones propuestos para las cinco regiones con tránsito 5	115
IV.19. Zonificación de los tramos carreteros seleccionados en función de los pesos asignados por cada variable atmosférica.	118
IV.20. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002 Tramo Haltunchen – San Antonio Cayal	119
IV.21. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002 Tramo Soto la Marina – La Coma	120
IV.22. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002 Tramo Moctezuma – Agua Prieta	120
IV.23. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002 Tramo Durango – Gómez Palacio	121
IV.24. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002 Tramo Mérida – Puerto Juárez	122
IV.25. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002 Tramo Tuxtla Gutiérrez – Cd. Cuauhtémoc	123

IV.26. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002 Tramo San Luis Potosí – Lagos de Moreno	123
IV.27. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002 Tramo Santa Ana – Sonoyta	124
IV.28. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002 Tramo Quiroga – Tepalcatepec	125
IV.29. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002 Tramo Tepic – Mazatlán	125
IV.30. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002 Tramo Saltillo – Torreón	126
IV.31. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002 Tramo Puebla – Tlaxcala	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
II.1. Esquema de la Red Nacional de Carreteras.	7
II.2. Gráfica de diseño para estructuras de pavimento flexible.	42
III.1. Esquemas de adquisición y procesamiento de datos	61
III.2. Campana de Gauss, siendo α el nivel de desconfianza	74
III.3. Distribución de tramos de carretera muestreados.	76
III.4. Números aleatorios para determinar las rutas a muestrear.	76
III.5. Tabla de números aleatoria compuesta.	78
III.6. Núcleo de carpeta asfáltica con un espesor de 5.5 cm	79
III.7. Medición de espesor de la base	79
III.8. Medición de espesor de la subbase	80
III.9. Preparación de pastillas de mezcla asfáltica previo al ensayo	81
III.10. Representación de las cargas aplicadas en la prueba de tensión indirecta	81
III.11. Prueba de tensión indirecta en pastillas de mezcla asfáltica	82
III.12. Carta de control de medias del tramo analizado.	83
III.13. Determinación del contenido de humedad de las muestras	84
III.14. Determinación del equivalente de arena de las muestras	85
III.15. Tamices para la obtención de composición granulométrica	85

III.16. Prueba para obtener el Valor de Soporte California (CBR)	86
III.17. Muestra de suelo en la cámara triaxial	87
IV.1. Mapa de temperatura máxima diaria por zonas	97
IV.2. Mapa de temperatura mínima diaria por zonas	98
IV.3. Mapa de precipitación máxima diaria por zonas	100
IV.4. Zonificación de temperatura y precipitación para el desempeño de pavimentos en el territorio nacional	101
IV.5. Carta de control de medias de M_R de todos los tramos carreteros	104
IV.6. Distribución de tramos carreteros analizados y criterios para análisis de tránsito.	117

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación	Página
II.1. Valor relativo de soporte	25
II.2. Coeficiente de acumulación del tránsito	27
II.3. Fórmula de Correlación entre Módulo y VRS_z	31
II.4. Relación de módulos admisibles	33
II.5. Tránsito acumulado en ejes equivalentes	40
II.6. Diferencia de índices de servicio inicial y final	44
II.7. Número estructural	45
II.8. Valor estimado de la variable a interpolar.	57
II.9. Coeficientes de ponderación.	58
II.10. Error esperado.	58
II.11. Valor a predecir para posición S_o .	59
III.1. Tamaño de la muestra	74
III.2. Probabilidad de éxitos y fracasos en la campana de Gauss.	75

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Σ L.- Tránsito equivalente acumulado

AASHTO.- American Association of State Highway and Transportation Officials

ArcMap.- Software usado para la realización del SIG.

ASTM.- American Society for Testing and Materials

BEA.- Base Estabilizada con Asfalto

BEC.- Base Estabilizada con Cemento

BH.- Base Hidráulica

BMC.- Base Modificada con Cemento

CA.- Carpeta Asfáltica

CBR.- California Bearing Ratio

CH.- Concreto Hidráulico

CONACYT.- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

CT.- Cuerpo de Terraplén

DISPAV-5.- Programa de diseño de pavimentos desarrollado por la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por el Ingeniero Santiago Corro

DGST.- Dirección General de Servicios Técnicos

ESAL.- Ejes Sencillos Equivalentes

ESWL.- Carga de neumático sencillo equivalente

f'c.- Resistencia a la compresión del concreto hidráulico

GITS.- Instituto de Geografía de la UNAM

GPS.- Sistema de Posicionamiento Global

IRI.- Índice de Regularidad Internacional

LVDT.- Linear Variable Differential Transformer

ME.- Mecánico – Empírico

MPa.- Megapascales

M_R.- Módulo de Resiliencia

NAF.- Nivel de Aguas Freáticas

PCA.- Pozo a Cielo Abierto

PEMEX.- Petróleos Mexicanos

SB.- Subbase
SCT.- Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SIG.- Sistema de Información Geográfica
SMN.- Servicio Meteorológico Nacional
SR.- Subrasante
SUCS.- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
SY.- Subyacente
TN.- Terreno Natural
TPDA.- Tránsito Promedio Diario Anual
UNAM.- Universidad Nacional Autónoma de México
VRS.- Valor Relativo de Soporte

I.INTRODUCCIÓN

I.1. Conceptualización del problema

La infraestructura vial incide en gran medida en la economía de nuestro país por la riqueza que se genera a través de ella.

Tal y como lo menciona Escalante (2006), el sistema carretero, es decir, la infraestructura carretera, constituye uno de los principales motores para el crecimiento, el desarrollo sano y sostenido de un país.

Para el buen funcionamiento de dicha infraestructura, se requiere de un adecuado diseño, que considere todas las variables y una adecuada conservación durante su vida útil.

Dentro del contexto del diseño de pavimentos, se considera que para el dimensionamiento de estas estructuras, se deben determinar las características de los materiales de las distintas capas del pavimento y, con base en ellas, se calculen los espesores. Buscando que el pavimento mantenga un "índice" de servicio aceptable, durante la vida útil estimada.

Para Olivera (2004), el diseño y dimensionamiento de las estructuras de pavimento es función de las características climatológicas y geológicas típicas de cada región, así como de la cantidad y tipo de vehículos que circulen sobre las estructuras de pavimento.

El no considerar adecuadamente las variantes anteriores influye notablemente en el deterioro que puede llegar a presentar una estructura de pavimento, el cual se acelerará bajo condiciones climáticas severas, alto volumen

de tráfico y cargas excesivas en los vehículos pesados; además el óptimo desempeño es función de las características mecánicas de los materiales con los que se construye dicha estructura.

El deterioro acelerado de los pavimentos puede contrarrestarse de dos maneras.

La primera, mediante un diseño y construcción apropiados, que consideren adecuadamente las condiciones más desfavorables de cada lugar, para de esta manera, brindar un óptimo nivel de servicio a los usuarios.

La segunda, se logra mediante una atención oportuna, con tratamientos que le devuelvan al pavimento su calidad y extiendan su vida útil. Esto se logra monitoreando periódicamente el pavimento, para observar la evolución del estado físico, y de esta manera obtener a cada momento el nivel de servicio con que operan los tramos carreteros.

Dicho nivel de servicio, como bien lo comenta Crespo (2010), se alcanza cuando los pavimentos son construidos con una superficie cómoda, segura y económica.

Centrándose en el tema de la estructura de un pavimento, la principal problemática que se observa, es el hecho de que los pavimentos trabajan mecánicamente para soportar las cargas del tránsito de los vehículos que circulan por él, para el período de proyecto establecido, típicamente va de 10 a 20 años, lo anterior de acuerdo a lo que menciona Zárate (2003). Esta resistencia a la acción mecánica de los vehículos la proporcionan las características mecánicas y la disposición de los materiales que integran cada una de las capas que forman un pavimento.

En la República Mexicana existen diferentes materiales y por lo tanto diferente comportamiento mecánico. En función de las características climáticas de la zona del proyecto, los materiales cambian su comportamiento mecánico. Por ello, se considera necesario establecer diferentes secciones de pavimentos, de acuerdo a las características de los materiales disponibles en la zona, los niveles de tránsito y las diferentes condiciones climáticas existentes en el país.

1.2. Antecedentes

Los cambios debidos al calentamiento global han afectado el comportamiento climático en la República Mexicana en el pasado reciente. Las temperaturas cada vez más extremas y el mes más lluvioso registrado en la historia del país (Septiembre 2013) son muestra de la evolución climática. Aunado a lo anterior, los vehículos han sido diseñados para resistir y transportar una mayor carga en grandes distancias con menores tiempos de recorrido. Estas variantes afectan directamente a la durabilidad y al comportamiento esperado en las estructuras de pavimento.

En México, no se encuentran aún tipificadas las secciones de pavimentos que son requeridas en función de los diferentes factores que afectan su comportamiento mecánico. Esta tipificación puede contribuir al buen comportamiento y la durabilidad de los pavimentos.

Por lo anterior, es conveniente establecer una guía de espesores mínimos para la estructuración de los pavimentos. De esta manera, se espera contar con pavimentos de una elevada calidad por un período más largo que el que se logra actualmente.

I.3. Justificación

Se propone un catálogo de secciones nuevas de pavimento asfáltico para la República Mexicana, englobando las variantes mencionadas, con el que se pretende obtener como resultado estructuras de pavimento mínimas para cada zona del país, partiendo del método de diseño del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Este catálogo de secciones de pavimento, servirá de guía para la construcción o rehabilitación de pavimentos flexibles, con los distintos materiales disponibles en las diferentes regiones del país.

El procedimiento parte de unificar los criterios básicos que se deben considerar en el proyecto de secciones de pavimentos, para evitar la falla estructural prematura de los mismos.

Para ello, se presenta una metodología de proyecto que pretende facilitar y simplificar la labor del ingeniero proyectista, acompañada de un catálogo de secciones nuevas contrastadas por la experiencia y revisadas mediante métodos analíticos aplicados de acuerdo con la práctica actual.

I.4. Objetivos e Hipótesis

I.4.1. Objetivo General

Desarrollar una guía de espesores de estructuras de pavimentos flexibles atendiendo a las condiciones geológicas y climáticas actuales con la finalidad de auxiliar al ingeniero en la toma de decisiones.

I.4.2. Objetivos Específicos

1. Identificar las variables más significativas que determinan el buen comportamiento de una estructura de pavimento.

2. Establecer regiones a lo largo del país, en donde se aprecie la interacción de dichas variables y se identifiquen las zonas más y menos vulnerables.

3. Crear una base de datos de las características mecánicas actuales de la Red Federal de Carreteras del país.

4. Evaluar el desempeño de las carreteras nacionales, hacer un comparativo y observar si cumplen o no con las exigencias actuales.

I.4.3. Hipótesis

La capacidad de respuesta de las estructuras de pavimento, debida a sus características mecánicas y condiciones climáticas, no es apta para resistir las cargas ejercidas por el tránsito.

II. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo, parte del análisis de la situación actual de los caminos en México, observando diferentes datos de la Red Federal, que sirven para dimensionar el ámbito donde se enmarca este trabajo de investigación, además de consideraciones esenciales para el desempeño óptimo de los pavimentos. Posteriormente, se describen las capas que componen un pavimento flexible, así como una discusión de las características mínimas que deben cumplir de acuerdo a la normativa vigente. Enseguida, se mencionan los factores a considerar en el diseño de estructuras de pavimento flexible. Finalmente, se hace una breve descripción de los métodos de diseño de pavimentos actualmente usados, incluidos los catálogos de secciones de estructuras de pavimentos de algunos países.

En el país se aprecian tramos carreteros desgastados y/o fallados, esto en gran medida por la evolución extrema de las condiciones climáticas y las cargas de tránsito. Esta evolución de daños no ha sido congruente con las soluciones propuestas en la normativa vigente, además de la falta de control de pesos y un inadecuado diseño que no cubre estas inconsistencias.

II.1. Situación actual de las carreteras en México

México es un país que cuenta con una amplia variedad de climas, debido a que está dividido por el trópico de Cáncer, se ubica entre dos zonas térmicas por lo que se pueden encontrar zonas con temperaturas extremas desde desierto hasta zonas muy húmedas. Cuenta con grandes extensiones de bosques, desiertos y selvas; además de enormes terrenos montañosos y planicies. Es por ello que hace algunas décadas era difícil imaginar que en este país se construirían

grandes caminos que cruzarían entre y a través de montañas, lograrían saltar ríos y más aun, podrían atravesar grandes extensiones desérticas; y por ello parecía que México estaba condenado a la incomunicación y al aislamiento interno.

Hoy en día la infraestructura carretera nacional está constituida por aproximadamente 373,936 kilómetros. De acuerdo al Opúsculo del Sector Carretero (2011), se encuentran distribuidas como se muestra en la Figura II.1.

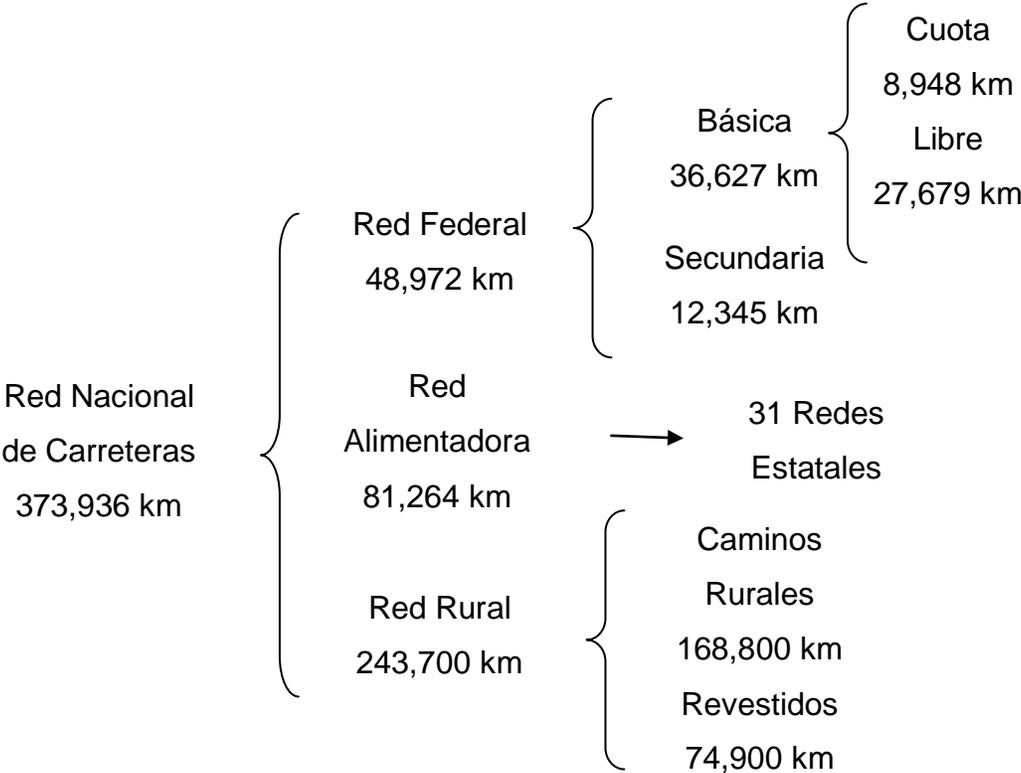


Figura II.1. Esquema de la Red Nacional de Carreteras.

Fuente: Opúsculo del Sector Carretero 2011.

En relación a la condición de las carreteras federales libres de peaje, de acuerdo al Atlas de la Red Carretera de México (2011), hasta el año 2009, el 48% estaba en buen estado, el 44% en estado aceptable y el resto contaba con un estado deficiente.

Es de mencionarse que la infraestructura carretera del país es algo antigua y que aproximadamente solo el 20% tiene menos de 15 años de funcionamiento y más del 57% cuenta con más de 40 años de vida.

Lo anterior es relevante si tomamos en cuenta que el diseño para las carreteras que cuentan con más de 40 años de existencia, difiere mucho del criterio de diseño actual, ya que las cargas de diseño de hace más de 40 años no corresponden a las de las necesidades actuales. El incremento de las cargas máximas ha evolucionado de 34 toneladas (en 1960) a 66.5 toneladas (en 1997), además de que a partir de 1980 se permitió un incremento de 8 a 10 toneladas por eje. Esto se traduce directamente en la profundidad de influencia de las presiones, y es apreciable en el espesor de la estructura de los caminos. Antes dichas estructuras tenían aproximadamente 40 cm. de espesor, en la actualidad la estructura se aproxima a 120 cm. de espesor.

Sobre la red carretera nacional, cada año se mueven aproximadamente 3,170 millones de personas lo que equivale aproximadamente al 98% del total nacional, además se mueven 479 millones de toneladas de carga, equivalente al 53% del total, lo que se traduce en la importancia de mantener una infraestructura carretera en óptimas condiciones.

II.1.1. Evolución de los pavimentos flexibles en México

El pavimento que ha sido utilizado tradicionalmente es el asfáltico, de manera que en la actualidad, y de acuerdo al Atlas de la Red Carretera de México (2011), hasta el año 2008, aproximadamente el 97% de los 136,780 kilómetros pavimentados con los que cuenta la red carretera mexicana son de este tipo.

A partir de 1925, los primeros pavimentos asfálticos fueron hechos con carpetas de mezcla asfáltica elaborada en el lugar o por sistemas de riegos que fueron los más populares, hasta que a partir de los 60's apareció el concreto asfáltico hecho en planta, elaborado en caliente. Con este producto se buscaba tener mejor control en su producción, mayor calidad y resistencia.

Entre los desarrollos que se han tenido en este campo, para adaptarse a la situación actual, está el uso de capas asfálticas más gruesas, ya que hasta los 70's, el espesor máximo era del orden de 80 mm, mientras que en la actualidad el orden es de los 150 mm o más.

Algo importante en nuestros días, es la adaptación de la tecnología a los cementos asfálticos producidos por PEMEX, ya que como bien lo comenta Ramos (1991), ello permite tener una zonificación de la República Mexicana, para utilizar el cemento asfáltico más apropiado de acuerdo a la zona en que haya de construirse un pavimento. Es importante también, continuar con la investigación en el área de ensayos de laboratorio, con el objeto de actualizar a los mismos, además de preparar continuamente al personal de esta especialidad, con objeto de mejorar la tecnología en este campo de las carreteras.

II.1.2. Definición, función y características de un pavimento flexible

El pavimento es un sistema integrado por un conjunto de capas colocadas una sobre otra. Su comportamiento depende de las propiedades mecánicas, espesores y acomodo de cada una de las capas. Este conjunto de capas, se apoyan en una de nombre "Subrasante", que está constituida en ocasiones por el terreno natural (cuando este es de buena calidad), o bien, por un material seleccionado. Esta capa subrasante, debe soportar las cargas producidas por el tránsito, dentro de un período de tiempo determinado (período de proyecto), sin

sufrir deterioros o deformaciones que afecten la integridad del pavimento. Esta capa es considerada como la cimentación del pavimento.

El pavimento tiene una serie de funciones, las cuales se describen a continuación:

- Proporcionar una superficie de rodadura segura, cómoda y de características permanentes, bajo las cargas repetidas de tránsito a lo largo del período de diseño considerado.
- Resistir el tránsito previsto para el período de diseño y distribuir las presiones verticales producidas por las cargas de tránsito, de tal forma que solo llegue a una mínima porción de estas cargas, a la capa subrasante, para que ésta sea capaz de soportarlas.
- Constituir una estructura que sea capaz de resistir los factores climatológicos del lugar en el que es construido; en especial factores como el agua y la temperatura, ya que son estos los que producen efectos más adversos en el comportamiento de los materiales que constituyen el pavimento.

Los pavimentos también deben contar con una serie de características funcionales y estructurales; las funcionales corresponden a la superficie de rodadura y son las que más perciben los usuarios, y las estructurales que son más bien del interés de las personas encargadas de operar y conservar los pavimentos.

Respecto a las características funcionales podemos mencionar algunas:

1. La resistencia al derrapamiento, se obtiene a través de una adecuada textura en la superficie de rodadura, esta textura debe estar adaptada para las velocidades de circulación previstas en el diseño.

2. La regularidad transversal y longitudinal en la superficie de rodadura, ya que está afecta directamente la comodidad del usuario; en la medida de la severidad de las deformaciones presentes en el pavimento, se podrá o no alcanzar la velocidad considerada en el proyecto.

3. Las propiedades de reflexión luminosa, que son importantes para la conducción nocturna y para el diseño apropiado de las instalaciones de iluminación.

4. El desagüe superficial rápido, para evitar que el espesor de la película de agua que escurre sobre la superficie de rodadura sea grande y con esto evitar el efecto conocido como acuaplaneo.

Por su parte, las características estructurales, están relacionadas con las características mecánicas de los materiales utilizados para la construcción de las diferentes capas que conforman el pavimento; estas características mecánicas definen el espesor de cada capa; el análisis mecánico da una idea de los efectos producidos por las cargas de tránsito, en cuanto a estados de esfuerzo y deformaciones. De las características estructurales, depende en gran medida la vida útil del pavimento.

II.2. Estructura de los pavimentos flexibles, funciones y características

Para Olivera (2004), un pavimento es el conjunto de capas de materiales seleccionados que reciben en forma directa las cargas de tránsito y las transmiten a las capas inferiores, distribuyéndolas con uniformidad.

Un pavimento asfáltico está constituido por varias capas, el nombre de estas capas en orden descendente es:

- Carpeta
- Base
- Sub-base

La cimentación del pavimento está conformada por la subrasante; esta última capa se encuentra apoyada sobre otras dos en el orden siguiente:

- Subrasante
- Subyacente
- Cuerpo de terraplén

II.2.1. La carpeta

Es la parte que soporta directamente el tránsito vehicular y es la capa que se encarga de brindar las características funcionales al pavimento. Estructuralmente, absorbe los esfuerzos horizontales y transmite los verticales hacia las capas que yacen bajo de ella.

La carpeta se construye con mezclas asfálticas en frío o en caliente. La carpeta además puede contener algún agente modificador para mejorar alguna característica, de acuerdo a la temperatura o la intensidad pluvial de la zona en la que se construya.

De acuerdo a la norma N-CMT-4-04/08, los materiales pétreos a utilizar en las mezclas asfálticas para la construcción de carpetas, pueden ser naturales seleccionados o sujetos a tratamiento de disgregación, cribado, trituración o lavado.

Según el tipo de mezcla asfáltica que se emplee, los materiales pétreos se clasifican como se muestra a continuación:

Materiales pétreos para:

- a) Mezclas asfálticas de granulometría densa
- b) Mezclas asfálticas de granulometría semiabierta
- c) Mezclas asfálticas de granulometría abierta
- d) Mortero asfáltico
- e) Carpetas por el sistema de riegos

Cada uno de los materiales tiene un uso, el cual está indicado en la misma norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México (SCT); además para cada caso, la SCT también indica los requisitos de calidad con los que deben cumplir los materiales pétreos.

Los materiales asfálticos deben cumplir con una serie de características, que están indicadas en las normas de la SCT N-CMT-4-05-001/06 (para materiales asfálticos normales) y N-CMT-4-05-002/06 (para materiales asfálticos modificados).

II.2.2. La base

Es la capa que se construye bajo la carpeta y su función es básicamente la de resistir los esfuerzos verticales, además de transmitirlos en forma uniforme a la sub-base; debe además contar con la suficiente rigidez para no deformarse bajo la repetición constante del tránsito.

Está compuesta por materiales granulares como gravas, arenas y ocasionalmente una pequeña cantidad de limos, estos materiales se clasifican de acuerdo al tratamiento que hayan recibido en materiales cribados, parcialmente triturados, totalmente triturados y mezclados. Los requisitos de calidad con que debe cumplir los materiales que conformarán la base están contenidos en la norma N-CMT-4-02-002/11.

II.2.3. La sub-base

Esta capa se construye sobre la subrasante, y sirve de apoyo a la base. La subbase puede ser o no construida, dependiendo de la capacidad de soporte de la subrasante. Su función básica es la de proporcionar una cimentación uniforme, para la correcta colocación y compactación de la base; en la medida de lo posible, debe también tener una función drenante. La sub-base también cumple una función de transición entre la subrasante y la estructura de pavimento.

Está constituida por materiales granulares que se clasifican de acuerdo al tratamiento que recibieron en:

- Materiales naturales
- Materiales cribados
- Materiales parcialmente triturados
- Materiales totalmente triturados
- Materiales mezclados

La granulometría y características de calidad con la que deben de cumplir los materiales a emplearse en la construcción de sub-bases se encuentra en la norma N-CMT-4-02-001/11.

II.2.4. La subrasante

Es la capa que se construye bajo la sub-base, su función es la de recibir las cargas transmitidas por el pavimento y transmitir las en forma uniforme hacia la subyacente y el cuerpo de terraplén.

Si esta capa es de buena calidad, el espesor del pavimento será menor, con lo cual existirá un ahorro económico, sin perder calidad en el pavimento. Está conformada con suelos naturales, seleccionados o cribados, producto de cortes o de la extracción de bancos. Las características de calidad que deben cumplir los materiales que conformarán esta capa, de acuerdo a la norma de la SCT N-CMT-1-03/02. En esta norma también se aprecia el espesor mínimo de la capa de acuerdo al número de ejes equivalentes.

II.2.5. La subyacente

Esta capa se construye bajo la subrasante y puede o no ser requerida, esto dependerá del número de ejes equivalentes de tránsito esperados durante la vida útil del pavimento.

Los materiales que constituyen esta capa, son suelos y fragmentos de roca, producto de cortes o de la extracción de bancos.

La SCT recomienda en la norma N-CMT-1-02/02 espesores mínimos para la construcción de esta capa en función del número de ejes equivalentes, además de los requisitos de calidad con que deben cumplir los materiales que conformarán esta capa.

II.2.6. El cuerpo del terraplén

Su función es la de alcanzar el nivel de desplante para la construcción de la subyacente. Esta capa se construye con suelos y fragmentos de roca, producto de cortes o de la extracción de bancos, en ningún caso deben ocuparse materiales altamente orgánicos y/o producto de despalmes.

La calidad que deben cumplir los materiales a ser empleados, en la construcción de esta capa se establece en la norma de la SCT N-CMT-1-01/02.

II.3. Factores a considerar en el diseño de estructuras de pavimentos flexibles

Lavaud (2007), destaca que, aunque las carreteras se estiman para una vida útil, muchas veces el pavimento falla prematuramente, apareciendo agrietamientos, huecos y ahuellamientos, debido principalmente a los métodos constructivos.

Juárez y Rico (2007), comentan que los factores que afectan el diseño de los pavimentos son: a) Los materiales de terracería y capa subrasante; b) El clima (lluvia, heladas, variación de temperatura) y; c) El tránsito (magnitud de cargas, área de contacto, frecuencia y número de repeticiones).

En concordancia con las ideas anteriores, Arellano y Zárate (2007) mencionan que el correcto desempeño de un pavimento durante su vida de servicio, depende de varios factores. Para su proyecto, deben considerarse adecuadamente factores como el tránsito previsto, la calidad y resistencia de la capa subrasante y de los materiales que constituirán las diferentes capas, las medidas recomendadas para poner el pavimento a salvo de los efectos del agua

pluvial y subterránea y de los factores climáticos, así como la formulación de las especificaciones y planos de proyecto.

Con base en lo anterior es posible delimitar las variables con que se hace necesario actuar para solventar y/o mitigar la problemática expuesta. Las variables son:

II.3.1. Cargas inducidas y generadas por el tránsito

La estructura del pavimento debe adecuarse a la acción prevista del tráfico durante su vida útil. La sección estructural del pavimento dependerá, entre otros factores, del Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) que se prevea en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio.

Cuando una obra vial se pone en servicio, debe de presentar las condiciones óptimas para su operación; al transcurrir el tiempo, se deteriora por el uso, dificultándose así cada vez más el tránsito, por lo que es preciso hacer una conservación adecuada y rehabilitaciones oportunas, para que la infraestructura no llegue a tener una falla prematura.

Las fallas de pavimentos pueden ser estructurales o funcionales. La falla estructural implica una destrucción de la estructura del pavimento y, en general, se debe a que el tránsito que ha soportado la infraestructura es mayor al que se calculó para su vida útil. La falla funcional, es aquella que tienen los caminos cuando las características superficiales han rebasado los límites tolerables y provoca ciertas incomodidades de tránsito.

Los diferentes tipos de fallas que podemos encontrar en un pavimento flexible según Olivera (2004), son: roderas, superficie de rodadura lisa, pequeñas deformaciones transversales rítmicas, desintegración de la carpeta, grietas

longitudinales a la orilla de la carpeta, presencia de calaveras, baches, agrietamientos en forma de piel de cocodrilo o mapeo, corrimiento de la carpeta asfáltica, descarnado de la carpeta, deformaciones de la superficie de rodadura del orden de 5 cm, deformaciones fuertes de la superficie de pavimento, deformaciones de corona junto a las cunetas, etcétera.

II.3.2. Características del suelo que sustenta los pavimentos

De acuerdo a Jordán (2005), la naturaleza litológica del estrato original condiciona las propiedades químicas (acidez, riqueza en nutrientes, etc.) y físicas del suelo (permeabilidad, consistencia, textura, etc.).

Lo anterior es de importancia ya que al considerar a las características físicas y mecánicas del suelo para un diseño de pavimentos, es evidente que estas serán diferentes en cada lugar.

II.3.3. Condiciones climatológicas (precipitación y temperatura)

Otro factor importante para la estructuración correcta de una vía terrestre es el clima, ya que, es vital considerar las temperaturas y la precipitación de la zona.

El mismo Jordán (2005), observó que el clima influye directamente sobre el suelo mediante la humedad y la temperatura, y de manera indirecta mediante la vegetación y el relieve. El clima es el principal agente de alteración química del suelo, así como de la fragmentación mecánica de determinados tipos de estratos. El clima controla los procesos que tienen lugar en el suelo y su intensidad. La disponibilidad y el flujo de agua regulan la velocidad de desarrollo de la mayoría

de los procesos edáficos. Muchas propiedades de los suelos presentan determinadas tendencias relacionadas con las características del clima.

La precipitación que se pueda presentar en cierta zona es determinante dentro de cualquier proyecto, por lo que debe de tomarse en cuenta las obras de drenaje indispensables, a fin de que los gastos de conservación sean mínimos, sin dejar a un lado el costo de construcción.

Cuando se construye un camino, casi siempre se corta el escurrimiento natural, por lo que es necesario canalizar de forma adecuada el flujo, lo que origina las obras de captación y de conducción.

Ahora bien, si se analizan detenidamente las variantes expuestas, se puede observar que todas ellas están íntimamente ligadas, por lo que es necesario someterlas a una evaluación en conjunto.

II.4. Métodos de diseño

Según Rondón y Reyes (2007), un pavimento debe ser diseñado de tal manera que las cargas impuestas por el tránsito no generen deformaciones permanentes excesivas. En el caso de los pavimentos flexibles estas deformaciones se producen en cada una de las capas.

Serment (2011), observa que, los principales mecanismos de falla de los pavimentos flexibles son la fatiga y las deformaciones permanentes o acumuladas. El fenómeno de fatiga se presenta en las capas aglomeradas, debido a las deformaciones elásticas provocadas por los esfuerzos de tensión repetidos, que se presentan en la parte inferior de las capas asfálticas debidos a la acción del tránsito. La deformación permanente, se refiere a la deformación vertical que no alcanza a recuperarse de manera elástica al paso de los vehículos, la cual se

acumula hasta provocar fallas funcionales y/o estructurales. La deformación permanente de una estructura de pavimento, es la suma de las deformaciones que se generan en cada una de sus capas. Sin embargo, en vías donde se construyen capas asfálticas delgadas o de baja rigidez (de bajo tráfico), las capas granulares soportan el esfuerzo aplicado casi en su totalidad y la magnitud de dichos esfuerzos puede llegar a generar valores altos de deformación permanente.

Por lo tanto, las metodologías de diseño deben tener en cuenta las deformaciones que se producen en estas capas, y los modelos para predecir dichas deformaciones, deben ser capaces de reproducir el comportamiento de estos materiales bajo diversas trayectorias de carga cíclica y condiciones del medio ambiente.

Romo y Torres (1993), comenta que, los métodos de diseño mecanicistas, han sido impulsados por el gran desarrollo en la computación, el cual, ha permitido que muchas teorías de análisis puedan aplicarse a las condiciones prácticas. Esta aplicación se efectúa mediante el uso de nomogramas, ecuaciones de diseño o catálogos de estructuras. Además, gracias al amplio uso de la computadora, existe la tendencia a utilizarlas directamente en los nuevos métodos de diseño, con diversas modalidades, como análisis estructural empleando sistemas de capas múltiples o mediante elementos finitos. De esta manera se utilizan, cada vez con mayor frecuencia, los modelos de simulación para el diseño de pavimentos.

Los métodos de diseño para pavimentos flexibles se pueden clasificar de una manera general en cinco categorías, como lo indica Huang (1969) en la Tabla II.1.

Rico (1992) y Mendoza (1992) reconocen que el VRS parece un índice demasiado sujeto a condiciones circunstanciales como para considerarlo un buen índice del comportamiento mecánico de un suelo y, sin embargo, probablemente

más de la mitad de los pavimentos en el mundo se siguen diseñando con este método.

Los métodos basados en el equilibrio límite, consisten fundamentalmente en determinar el espesor de pavimento necesario para que no se presenten fallas, por sobrepasar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo; estos métodos se utilizan poco, ya que los pavimentos modernos deben diseñarse no sólo bajo un criterio de resistencia, sino con un criterio de deformación permanente.

Tabla II.1. Clasificación de los métodos de diseño para pavimentos flexibles

Método	Diseño en función de ...	Limitaciones
Empírico	Tipo de suelo (granulometría y plasticidad) y un índice de resistencia, ej., el VRS	Todas las desventajas de la correlación experimental.
Equilibrio límite	La resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.	Los pavimentos fallan primero por pérdida de funcionalidad
Deflexión límite	La deflexión permisible en la superficie del pavimento	Los pavimentos fallan por esfuerzos y deformaciones excesivos, y no necesariamente por deflexiones excesivas.
Regresión	Resultados obtenidos en tramos de prueba.	Sólo aplicable para las condiciones de prueba.
Mecanicistas	La mecánica de los materiales que conforman el pavimento.	Necesita una calibración en función del comportamiento real observado. Asume las hipótesis de las teorías de la elasticidad y visco-elasticidad.

En lo que respecta al uso de ecuaciones de regresión, obtenidas en tramos de prueba para el diseño de pavimentos; un buen ejemplo lo constituye el

Método AASHTO (1993). Este método se utiliza en varios países, incluyendo México, aun cuando tiene sus mayores dificultades de aplicación en países de clima cálido como el mexicano, diferente al clima de la zona donde se ubicaron los tramos de prueba que dieron origen a las ecuaciones.

Las tendencias actuales en lo que se refiere a métodos de diseño, indican una preferencia marcada por el desarrollo de métodos "racionales", basados en la mecánica de los materiales que conforman el pavimento. Estos métodos se han calificado como mecanicistas, en el sentido que relacionan los niveles de la sollicitación (cargas por eje) transmitida al sistema estructural que constituye el pavimento, con la respuesta obtenida en términos de esfuerzos y deformaciones.

La respuesta así obtenida permite predecir, en principio, los niveles de deterioro esperados a partir de ensayos de laboratorio y del comportamiento observado en campo.

La dependencia en el comportamiento observado del pavimento es necesaria, ya que la teoría sola ha demostrado no ser suficiente para la realización de diseños reales.

A pesar de existir una metodología diferente entre las mecanicistas y las empíricas, presentan connotaciones similares. Por ejemplo, el criterio de diseño en los métodos analíticos es el mismo: el pavimento falla por acumulación de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica debido a ciclos de carga (fatiga) y por exceso de deformación vertical en la superficie de la capa de subrasante (es decir, no tienen en cuenta el efecto que puede tener la acumulación de la deformación en las capas de base y sub-base granulares no tratadas).

II.4.1. Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM

Desde su origen, hace más de tres décadas, los proyectistas de carreteras en México cuentan con un método de diseño para pavimentos desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, a petición de la entonces Secretaría de Obras Públicas, luego SAHOP. Este método partió del análisis de datos experimentales en tramos de prueba, en carreteras en servicio, de investigación teórica y de experimentación en laboratorio en la pista circular de pruebas, que influyó más recientemente en sucesivos perfeccionamientos.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM, se basa en la tipificación de tránsito y en los coeficientes de daño de los diferentes tipos de vehículos, que pueden obtenerse a partir de las pruebas AASHTO, para obtener su propia tabla de tipificación y sus propios coeficientes de daño. Con base en experiencias realizadas en la pista circular de pruebas y en el estudio de comportamientos en tramos experimentales, que la propia institución controla en diversos puntos de la red mexicana de carreteras, el Instituto diversificó un tanto la evaluación de daños producidos por los diferentes vehículos en los pavimentos. El conjunto del trabajo de años del Instituto de ingeniería de la UNAM se encuentra en la publicación No. 444 de dicha institución que data de 1981.

En el instructivo de Corro, *et al.* (1981), se menciona que este método considera como datos de entrada básicos el tipo de carretera, el número de carriles, la vida de proyecto, el TPDA, tasa de crecimiento y variables adicionales sobre características del terreno y materiales, así como de climas, nivel freático y precipitación pluvial.

Como guía para el proyectista, se recomienda la estimación de un Valor Relativo de Soporte crítico (VRS) para las condiciones previamente dadas (Tabla II.2). En esta tabla se muestran valores estimados de uso exclusivo para

materiales de subrasante, dependiendo de algunos tipos de materiales, sus índices plásticos y diferentes profundidades del nivel freático.

El criterio de diseño desarrollado es general y puede adaptarse a diferentes indicadores de resistencia, como pruebas triaxiales o de placa, en condiciones estáticas o dinámicas. Por razones de aplicación práctica se utiliza el valor relativo de soporte crítico (VRSz) para estimar la resistencia de las bases, sub-bases y terracerías.

Se requieren adicionalmente pruebas de laboratorio confiables, para una mejor definición del comportamiento de las terracerías y demás capas a diseñar, debiendo realizarse para cada material propuesto y disponible, pruebas con tres diferentes energías de compactación; esto es, baja (AASHTO estándar) compactación intermedia y alta energía (AASHTO modificada).

Encontrando la humedad óptima, teniendo normado el porcentaje de compactación que se especifique en el proyecto y dependiendo del control de la construcción, se indicará un rango de variación de humedad respecto al óptimo. Paralelamente el laboratorio deberá reportar los valores de resistencia en VRS para cada tipo de material a utilizar.

Con el conjunto anterior, se encuentra una zona que refleja las condiciones esperadas para la subrasante, encontrando, en función de la humedad crítica esperada, el valor crítico de VRS de diseño.

En función del VRS crítico obtenido para la subrasante, por experiencia se asigna un valor menor para el cuerpo del terraplén, del orden del 60% obtenido para la subrasante.

Tabla II.2. Valor relativo de soporte crítico estimado para pavimentos, para subrasantes compactadas 95% del volumétrico seco máximo Proctor.

Profundidad del nivel freático con relación al nivel de la capa considerada, en m	VRS _Z , en porcentaje, mínimo probable					
	Arena no plástica	Arcilla arenosa IP = 10	Arcilla arenosa IP = 20	Arcilla limosa IP = 30	Arcilla activa IP ≥ 40	Limo
0.6	8-10	5-6	4-5	3-4	2-3	1 2-3
1.0	25	6-8	5-6	4-5	3-4	
1.5	25	8-10	6-8	5-6	3-4	
2.0	25	8-10	7-9	5-6	3-4	
2.5	25	8-10	8-10	6-8	4-5	
3.0	25	25	8-10	7-9	4-5	Se requieren pruebas de laboratorio
3.5	25	25	8-10	8-10	4-5	
5.0	25	25	8-10	8-10	5-6	
7.0	25	25	8-10	8-10	7-9	

Fuente: Instructivo para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles para Carreteras de Corro, Magallanes y Prado (1981).

Para obtener el VRS crítico de las capas restantes, esto es la subbase y base, el método emplea la ecuación II.1, en donde interviene un coeficiente de variación estimado (v) entre 0.2 y 0.3, debido a cambios posibles del material, procedimiento constructivo, etc. Lo anterior, siempre tenderá a disminuir el VRS de campo promedio, que como ya se dijo cubre las incertidumbres tanto de la prueba de valor relativo de soporte como de los materiales, redundando en lo que se conoce como factor de seguridad.

$$VRS_{crit} = \overline{VRS} (1 - 0.84 v) \quad \text{Ecuación II.1. Valor relativo de soporte}$$

El segundo paso contemplado en el método, consiste en la información y procesamiento de los datos del tránsito, partiendo del TPDA inicial, su tasa de crecimiento en porcentaje anual y la composición vehicular detallada, considerando desde los automóviles y vehículos ligeros hasta los vehículos más pesados de carga.

Se hace notar que el método contempla en este análisis los porcentajes de vehículos pesados, tanto cargados con carga legal, como totalmente vacíos (Tabla II.3).

Tabla II.3. Ejemplo formato de registro de datos de composición vehicular con porcentajes de cargados y vacíos.

TIPO DE VEHICULO	COMPOSICION	PROPORCION	
		CARGADOS	VACIOS
Automóviles			
Camiones Ligeros (A' 2)			
Autobuses (B2)			
Camiones de dos ejes (C2)			
Camiones de tres ejes (C3)			
Tractores con semirremolque (T2-S1)			
Tractores con semirremolque (T2-S2)			

Fuente: Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos de Corro y Prado (1999).

Para el análisis del tránsito equivalente acumulado (ΣL), el método inicia el cálculo de los coeficientes de daño a diferentes profundidades de la estructura del pavimento, lo cual puede procesarse con el empleo de las tablas del Apéndice E del método de diseño original del Instituto de Ingeniería, reporte No. 444 de Corro, *et al.* (1981). Se debe calcular el coeficiente de daño de cada vehículo tanto en condiciones de carga reglamentada y vacíos, para profundidades de $Z = 0$ cm para obtener los ejes equivalentes en carpeta y base, y $Z = 30$ cm para el resto de la sección.

Al obtenerse los coeficientes de daño para todos y cada uno de los vehículos vacíos y cargados a las profundidades $Z = 0$ y $Z = 30$, el proyectista debe multiplicar éstos por la composición del tránsito en porcentaje. Con ello se obtiene el Número de ejes equivalentes para cada vehículo y para cada

profundidad. Al efectuar la sumatoria de tales valores en el carril de proyecto se multiplica por el coeficiente de acumulación del tránsito CT (Ecuación II.2) y por el valor de TPDA inicial, se obtiene el tránsito equivalente acumulado ΣL para las capas de carpeta y base, y sub-base y terracerías respectivamente.

Finalmente, el método presenta un procedimiento sencillo para obtener los espesores equivalentes de diseño de la sección estructural del pavimento, procedimiento que incluye varios nomogramas que están en función del nivel de confianza Q_u que se elija, el Valor Relativo de Soporte Crítico de cada capa y el tránsito equivalente acumulado en ejes sencillos de 8.2 toneladas en el carril de proyecto. Hoy en día todo este proceso se lleva a cabo por medio del programa desarrollado también por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, DISPAV-5 versión 2, Corro y Prado (1999), lo que facilita la obtención de datos y evita el uso de los nomogramas.

$$CT = 365 \sum_{j=1}^n (1+r)^{j-1} = 365 \left(\frac{(1+r)^n - 1}{r} \right) \quad \text{Ecuación II.2. Coeficiente de acumulación del tránsito}$$

Donde:

CT = Coeficiente de acumulación del tránsito

n = Años de servicio

r = Tasa de crecimiento anual

Con lo anterior, el proyectista esta en posibilidades de elegir el espesor final de cada capa de la sección estructural del pavimento diseñado, interviniendo para ello los diferentes criterios que adopte para una mejor estructuración de la sección carretera, tomando en cuenta ciertos arreglos de capas, ciertas clases de materiales y mínimos espesores que se tienen especificados por la dependencia o autoridad responsable.

II.4.1.1. Programa DISPAV-5

El DISPAV-5, es un programa que permite evaluar y/o diseñar pavimentos tomando en cuenta aspectos de falla por fatiga a la tensión y deformación acumulada. Calcula pavimentos para carreteras normales y de altas especificaciones. Por medio de este programa es posible obtener varias alternativas de diseño de pavimentos flexibles para carreteras o, en su caso, el espesor adicional equivalente para reconstrucción.

El programa se basa en el método de diseño propuesto por el Instituto de Ingeniería de la UNAM; por lo que es ampliamente reconocido y aceptado por los proyectistas mexicanos debido a que las estructuras resultantes se comportan, en su mayoría, de una manera satisfactoria.

Dentro del programa DISPAV-5 se proporciona la subrutina TRANSIT5, para el cálculo del tránsito de proyecto del camino de interés. Este se determina empleando los coeficientes de daño desarrollados en el manual de Corro y Prado (1999) a partir del TPDA, la composición del tránsito, las cargas por eje, el periodo de proyecto y la tasa de crecimiento anual. El procedimiento para obtener el tránsito diario promedio inicial en ejes estándar de 8,2 toneladas se observa en dicho manual. El resultado es el tránsito de proyecto a diferentes profundidades (5, 15, 30, 60, 90 y 120 cm).

Para el diseño del pavimento se requieren dos tipos de tránsito de proyecto (expresado en ejes sencillos estándar de 8.2 toneladas de peso), uno de ellos para prevenir la deformación permanente acumulada excesiva en las capas no estabilizadas, y el otro para prevenir la falla prematura por agrietamiento debido a la fatiga de las capas asfálticas.

Para el caso de deformación permanente acumulada los resultados de las investigaciones realizadas, emplean los siguientes criterios e información experimental:

1. El criterio de Terzaghi de capacidad de carga

2. El criterio de Boussinesq para pasar del VRS_z (representativo de las características de los materiales a la profundidad “z”, durante la vida de servicio de la carretera) para estimar el “ $VRS_z=0$ equivalente” si dicha capa de material estuviera en la superficie de la carretera.

3. Los modelos experimentales de comportamiento a largo plazo de carreteras, por repetición de las solicitaciones del tránsito, obtenidos en 80 tramos de Matamoros, Pue., y Salinas de Hidalgo, SLP. Construidos por el Instituto de Ingeniería.

4. También fueron de utilidad los resultados obtenidos en pruebas aceleradas a escala natural, en condiciones controladas de temperatura y humedad, de diferentes secciones estructurales de pavimento ensayadas en la Pista Circular del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Corro y Prado (1999) comentan que las tendencias observadas en los modelos de deterioro fueron congruentes con la experimentación en caminos “normales”, de acuerdo con los estudios realizados en carreteras típicas de la red nacional. Además de que la capacidad de carga se midió experimentalmente en términos de esfuerzos, en kg/cm^2 , para una penetración de 2.54 mm. El pistón de prueba fue el estándar empleado la prueba CBR (California Bearing Ratio).

Para fijar el valor VRS_z , crítico de diseño se recomienda que el proyectista tome en cuenta su criterio y experiencia para definir el valor, además de aplicar la información regional disponible.

Los valores de capacidad de carga medidos experimentalmente, a la penetración de 2.54 mm, se transformaron a “Valores VRS_z , donde dicho valor representa la resistencia crítica expresada en el camino, durante toda su vida de servicio, a la profundidad “z” a la cual se estima la resistencia”. El VRS_z estimado se debe establecer considerando la compactación a que se van a colocar los materiales, así como las condiciones de humedad previsibles durante la vida de servicio del camino.

El método establece valores mínimos y máximos para el VRS_z , (Tabla II.4) con el propósito de obtener espesores adecuados cuando éste excede los umbrales máximos o mínimos convenientes de los materiales empleados.

Tabla II.4. VRS máximo para todos los niveles de tránsito, (VRS_p).

Capa	VRS máx. (%)
Base	120
Sub-base	30
Subrasante	20
Terracería	20

Fuente: Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos de Corro y Prado (1999).

Los valores máximos de VRS_z se establecen para obtener espesores razonables desde el punto de vista constructivo y por confiabilidad del diseño. Los VRS_z mínimos se especifican para limitar la calidad mínima de la base y de la terracería. Para base hidráulica VRS_p mínimo 70% y terracería VRS_p mínimo 3%; si se introducen valores menores a éstos el programa se detiene y el proyectista debe replantear el proyecto con otros materiales. En caso de que se propongan

valores mayores a los máximos, el programa toma el valor máximo admisible como el VRS_p , aunque registra el valor propuesto por el proyectista para emplearlo en la estimación del módulo de rigidez de la capa correspondiente, en caso de requerirse.

Para el diseño por fatiga se requiere encontrar las deformaciones unitarias críticas de tensión en la parte inferior de la carpeta. Para esto se necesita conocer el módulo de rigidez (módulo dinámico, módulo de resiliencia o módulo elástico) de las capas no estabilizadas.

El programa solicita al usuario ese módulo de rigidez, que representa el comportamiento de dicha capa en condiciones de servicio, durante la vida útil del pavimento. En caso de que no se tenga el dato exacto de ese módulo, se presenta al usuario la opción de estimarlo a partir del VRS_z crítico esperado en el lugar, de acuerdo con el modelo desarrollado en el Instituto de Ingeniería, UNAM, igual a:

$$E = 130 VRS_z^{0.7}$$

Ecuación II.3. Fórmula de
Correlación entre Módulo y VRS_z

Las relaciones empíricas entre el módulo de rigidez y el VRS_z deben tomarse con precaución pues se obtienen para condiciones muy generales y pueden requerir modificaciones en proyectos específicos. El programa permite que el usuario cambie los valores sugeridos, para tomar en cuenta su experiencia o resultados reales de los materiales específico del proyecto.

En la reología de las mezclas asfálticas, la temperatura y el tiempo de aplicación de carga tienen una influencia significativa en el valor del módulo en un momento determinado, por lo cual se recomienda hacer estudios regionales para fijar los valores de proyecto. Esto se puede hacer analíticamente aplicando la ley de Miner (1945) la cual se utiliza para predecir el agrietamiento por fatiga. Según

este concepto, el número permisible de repeticiones de carga está relacionado con el valor de la deformación por tensión en la parte inferior de la capa asfáltica (número de repeticiones esperadas y permisibles).

Otra manera de obtener el módulo de rigidez es por medio del programa MODULO-5, el cual está basado en la experiencia de diferentes instituciones y se incluye como apoyo para estimar los módulos de rigidez pero no forma parte del programa de diseño DISPAV-5. El programa presenta los algoritmos que cuatro instituciones desarrollaron:

1. Laboratorios Shell. Se basa en experimentación con mezclas densas.
2. Instituto del Asfalto. Se guía en experimentación sobre concretos asfálticos, usados en EUA.
3. Modelo de Witczack. Se basa en el estudio de 149 mezclas asfálticas de diferentes tipos, su base experimental incluye la experimentación empleada por el Instituto del asfalto, complementada por la experimentación en mezclas de varios tipos.
4. Instituto del Transporte de Texas. Se fundamenta en el estudio de las mezclas comúnmente empleadas en dicho Estado.

Por su base experimental, el modelo de Witczack parece ser el más completo. Este modelo requiere la entrada de datos sobre la viscosidad del asfalto, frecuencia de aplicación de la carga, temperatura del pavimento, volumen de vacíos, volumen de asfalto, granulometría del agregado (porcentaje retenido en malla de 19 mm, 9.5 mm y 4.75 mm) y tipo de asfalto (clasificado según su viscosidad: AC-5, AC-10, AC-20 o AC-40).

Para el cálculo de esfuerzos, deformaciones unitarias y desplazamientos verticales, se requieren los módulos de rigidez de todas las capas. Para el caso de los materiales no estabilizados con asfalto, las recomendaciones son similares. Por tanto se insiste en realizar un buen control de laboratorio, tomando en cuenta que la compactación, el contenido de agua y los efectos climáticos, modifican de manera significativa el comportamiento de los materiales.

El programa revisa que la relación de módulos entre dos capas adyacentes no estabilizadas no sobrepase cierto límite, para evitar la generación teórica de esfuerzos de tensión excesivos en la parte inferior de la capa superior. Esta relación límite se toma de estudios de la compañía Shell:

$$K = 0.2 h^{0.45}$$

Ecuación II.4. Relación de módulos admisibles

Donde: h es el espesor de la capa superior en mm.

K es la relación de módulos admisibles

En caso de que se exceda la relación de módulos el programa propone el ajuste recomendable en el valor de los módulos de rigidez, si el proyectista acepta la sugerencia se hace el ajuste, en caso contrario se continúa con los valores iniciales.

Con los datos anteriores se puede calcular la deformación unitaria de tensión en la carpeta haciendo uso de la subrutina CHEV-5. Este programa permite el empleo de cinco capas.

El valor calculado de la deformación unitaria de tensión en la carpeta, permite la obtención de la vida previsible por fatiga, empleando el modelo

matemático de vida por fatiga, desarrollado en el Instituto de Ingeniería, UNAM; de acuerdo con el nivel de confianza elegido para el proyecto.

La Relación de Poisson es otro parámetro que se necesita indicar. Este es difícil de determinar ya que se requiere contar con equipo de prueba dinámico y medidores de deformación muy sensibles para registrar simultáneamente deformaciones verticales y horizontales resilientes. Por esta razón, Corro y Prado (1999), sugieren al usuario valores promedio en cada capa, aunque permite modificarlos en caso de que se tenga información confiable. También se pide el nivel de confianza, el cual se refiere a la probabilidad de que la duración real del pavimento sea al menos igual a la de proyecto. Se sugiere el empleo de un nivel de 85 por ciento, pero el método permite al usuario el empleo de cualquier nivel entre 50 y 99 por ciento.

Al tener el tránsito equivalente, los VRSz de las capas no estabilizadas, el módulo elástico de la carpeta y el nivel de confianza del proyecto, se determinan los espesores requeridos para cada capa de la sección estructural, empleando los modelos matemáticos desarrollados para ese fin.

En caso de que al determinar los espesores se encuentre alguna capa que requiera espesores muy pequeños (menores que 10 cm), se pone a consideración del proyectista la conveniencia de reconsiderar el proyecto desechando el uso de esa capa. Si el proyectista está de acuerdo con ello, se calculan de nuevo los espesores sin esa capa. Si no se acepta la sugerencia, el diseño continúa con las capas propuestas inicialmente, ajustando el espesor calculando al mínimo correspondiente a esa capa y al tránsito de proyecto.

II.4.2. Método de diseño del Instituto del Asfalto de los E.U.A.

El método más reciente del Instituto del Asfalto de los Estados Unidos de Norteamérica (1993), editado en 1991 y publicado en 1993, presenta algunos cambios significativos, respecto a los métodos anteriores para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles. El método se basa principalmente en la aplicación de la teoría elástica en multicapas, que utiliza resultados de investigaciones recientes por parte de ese organismo. Sin embargo, se reconoce que por los avances en la tecnología de los pavimentos asfálticos, se requieren más conocimientos sobre las propiedades de los materiales para las necesidades actuales de los sistemas carreteros, por lo que el método vigente, probablemente requiera revisión e implementación de mejoras futuras.

El manual presenta un procedimiento de diseño para obtener los espesores de la sección estructural de pavimentos, donde se utilizan el cemento asfáltico y las emulsiones asfálticas en toda la sección o en parte de ella. Se incluyen varias combinaciones de superficies de rodadura con concreto asfáltico, carpetas elaboradas con emulsiones asfálticas, bases asfálticas y bases o sub-bases granulares.

El método considera períodos de diseño de uno a 35 años y tasas de crecimiento del tránsito del 2 al 10% anual. (Ver Tabla II.5). Para el cálculo del porcentaje de camiones en el flujo vehicular sobre el carril de diseño, el método recomienda los valores de la Tabla II.6.

Un punto importante que se hace notar, es que para el cálculo de los ejes equivalentes, el método recomienda utilizar la metodología de la AASHTO, en su versión 1993. Para lo anterior, el método proporciona factores de equivalencia de la carga o coeficientes de daño para ejes sencillos, dobles o triples, incluyendo cargas sobre el eje desde 0.5 toneladas (1,000 lb) hasta 41 toneladas (90,000 lb),

lo que se considera cubre sobradamente cualquier condición de peso de vehículos de carga en cualquier red de carreteras, desde rurales hasta grandes autopistas.

Tabla II.5. Factores de corrección para obtener el número de tránsito de diseño.

Período de Diseño, años (n)	Tasa Anual de Crecimiento, en por ciento.						
	2	4	5	6	7	8	10
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

Fuente: Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos de Corro y Prado (1999).

Tabla II.6. Porcentaje de camiones en el carril de diseño.

N° de carriles en ambas direcciones	% de camiones en el carril de diseño
2	50
4	45
6 o más	40

Fuente: Diseño de Espesores de Estructuras de Pavimento del Instituto del Asfalto.

Habiéndose obtenido los coeficientes por cada eje o conjunto de ejes, la suma proporcionará el coeficiente total de equivalencia del vehículo. Utilizando el factor o tasa anual de crecimiento del tránsito señalado en la Tabla II.5., y multiplicándolo por los coeficientes totales de equivalencia y por el número de vehículos del aforo del tránsito promedio anual, se obtienen los ejes equivalentes acumulados reales para el período de diseño considerado.

Para el diseño de los espesores de una sección estructural del pavimento flexible, el método actual del Instituto del Asfalto, considera como parámetro fundamental, dentro de la evaluación de los materiales, la obtención del Módulo de Resiliencia (M_R), con recomendaciones del método de prueba descrito en el Manual de Suelos MS-10 del propio Instituto. Sin embargo, reconocen que no todos los organismos o dependencias tienen el equipo adecuado para llevar a cabo tal prueba, por lo que han establecido factores de correlación entre M_R y la prueba estándar de Valor Relativo de Soporte (T193 de AASHTO). Las cuales señalan que los resultados son bastante aproximados; sin embargo, para un diseño preciso, se recomienda llevar a cabo la prueba del Módulo de Resiliencia.

En función del tránsito esperado sobre el pavimento en estudio, el método del Instituto del Asfalto recomienda los siguientes valores percentiles para calcular el Módulo de Resiliencia de diseño de la capa subrasante.

Tabla II.7. Factores de equivalencia de carga.

Carga Total por Eje o Conjunto de Ejes.		Factores de Equivalencia de Carga.		
Kn	lb	Eje Sencillo	Ejes dobles	Ejes Triples
4.45	1,000	0.00002		
8.9	2,000	0.00018		
17.8	4,000	0.00209	0.0003	
26.7	6,000	0.01043	0.001	0.0003
35.6	8,000	0.0343	0.003	0.001
44.5	10,000	0.0877	0.007	0.002
53.4	12,000	0.189	0.014	0.003
62.3	14,000	0.36	0.027	0.006
71.2	16,000	0.623	0.047	0.011
80	18,000	1	0.077	0.017
89	20,000	1.51	0.121	0.027
97.9	22,000	2.18	0.18	0.04
106.8	24,000	3.03	0.26	0.057
115.6	26,000	4.09	0.364	0.08
124.5	28,000	5.39	0.495	0.109
133.4	30,000	6.97	0.658	0.145
142.3	32,000	8.88	0.857	0.191
151.2	34,000	11.18	1.095	0.246
160.1	36,000	13.93	1.38	0.313
169	38,000	17.2	1.7	0.393
178	40,000	21.08	2.08	0.487
187	42,000	25.64	2.51	0.597
195.7	44,000	31	3	0.723
204.5	46,000	37.24	3.55	0.868
213.5	48,000	44.5	4.17	1.033
222.4	50,000	52.88	4.86	1.22
231.3	52,000		5.63	1.43
240.2	54,000		6.47	1.66
249	56,000		7.41	1.91
258	58,000		8.45	2.2
267	60,000		9.59	2.51
275.8	62,000		10.84	2.85
284.5	64,000		12.22	3.22
293.5	66,000		13.73	3.62
302.5	68,000		15.38	4.05
311.5	70,000		17.19	4.52
320	72,000		19.16	5.03
329	74,000		21.32	5.57
338	76,000		23.66	6.15
347	78,000		26.22	6.78
356	80,000		29	7.45
364.7	82,000		32	8.2
373.6	84,000		35.3	8.9
382.5	86,000		38.8	9.8
391.4	88,000		42.6	10.6
400.3	90,000		46.8	11.6

Fuente: Diseño de Espesores de Estructuras de Pavimento del Instituto del Asfalto.

Tabla II.8. Valor percentil para diseño de subrasante, de acuerdo al nivel del tránsito.

Nivel del Tránsito	Valor Percentil para diseño de Subrasante
Menor de 10,000 ejes equivalentes	60
Entre 10,000 y 1'000,000 de ejes equivalentes	75
Mayor de 1'000,000 de ejes equivalentes	87.5

Fuente: Diseño de Espesores de Estructuras de Pavimento del Instituto del Asfalto (1993).

Así mismo, recomienda los valores de la siguiente tabla para las diferentes pruebas a realizarse con materiales de bases y sub-bases.

Para el diseño final de los espesores de la sección estructural del pavimento flexible, proporciona 18 gráficas o cartas de diseño en sistema métrico y 18 en sistema inglés, las cuales cubren todas las variables involucradas y se encuentran en el mismo manual de diseño.

Tabla II.9. Valores para diferentes pruebas, con materiales de bases y sub-bases.

Prueba:	Requisitos Sub-base (%)	Requisitos Base (%)
VRS, mínimo	20	80
Valor R, mínimo	55	78
Límite Líquido, máximo	25	25
Índice Plástico, máximo	6	NP
Equivalente de Arena, mínimo	25	35
Material que pasa la malla 200, máximo, (finos)	12	7

Fuente: Diseño de Espesores de Estructuras de Pavimento del Instituto del Asfalto (1993).

II.4.3. Método de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 1993

El método de la AASHTO (1993), describe con detalle los procedimientos para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles y rígidos de carreteras. En el caso de los pavimentos flexibles, el método establece que la superficie de rodadura se resuelve solamente con concreto asfáltico y tratamientos superficiales, pues asume que tales estructuras soportarán niveles significativos de tránsito (mayores de 50,000 ejes equivalentes acumulados de 8.2 ton durante el período de diseño), dejando fuera pavimentos ligeros para tránsitos menores al citado, como son los caminos revestidos o de terracería.

El diseño se basa primordialmente en identificar o encontrar un “número estructural SN” para el pavimento flexible que pueda soportar el nivel de carga solicitado. Para determinar el número estructural SN requerido, el método proporciona la ecuación general y la gráfica de la Figura II.2., que involucra los siguientes parámetros:

El tránsito en ejes equivalentes acumulados para el período de diseño seleccionado, “ W_{18} ”; el parámetro de confiabilidad, “R”; la desviación estándar global, “ S_o ”; el módulo de resiliencia efectivo, “ M_R ” del material usado para la subrasante y la pérdida o diferencia entre los índices de servicios inicial y final deseados, “ ΔPSI ”. La ecuación siguiente puede ser usada para calcular el parámetro del tránsito W_{18} en el carril de diseño.

$$W_{18} = D_D * D_L * W_{\exists 18}$$

Ecuación II.5. Tránsito acumulado en ejes equivalentes

W_{18} = Tránsito acumulado en el primer año, en ejes equivalentes sencillos de 8.2 ton, en el carril de diseño.

DD = Factor de distribución direccional; se recomienda 50% para la mayoría de las carreteras, pudiendo variar de 0.3 a 0.7, dependiendo de en qué dirección va el tránsito con mayor porcentaje de vehículos pesados.

$W_{\exists 18}$ = Ejes equivalentes acumulados en ambas direcciones.

DL = Factor de distribución por carril, cuando se tengan dos o más carriles por sentido. Se recomiendan los siguientes valores:

Tabla II.10. Factor de distribución por carril.

No. de carriles en cada sentido	% De W_{18} en el carril de diseño
1	100
2	80-100
3	60-80
4 o mas	50-75

Fuente: Guía de Diseño de Estructuras de Pavimento de la AASHTO.

Una vez calculados los ejes equivalentes acumulados en el primer año, el diseñador deberá estimar con base en la tasa de crecimiento anual y el período de diseño en años, el total de ejes equivalentes acumulados y así contar con un parámetro de entrada para la ecuación general o para el nomograma de la Figura II.2.

En la versión de 1993, recomienda los siguientes períodos de diseño en función del tipo de carretera (Tabla II.11).

Con el parámetro de Confiabilidad "R" (Tabla II.12), se trata de llegar a cierto grado de certeza en el método de diseño, para asegurar que las diversas alternativas de la sección estructural que se obtengan, durarán como mínimo el período de diseño.

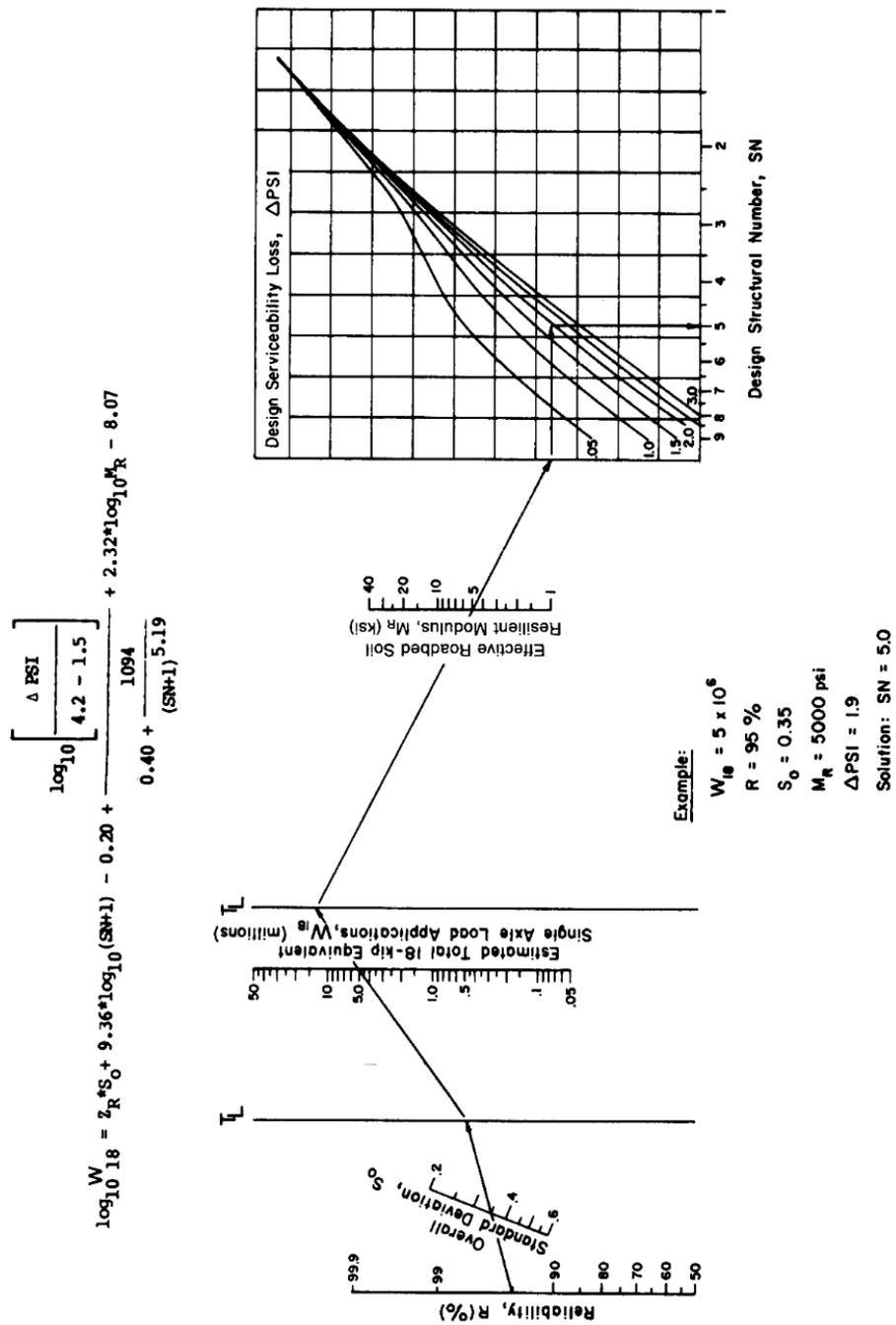


Figura II.2. Gráfica de diseño para estructuras de pavimento flexible.
 Fuente: Guía de Diseño de Estructuras de Pavimento de la AASHTO.

Se consideran posibles variaciones en las predicciones del tránsito en ejes acumulados y en el comportamiento de la sección diseñada.

Tabla II.11. Períodos de diseño en función del tipo de carretera.

Tipo de carretera	Período de diseño
Urbana con altos volúmenes de tránsito	30-50 años
Interurbana con altos volúmenes de tránsito	20-50 años
Pavimentada con bajos volúmenes de tránsito	15-25 años
Revestidas con bajos volúmenes de tránsito	10-20 años

Fuente: Guía de Diseño de Estructuras de Pavimento de la AASHTO (1993).

La Desviación estándar global “So” está ligada directamente con la Confiabilidad (R), habiéndolo determinado, en este paso se selecciona un valor So “Desviación Estándar Global”, representativo de condiciones locales particulares, que considera posibles variaciones en el comportamiento del pavimento y en la predicción del tránsito.

Tabla II.12. Valores de confiabilidad “R”.

Niveles de confiabilidad	
Clasificación funcional	Nivel recomendado para carreteras (%)
Carretera interestatal o autopista	80-99.9
Red principal o federal	75-95
Red secundaria o estatal	75-95
Red rural o estatal	50-80

Fuente: Guía de Diseño de Estructuras de Pavimento de la AASHTO (1993).

En el método de la AASHTO, la parte fundamental para caracterizar debidamente a los materiales, consiste en la obtención del Módulo de Resiliencia, con base en pruebas de laboratorio, realizadas en materiales a utilizar en la capa subrasante (Método AASHTO T274), con muestras representativas (esfuerzo y

humedad) que simulen las estaciones del año respectivas. El módulo de resiliencia “estacional” será obtenido alternadamente por correlaciones con propiedades del suelo, tales como el contenido de arcilla, humedad, índice plástico, etc.

Finalmente, deberá obtenerse un “módulo de resiliencia efectivo”, que es equivalente al efecto combinado de todos los valores de módulos estacionales.

El cambio o pérdida en la calidad de servicio que la carretera proporciona al usuario, se define en el método con la siguiente ecuación:

$$\Delta PSI = \rho_o - \rho_t$$

Ecuación II.6. Diferencia de índices de servicio inicial y final

Donde:

ΔPSI = Diferencia entre los índices de servicio inicial u original y el final o terminal deseado.

ρ_o = Índice de servicio inicial (4.5 para pavimentos rígidos y 4.2 para flexibles).

ρ_t = Índice de servicio terminal, para el cual AASHTO maneja en su versión 1993 valores de 3.0, 2.5 y 2.0, recomendando 2.5 ó 3.0 para caminos principales y 2.0 para secundarios.

Una vez que el diseñador ha obtenido el Número Estructural SN para la sección estructural del pavimento, utilizando el gráfico (Figura II.2) o la ecuación general básica de diseño, donde se involucraron los parámetros anteriormente descritos (tránsito, R, S_o , M_R , ΔPSI), se requiere ahora determinar una sección multicapa que en conjunto provea de suficiente capacidad de soporte equivalente al número estructural de diseño original.

La siguiente ecuación puede utilizarse para obtener los espesores de cada capa, para la superficie de rodadura o carpeta, base y sub-base, haciéndose

notar que el método de AASHTO, versión 1993, involucra coeficientes de drenaje particulares para la base y sub-base.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad \text{Ecuación II.7. Número estructural}$$

Donde:

a_1 , a_2 y a_3 = Coeficientes de capa representativos de carpeta, base y sub-base respectivamente.

D_1 , D_2 y D_3 = Espesor de la carpeta, base y sub-base respectivamente, en pulgadas.

m_2 y m_3 = Coeficientes de drenaje para base y sub-base, respectivamente.

Para la obtención de los coeficientes de capa a_1 , a_2 y a_3 se utilizan figuras, en donde se representan valores de correlaciones hasta de cinco diferentes pruebas de laboratorio: Módulo Elástico, Texas Triaxial, R - valor, VRS y Estabilidad Marshall.

Para la obtención de los coeficientes de drenaje, m_2 y m_3 , correspondientes a las capas de base y sub-base respectivamente, el método actual de AASHTO se basa en la capacidad del drenaje para remover la humedad interna del pavimento, definiendo lo mostrado en la Tabla II.13.

En la Tabla II.14 se presentan los valores recomendados para m_2 y m_3 (bases y sub-bases granulares sin estabilizar) en función de la calidad del drenaje y el porcentaje del tiempo a lo largo de un año, en el cual la estructura del pavimento pueda estar expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación.

Tabla II.13. Capacidad del drenaje para remover la humedad.

Calidad del Drenaje:	Agua Removida en:
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Malo	Agua no drena

Fuente: Guía de Diseño de Estructuras de Pavimento de la AASHTO (1993).

Tabla II.14. Valores (m_i) recomendados para modificar los coeficientes estructurales de capa de bases y sub-bases sin tratamiento, en pavimentos flexibles.

% De tiempo al cual está expuesta la estructura del pavimento a niveles de humedad próxima a la saturación					
Calidad del drenaje	Agua removida en:	Menor de 1%	1-5%	5-25%	Mayor del 25%
Excelente	2 h.	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1 día	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1 semana	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1 mes	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	Agua no drenada	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Fuente: Guía de Diseño de Estructuras de Pavimento de la AASHTO (1993).

Para el cálculo de los espesores D_1 , D_2 y D_3 (en pulgadas), el método sugiere respetar los valores mínimos sugeridos en la Tabla II.15, en función del tránsito en ejes equivalentes sencillos acumulados.

Con lo cual queda configurada la sección estructural de proyecto para pavimento flexible.

Tabla II.15. Espesores mínimos, en pulgadas, en función de los ejes equivalentes.

Tránsito (ESAL`S) en ejes equivalentes	Carpetas de concreto asfáltico	Bases granulares
Menores de 50,000	1.0 o T.S.	4.0
50,000-150,000	2.0	4.0
150,001-500,000	2.5	4.0
500,001-2`000,000	3.0	6.0
2`000,001-7`000,000	3.5	6.0
Mayor de 7`000,000	4.0	6.0

(T.S) tratamiento superficial con sellos

Fuente: Guía de Diseño de Estructuras de Pavimento de la AASHTO.

II.4.4. Método de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 2002

La Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimentos, fue el documento utilizado por los organismos viales estatales de Estados Unidos de América, para diseñar pavimentos de carreteras nuevas y rehabilitadas. Las versiones previas a este método tienen bases empíricas. La nueva guía se basó en el Ensayo Vial AASHO 1950, el cual incluyó una cantidad limitada de secciones estructurales, en una sola localidad y con niveles de tráfico limitados. Las guías de 1986 y 1993 contienen algunas mejoras en los parámetros de los materiales de entrada, en el diseño de confiabilidad, y en los procedimientos empíricos para el diseño de la rehabilitación.

Si bien, es cierto que estas versiones han funcionado adecuadamente durante varias décadas, se observaron muchas limitaciones. Las principales limitaciones son las deficiencias en la definición certera de la acción de las cargas de tránsito, de los efectos climáticos, de la caracterización de materiales, de los efectos de construcción y drenaje, así como la falta de capacidad para manejar pavimentos de larga duración. Muchas de las deficiencias se derivan del hecho de

que, los procedimientos existentes son de naturaleza empírica y estos se orientan más hacia el diseño de pavimentos nuevos en lugar de los rehabilitados, los cuales ocupan la mayor parte de los presupuestos carreteros hoy en día.

Para contrarrestar dichas deficiencias, la Fuerza de Tarea Conjunta en Pavimentos de la AASHTO (JTFP), desarrolló una guía de mejora en el año 2002. El producto final de esta investigación fue el desarrollo de una Guía de diseño de pavimento mecánico-empírico (ME) y el software que lo acompaña (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide), el cual se dio a conocer unos años después.

El alcance del método ME es la capacidad para predecir directamente indicadores críticos de desempeño en el pavimento, que afectan a la comodidad del usuario y la calidad de circulación, además del análisis de los mecanismos de deterioro típicamente considerados, pero con un mayor nivel de precisión.

La Guía proporciona conceptos uniformes para el diseño de pavimentos y considera como datos de entrada los factores del clima y el tránsito para los dos tipos de pavimento (rígido y flexible). El modelo considera las propiedades de los materiales con las que predice los esfuerzos que soportarán. Con lo anterior, el diseñador tendrá una potente herramienta con la cual podrá definir espesores y características mecánicas necesarias de cada una de las capas, para llegar a la vida de proyecto deseada. Los datos de entrada que se requieren para el diseño del pavimento son:

1. Tránsito (composición, tasa de crecimiento, distribución de cargas, etc.).
2. Condiciones climáticas (temperaturas y precipitación).
3. Estratigrafía (espesores, granulometría, módulo dinámico, relación de Poisson, etc.).

Los pavimentos nuevos y rehabilitados, se diseñan para una determinada vida útil. Durante ésta, el pavimento experimenta una amplia variedad de cargas de tráfico y variación en las condiciones ambientales que, con el tiempo, deterioran gradualmente la estructura de pavimento.

Dependiendo del tramo carretero se analiza la composición vehicular, misma que se obtiene de los aforos vehiculares detallados, donde se especifica el tipo de vehículo, número de vehículos por tipo, distribución horaria y estacional durante el año. Los datos de tráfico recogidos de esta manera se consideran para determinar el daño que provocan al pavimento en función de las características de los materiales de cada capa, las cuales son función del estado del tiempo en la zona y que se definen con mucha precisión dentro del método.

El clima influye en el rendimiento y duración que pueda presentar una estructura de pavimento, por lo que será necesario analizar a fondo dichas condiciones para cada estructura de pavimento por construir o rehabilitar. Para el caso del programa de la AASHTO 2002, el dato de la temperatura se obtiene seleccionando una de las estaciones hidrométricas dadas de alta en el sistema, o bien interpolar entre algunas de ellas. Mientras que para la precipitación se ingresa la cantidad de lluvia registrada (ft).

Las estaciones hidrométricas dadas de alta corresponden a las reales, distribuidas a lo largo y ancho de Estados Unidos de América. La selección de una estación hidrométrica se determina en función de la cercanía a la obra analizada.

La calidad del material influye en el rendimiento de una estructura de pavimento. En este programa el ingreso de datos es tan detallado (granulometría, espesor, características mecánicas, etc.) que la presentación de los materiales así

como la respuesta que presentan ante las cargas se apega bastante a la realidad. Las pruebas mecánicas requeridas para cada capa son:

- Materiales asfálticos (módulo dinámico)
- Materiales de concreto (PCC) (módulo de ruptura y módulo elástico)
- Materiales estabilizados con cemento (módulo de ruptura y elástico)
- Materiales granulares para base / subbase (módulo resiliente)
- Suelos para subrasante (módulo resiliente)
- Roca madre (módulo elástico)

Además de los módulos considerados para cada tipo de material, se requiere también el módulo de Poisson (0.15 – 0.50) para todos los materiales y el coeficiente de expansión térmica para los materiales de concreto (PCC), este último se puede estimar mediante los rangos típicos proporcionados por los coeficientes térmicos para diferentes componentes de mezcla PCC

La Guía incluye algunos modelos para la predicción del Índice de Regularidad Internacional (IRI) para diferentes tipos de pavimentos flexibles, rígidos y sobre capas.

Todos estos parámetros en conjunto, hacen posible diseñar estructuras de pavimento de una manera ordenada y completa, destacando todas las características consideradas sobre el resto de los métodos de diseño.

II.5. Catálogos de secciones

La combinación de métodos analíticos y el ajuste de sus resultados mediante observaciones de tramos reales, ha llevado a una serie de países al desarrollo de catálogos de estructuras de pavimentos o de curvas de diseño; de

forma que con los datos de tránsito de diseño, clima y tipo de subrasante se pueden definir secciones estructurales aptas para el pavimento en cuestión.

II.5.1. Catálogo de Inglaterra

En varios países europeos se han desarrollado métodos tendientes a simplificar el diseño, basados en general en la utilización de dos únicas variables: El volumen de vehículos pesados (normalmente el tránsito medio diario en el año de puesta en servicio) y la categoría de subrasante, la cual se caracteriza mediante un solo parámetro (por ejemplo, el índice CBR). Se dan indicaciones muy precisas en cuanto a los espesores de las capas a disponer entre el pavimento de concreto y la subrasante, en casos de ser necesarias, así como sobre las características de los materiales a utilizar. Con ello se pretende facilitar la labor del ingeniero diseñador, de forma que éste pueda concentrarse en otros temas, tales como la disponibilidad de materiales y la comparación entre distintas alternativas.

Estos métodos simplificados pueden presentarse en forma de curvas continuas o bien como catálogo de estructuras. Un ejemplo de los primeros es el utilizado actualmente en Gran Bretaña, el cual se elaboró en el Departamento de Transporte por Chadwyck (1978). En su redacción, se tuvieron en cuenta las experiencias y resultados obtenidos en distintos tramos de ensayo, así como la teoría del cálculo estructural.

El método se basa en varias curvas de diseño, se han representado las correspondientes a pavimentos en masa y con refuerzo continuo. Se incluye también curvas para pavimentos con una capa de rodadura bituminosa y para pavimentos reforzados con juntas, estos últimos prácticamente en desuso. Todas ellas llegan hasta 10,000 vehículos comerciales por sentido en el año de apertura al tráfico. En Inglaterra la carga máxima por eje simple es de 10 toneladas, lo que

hay que tener en cuenta al comparar los espesores con los de otros países. Para los pavimentos de concreto se adopta un período de diseño de 40 años, con un crecimiento anual de tránsito del 2%.

En las soluciones rígidas, los espesores obtenidos mediante las curvas son para pavimentos que se extienden al menos 1 metro más allá del borde exterior de carril de vehículos pesados, ocupando parte del acotamiento. De no ser así, hay que aumentar el espesor de las capas. Se dan también unas curvas de mayor peso del tránsito de diseño en caso de tratarse de pavimentos bidireccionales.

En todos los casos, los espesores obtenidos mediante las curvas deben redondearse hasta los primeros milímetros más próximos.

Bajo el pavimento se disponen 15 cm de base de grava-cemento o de concreto pobre (*wet lean concrete*), la cual se extiende directamente sobre la subrasante, si el CBR de la misma es superior a 15. En caso contrario hay que disponer una sub-base granular, cuyo espesor es función del CBR de la subrasante.

En general las obras se licitan dando al contratista 4 opciones de pavimento: Rígido, rígido compuesto (con base reforzada continua y la carpeta de pavimento bituminoso), flexible compuesto (con base tratada con cemento) y flexible. El contratista será el responsable de la elección de la estructura por implementar en base a cuestiones constructivas y económicas.

II.5.2. Catálogo de España

En muchos de los catálogos desarrollados en vez de variar de forma continua los espesores en función del tránsito de diseño (como ocurre, al menos

en teoría, en el método inglés), este último se divide en una serie de intervalos, a cada uno de los cuales se asigna un espesor fijo de cada una de las capas que componen el pavimento, con independencia del valor del tránsito dentro de dicho intervalo. Esta tendencia se inició en Francia en 1971, seguida por España y Alemania en 1975, y después por otros países (entre ellos Japón) y algunos estados de EUA. Como ejemplo de uno de estos catálogos, se muestra el catálogo español, contenido en la Instrucción 6.1 y 2-IC "Secciones de firme" del Ministerio de Obras Publicas (1990).

Se recoge en la misma, la experiencia de los 14 años transcurridos desde la publicación en 1975, de las anteriores Normas 6.1 y 6.2 1C para firmes flexibles y rígidos respectivamente, en las que por primera vez se adoptó en España un método de diseño en forma de catálogo. Se tiene también en cuenta la evolución del tránsito y de los materiales constitutivos de las distintas unidades de obra.

En la citada Instrucción, se pide a los ingenieros que concentren su atención en la selección de las subrasantes y secciones estructurales más adecuadas entre las tipificadas, en función de las disponibilidades locales de materiales, con independencia del tipo de pavimento. Se unifican los criterios de diseño y se dan directrices para redactar los pliegos de prescripciones técnicas particulares.

La instrucción se aplica a pavimentos de nueva construcción y también, en general, a la reconstrucción total de pavimentos existentes. Para los refuerzos de pavimento, sigue en principio vigente la Norma 6.3 1C, elaborada por el Ministerio de Fomento (2002).

Existen siete soluciones básicas como máximo, que van desde pavimentos totalmente asfálticos a pavimentos de concreto vibrado. Entre ambos, se sitúan los pavimentos mixtos con capas estabilizadas o tratadas con cemento,

incluyendo también entre estas últimas las de concreto compactado con capa de rodadura asfáltica. Las secciones de pavimento se destinan con números de tres cifras así: la primera, según la categoría de tránsito pesado, la segunda, según la categoría subrasante y la tercera es una cifra de orden. Las secciones que terminan en seis ó siete tienen pavimento de concreto vibrado.

Se debe de indicar que la Instrucción proporciona además, unos esquemas de soluciones de pavimentos de vía y berma exterior para cada tipo de sección de catálogo. Para las capas de concreto vibrado se admite el empleo de tres tipos de concreto, los cuales se definen por su resistencia característica a flexo-tracción a los 28 días de edad.

Las secciones estructurales del catálogo fueron comprobadas por los métodos de diseño usuales (Portland Cement Association, AASHTO) y cotejadas con otros catálogos europeos (Alemania, Francia, Gran Bretaña), para asegurar que eran adecuadas. De todos modos es conveniente señalar que estos cálculos no pueden ser más que aproximados debido a las diferentes variables usadas en cada método.

En pavimentos con dos o más carriles por sentido de circulación es posible diseñar por separado cada carril. La categoría de tránsito pesado determina el espesor de la losa de concreto que, en principio, es de concreto vibrado en masa tipo HP-45 para T0, T1 y T2 y de tipo HP-40 para T3 y T4. De este modo el espesor de la losa varía entre 20 y 30 cm.

Así, por ejemplo, en el caso de una autopista de tránsito T1 (carril de diseño) y dos carriles por sentido, el pavimento de concreto vibrado HP-45 puede tener un espesor uniforme de 25 cm o bien tener una sección trapezoidal. En este caso, y como el carril inferior ha de tener un espesor mínimo de 23 cm (para tránsito T2) en el borde izquierdo del carril y 25 cm en el eje, las losas tendrán 27

cm en el borde derecho. La cantidad de concreto es la misma, pero con una distribución estructuralmente más favorable.

II.5.3. Catálogo de Francia

En un principio, en Francia, no se consideraba una variación continua de espesores en función del tránsito de diseño, si no que se dividía en una serie de intervalos, a cada uno de los cuales se asignaba un espesor fijo de cada una de las capas que componen el pavimento, con independencia del valor del tránsito dentro de dicho intervalo.

Ahora bien, la escasez de agregados en algunas zonas y el aumento del transporte llevó a los directores de proyectos, los organismos técnicos y las empresas a buscar soluciones alternativas, incluso mediante el uso de técnicas para desarrollar los materiales disponibles a nivel local, expresado por la Dirección de Vialidad y Tránsito, (1981), de Francia.

Desde esta perspectiva, nació un manual en forma de catálogo que ofrece un método general de diseño, mediante gráficas y estructuración del pavimento para los distintos casos de tráfico, suelos y materiales. Atendiendo principalmente a las carreteras locales. El contenido en dicho manual es: diseño de estrategias (nivel de servicio, características superficiales, nivel de riesgo, diseño estructural), estudios de viabilidad, los materiales disponibles, intensidad de tráfico y el suelo que soportará las estructuras.

En el catálogo francés de estructuras de pavimento, con objeto de alejar las cargas del borde derecho y disminuir con ello las tensiones y deflexiones, se especifican los siguientes sobre anchos en los pavimentos de concreto:

- 75 cm para los tráficoos T0 y T1.
- 50 cm para los tráficoos T2.
- 25 cm para los tráficoos T3.

Las divisiones entre categorías de tránsito en el Catálogo francés no corresponden exactamente con las del español, si bien son muy parecidas.

Actualmente no se considera necesario un sobre ancho de la capa de base, aunque por razones constructivas se imponen al menos 10 cm a cada lado de la base, cuando la berma no es de concreto. Con berma de concreto la base debe extenderse en los 40 cm cuyo espesor es igual al del pavimento.

Existen diversos manuales utilizados en otros países, que presentan soluciones de estructuras estandarizadas en forma de secciones de diseño, sin embargo, las situaciones particulares de cada país, tales como suelo, clima, materiales y otros factores, recomiendan el diseño de estructuras propias.

II.6. Métodos Geoestadísticos

Journel y Huijbregts (1978) definen a la Geoestadística como la aplicación de la Teoría de Campos Aleatorios (o Funciones Aleatorias) al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales, o simplemente, el estudio de las variables numéricas distribuidas en el espacio.

Para Magdaleno (2010), los fenómenos distribuidos en el espacio, presentan en su mayoría un carácter mixto, un comportamiento caótico o aleatorio a escala local, pero a la vez estructural a gran escala.

Se puede entonces sugerir la idea de interpretar este fenómeno en términos de Función Aleatoria (FA), es decir, a cada punto x del espacio se le

asocia una Variable Aleatoria (VA) $Z(x)$, para dos puntos x , y , se tendrán dos valores $Z(x)$ y $Z(y)$ diferentes pero no independientes, y es precisamente su grado de correlación el que refleja la continuidad de la función en estudio, por lo que Zhang, *et. al.* (1992) mencionan que el éxito de esta técnica es la determinación de la función de correlación espacial de los datos.

De acuerdo a lo que comenta Magdaleno (2010), existen diferentes técnicas determinísticas de interpolación y según sean las características de los datos por analizar se puede considerar adecuada una u otra técnica. Dentro de su investigación, Magdaleno concluye que las técnicas que mejor se ajustan a las variaciones espaciales son Kriging Ordinario y la técnica de Inverso de Distancia Ponderado (IDW). A continuación se presenta de manera resumida el principio de ambas técnicas.

II.6.1. Kriging

Las técnicas Kriging son herramientas numéricas cuyo objetivo es encontrar la mejor estimación posible a partir de la información disponible. Kriging recurre a estimaciones que sean combinaciones lineales de datos (mejor estimador sin sesgo):

$$V^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i V_i$$

Ecuación II.8. Valor estimado de la variable a interpolar.

Donde:

$V^*(x)$ – valor estimado de la variable

V_i – datos conocidos

λ_i – coeficiente de ponderación

II.6.2. Kriging Ordinario

Kriging ordinario es el más común, no requiere conocer la esperanza de la variable aleatoria, sino que la asume. Para asegurar que el estimador es insesgado, la suma de los coeficientes de ponderación debe de ser igual a la unidad.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Ecuación II.9. Coeficientes de ponderación.

Error esperado = 0

$$E (V (X_o) - V^*(X_o)) = 0$$

Ecuación II.10. Error esperado.

II.6.3. Inverso de Distancia Ponderado (IDW)

El Inverso de distancia ponderado (IDW) se encuentra considerado dentro de las técnicas determinísticas de interpolación, ya que estima valores usando una función que minimiza la curvatura general de la superficie, resultando en una superficie suave que pasa exactamente a través de todos los puntos conocidos de entrada.

Además, esta técnica asume implícitamente que los datos que están cercanos son más similares que aquellos que están más alejadas. Para predecir un valor no medido para cualquier lugar (interpolación), IDW utiliza los valores medidos en torno a la ubicación de predicción. Los valores de mediciones más

cercanas a la ubicación de predicción tienen más influencia en el valor predicho que las mediciones más alejadas.

IDW asume que cada punto de medición tiene una influencia local que disminuye con la distancia, por lo cual da mayor peso a los puntos más cercanos a la ubicación de predicción, y los pesos disminuyen en función de la distancia, de ahí el nombre de distancia inversa ponderada.

La fórmula general es:

$$z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(S_i)$$

Ecuación II.11. Valor a predecir para posición S_0 .

Donde:

$Z(S_0)$ es el valor a predecir para la posición S_0 .

N es el número de puntos medidos alrededor del punto a predecir.

λ_i son los pesos asignados a cada punto medido que serán usados. Estos pesos decrecen al aumentar la distancia.

$Z(S_i)$ es el valor observado en la localización de S_i .

Magdaleno (2010) amplía más sobre las técnicas aquí mencionadas, además de otras que él se dedicó a analizar en su trabajo de investigación.

III. EXPERIMENTACIÓN

En este proyecto de investigación, se buscó el desarrollo de una guía de secciones de pavimentos aplicable a las condiciones climatológicas, de tránsito y características del terreno natural de la República Mexicana.

La investigación se centró solo a pavimentos flexibles, para los cuales, el análisis se realizó con el Método del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Corro, *et al.*, 1981), debido a su amplia aceptación y manejo en el medio mexicano.

El método del Instituto de Ingeniería de la UNAM indica que las estructuras de pavimento se ven influenciadas (en su diseño, construcción y comportamiento a lo largo de su vida de servicio) por distintos factores, como son: el tránsito de vehículos, el clima y las características del terreno natural que soportará la estructura.

El trabajo experimental, consistió en obtener información de la Red Federal de carreteras y autopistas (de cada estado) y datos climatológicos de las estaciones hidrométricas (precipitación, temperatura máxima y mínima). Posteriormente se decidió utilizar una herramienta de Sistema de Información Geográfica (SIG), para ubicar espacialmente las variables. Con esta identificación espacial, se realizó un análisis probabilístico para determinar una muestra representativa de la Red Federal. Con la cantidad de kilómetros obtenidos se diseñó un plan de muestreo con base en la normativa M-CAL-1-02/01, referente a criterios estadísticos de muestreo (mediante números aleatorios). Después, se realizaron extracciones de núcleos de capa asfáltica y pozos a cielo abierto. Las muestras obtenidas, se analizaron en laboratorio; con los datos resultantes, fue posible integrar la información en valores “típicos” de cada capa mediante cartas

de control de medias, siguiendo la norma M-CAL-1-03/03. Finalmente, se revisaron los diseños de acuerdo al tránsito, terreno natural y clima con el programa DISPAV-5.

III.1. Proceso de información

III.1.1. Adquisición de variables

La experimentación comenzó con la adquisición e integración de variables en una herramienta de Sistema de Información Geográfica (SIG). De esta manera, se usó el SIG por medio del software ArcMap versión 9.3, con el que se observó la información base de manera geográfica, lo cual facilitó el proceso de zonificación. La información de cada variable se esquematizó, como se muestra a continuación:

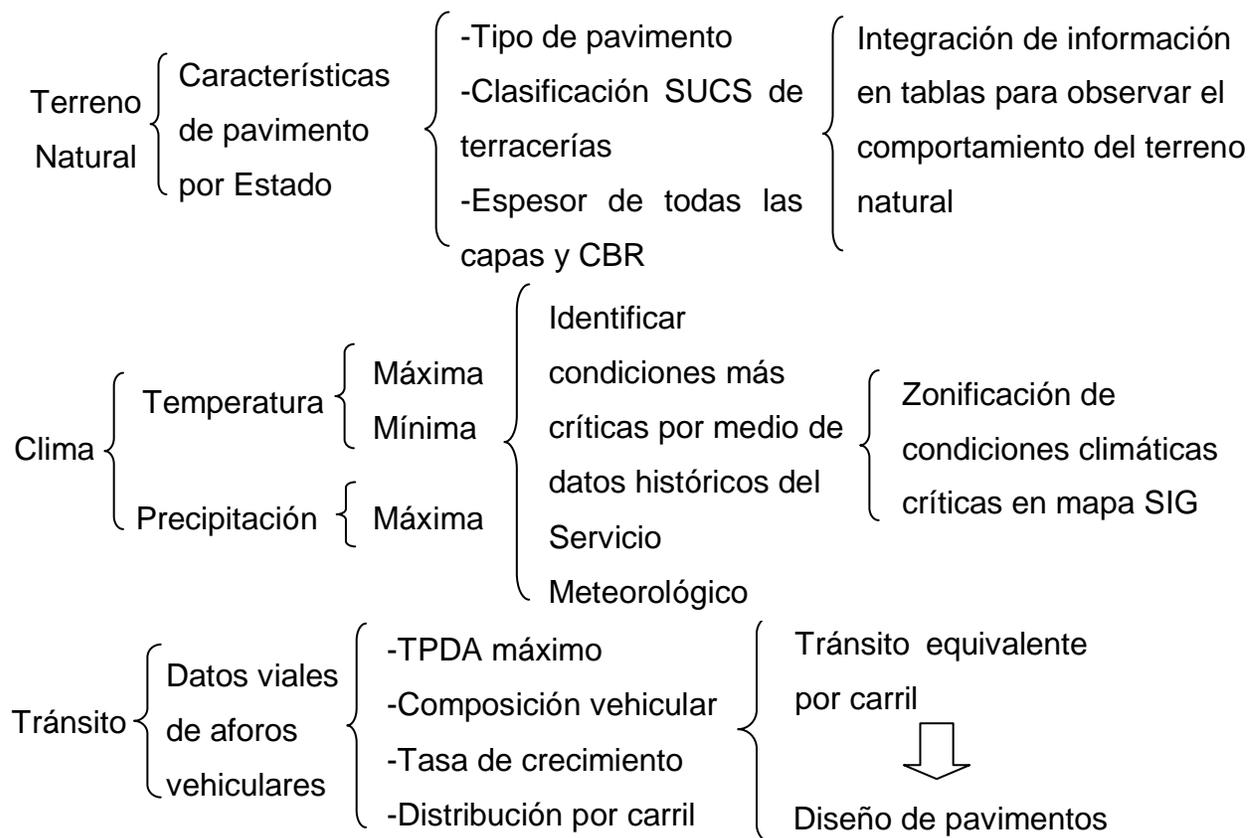


Figura III.1. Esquemas de adquisición y procesamiento de datos

III.1.1.1. Terreno Natural

El denominado terreno natural, es la capa de apoyo de las terracerías. Para realizar un proyecto adecuado deben considerarse numerosos aspectos relacionados con el diseño estructural, conservación, costos y criterios de decisión, siendo prioritario determinar las características mecánicas de los materiales que soportarán la estructura.

Como parámetro fundamental, según Zárate (2003), se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas de tránsito. Por lo general, se utiliza el parámetro conocido como Valor Relativo de Soporte (VRS o CBR) aunque actualmente algunos métodos emplean el Módulo de Resiliencia (M_R), siendo común, además, manejar correlaciones entre CBR (Valor de Soporte California) y M_R .

El material empleado para formar cada uno de los especímenes utilizados en las pruebas, debe obtenerse de diferentes sondeos en el tramo, para lo cual es necesario que la carretera esté bien zonificada.

La Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), proporcionó la información de los tramos carreteros principales y secundarios de cada entidad federativa (Anexo Digital 1), en total fueron 332 tramos carreteros.

Los tramos proporcionados sirvieron para identificar de manera aproximada el tipo de terreno existente en determinada zona, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), debido a que los datos recabados contaban con información granulométrica y plasticidad suficiente.

Con la clasificación SUCS, se infirió información relevante en el diseño de pavimentos. Lo anterior considerando la normativa de los requisitos de calidad que deben cumplir los materiales de las distintas capas de un pavimento flexible.

La información se procesó de la siguiente manera:

1. La información de cada estado se proceso en Excel, formando una tabla en la que además se numeró cada tramo carretero desde R001 hasta R332.
2. Cada segmento, que corresponde a los tramos de carretera que se tienen en Excel, se numeró en los archivos *shape* antes mencionados.

El resultado es el registro tabulado del terreno natural de los 332 tramos carreteros proporcionados por características SUCS.

III.1.1.2. Variables climáticas

En el diseño de estructuras de pavimento, el clima es el principal agente de alteración del suelo, así como de la fragmentación mecánica de determinados tipos de estratos. De acuerdo a los métodos de diseño previamente analizados, las condiciones climáticas más representativas en el diseño de pavimentos son la temperatura (máxima y mínima) y la precipitación máxima.

El considerar las condiciones más críticas dentro de cualquier proyecto, es la práctica recomendable para diseñar para las peores condiciones posibles. México cuenta con una gran diversidad de condiciones atmosféricas. Es por ello que se optó por examinar los registros del sitio oficial del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), y seleccionar la temperatura máxima y mínima diaria y precipitación máxima diaria de los últimos cinco años (2007 a 2011), de cada estación hidrométrica de la República Mexicana.

Debido a que se obtuvo una cantidad considerable de registros georeferenciados se optó por interpolar los valores para obtener isoyetas de la República Mexicana que indiquen el comportamiento de cada variable atmosférica demarcada en rangos. Para lo cual se usaron las técnicas Kriging y la de Inverso de Distancia Ponderado, con las que se realizó la interpolación de Temperatura y Precipitación, observando y comparando la correlación y el error medio calculado por ambas técnicas. Con lo anterior se determinó que técnica se ajusta mejor a los fenómenos planteados.

III.1.1.2.1. Temperatura

La temperatura atmosférica es uno de los elementos constitutivos del clima, que se refiere al grado de calor específico del aire en un lugar y momento determinados, así como la evolución temporal y espacial de dicho elemento en las distintas zonas climáticas.

Cada registro cuenta con sus coordenadas geográficas. El número de registros es de 992 para temperatura máxima y de 983 para temperatura mínima (Anexo digital 2).

Las coordenadas de los datos se ingresaron al ArcMap® para crear una capa de temperatura máxima y mínima, el procedimiento fue el siguiente:

1. Los registros de temperatura máxima diaria de los últimos cinco años de cada estación hidrométrica se ingresaron en una tabla de Excel. La información se guarda como libro de Excel (con la extensión xls). Dicho libro no debe tener campos en blanco ni columnas vacías.

2. En ArcMap® se inserta el archivo creado (xls), después en la opción *Display X Y Data*, se selecciona para el campo de las X la columna LONG y para Y la de LAT. Además se seleccionaron coordenadas del Sistema Geodésico Mundial (WGS) de 1984.

3. Después se convierten las tablas a *shape (Data – Export Data)*.

4. Posteriormente se interpoló con las técnicas (IDW y Kriging ordinario). La rutina fue la siguiente: *Geostatistical Analyst – Input Data Method* (se da de alta en extensiones y se verifica en *Tools – customize*). En el atributo se selecciona el *shape* creado (tmax). Para los datos cercanos, se selecciona que aplique la media. Se optimiza el valor de la potencia. Como resultado arroja una gráfica con recta de datos predichos contra datos medidos, también muestra una ecuación de regresión lineal. Al final muestra el resumen de datos.

5. A continuación se cortó a la medida de la República Mexicana el nuevo *shape* usando la rutina: *arctoolbox, analysis tools, extract by mask*. Se coloca el *shape* resultante de la interpolación en la primera opción y en la segunda se ingresa un *shape* con el contorno de la República Mexicana.

6. Para asignar valores a los rangos, se va a simbología – clasificados – crear histograma (si) – 5 clasificaciones -- *natural brakes*. (Esta asegura que en cada rango exista una misma cantidad de datos). La agrupación del rango de valores finales se ha realizado utilizando el método intervalos naturales o “*natural breaks*” (Jenks 1963). Este método de clasificación se encuentra implementado en el software ArcGis e identifica los puntos de corte entre clases mediante el algoritmo de optimización de Jenks. Esta fórmula consiste básicamente en la minimización de la suma de la varianza intraclase para obtener la máxima homogeneización (mínima dispersión) dentro de cada intervalo y la máxima dispersión entre intervalos. Los límites entre clases se establecen en donde hay

un salto relativamente importante entre los valores. Se ha considerado que es el método de clasificación más adecuado para la agrupación de los valores debido a su lógica de funcionamiento y a su capacidad de establecer intervalos con una clara representación espacial.

7. Finalmente, se da peso a cada rango en: *arc tool box – reclassiffy (3d)*; se selecciona la capa que se está trabajando y se asigna un peso a cada rango. Se coloca un número (de 1 a 5) en orden ascendente, considerando a 1 como la condición más favorable (rango de temperatura menor de las temperaturas máximas) y a 5 como la más desfavorable (rango de temperatura mayor de las temperaturas máximas).

Para la temperatura mínima se siguió exactamente el mismo procedimiento pero con los datos de temperatura mínima diaria de los últimos cinco años de cada estación hidrométrica, en este caso los pesos asignados se basaron en considerar a 1 como la condición más favorable (rango de temperatura mayor de las temperaturas mínimas) y a 5 como la más desfavorable (rango de temperatura menor de las temperaturas mínimas).

III.1.1.2.2. Precipitación pluvial

La precipitación es una parte importante del ciclo hidrológico, para su análisis se siguió el mismo proceso usado en la temperatura. Se basó en el registro de la precipitación máxima diaria de los últimos cinco años de cada estación hidrométrica, obteniendo un total de 774 registros (Anexo digital 2). Para este caso los pesos asignados se basaron en considerar a 1 como la condición más favorable (rango de precipitación menor de la precipitación máxima) y a 5 como la más desfavorable (rango de precipitación mayor de la precipitación máxima).

III.1.1.3. Tránsito

El tránsito constituye sin duda uno de los principales factores para el diseño. El conocimiento del volumen y tipos de vehículos que circulan en los tramos carreteros, permite determinar el grado de ocupación y las condiciones en que operan dichos tramos. El análisis de su evolución histórica es primordial para definir las tendencias de su crecimiento y planear con oportunidad las acciones que se necesitan, para evitar que algunos sub-tramos dejen de prestar el nivel de servicio que demanda el tránsito.

El TPDA previsto en el carril de proyecto influye, evidentemente, en la sección estructural del pavimento durante su vida útil. Por lo que es primordial determinar el tránsito de proyecto de un camino, expresado en ejes sencillos estándar de 8.2 toneladas de peso, a partir del tránsito mezclado diario promedio anual en el carril de proyecto (TPDA por carril), la composición del tránsito, las cargas por eje, el período de proyecto y la tasa de crecimiento anual.

Para conocer la magnitud, variación estacional y proyección futura de los volúmenes de tránsito durante los últimos cinco años, se tomó la información de aforos de tránsito de cada año de los Datos Viales que realiza y edita la SCT. Los aforos se efectuaron en las estaciones maestras, ubicada en cada sub-tramo previamente dados de alta en ArcMap® (332 tramos proporcionados por SCT). Para el análisis se consideró el tránsito mezclado en el carril de proyecto. Con estos datos se analizó el TPDA máximo de cada año, observando la composición vehicular.

III.1.1.3.1. Clasificación Vehicular

Con la clasificación vehicular, se realizó la conversión del volumen del tránsito a la acumulación de cargas a lo largo del período de análisis. Para esto, la

SCT (2008), en su Norma NOM-012-SCT-2-2008, presenta una clasificación de la composición vehicular, de acuerdo al peso (carga por eje) y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte (Anexo A), con la siguiente nomenclatura:

Tabla III.1. Clasificación vehicular del tránsito.

Vehículo	Nomenclatura
A	Automóvil y camioneta (pick up)
B	Autobús
C	Camión
T - S	Tracto camión con semi-remolque
T - S - R	Tracto camión con semi-remolque y remolque

Fuente: Valores de pesos y dimensiones aprobadas por la SCT (2008).

Cabe aclarar, que para cada una de las categorías que se presentan en la tabla anterior se consideraron subdivisiones. Estas subdivisiones están en función al número de ejes de cada vehículo o caso particular, es decir, para un camión de tres ejes se clasificó como “C3”.

III.1.1.3.2. Proyección del tránsito a futuro

Para el proyecto se realizó un estudio del pronóstico del tránsito vehicular que habrá en un futuro. Se requirió saber que hay en el presente para poder proyectar a futuro, esto dependiendo del comportamiento que presenten los tramos.

El pronóstico del volumen de tránsito futuro, por ejemplo el TPDA del año de proyecto, en la construcción de una nueva carretera o el mejoramiento de una carretera existente, se basó no solamente en los volúmenes normales actualmente, sino también en los incrementos del tránsito que se espera utilicen la nueva carretera o la existente.

Los volúmenes de tránsito futuro (TF), según Cal y Mayor y Cárdenas (2007), para efectos de proyecto se derivan a partir del tránsito actual (TA) y del incremento del tránsito (IT), esperado al final del período o año meta seleccionado.

En el desarrollo de la proyección de tránsito a futuro se buscó los aforos vehiculares de la DGST. Esta información se obtuvo de la página oficial de la DGST, donde se encuentran los datos viales desde el 2002 hasta la actualidad. Siguiendo con la misma analogía del clima, se decidió considerar los datos históricos correspondientes a los últimos cinco años.

III.1.1.3.3. Proyección a futuro, método de regresiones

Según menciona Cabrera y Hernández (2011), la proyección del tránsito se determina con un análisis estadístico a partir de datos históricos y técnicas de regresión. Una vez obtenida la ecuación que mejor se ajuste a los datos históricos, se realiza el pronóstico de los volúmenes de tránsito a lo largo del período de análisis, y se considera la tasa de crecimiento como un parámetro de la ecuación.

Ahora bien, para obtener una estimación de los volúmenes de tránsito futuro, sobre todo en carreteras, donde se cuenta con datos de las series históricas de los volúmenes de tránsito (TPDA), se utilizan regresiones lineales y curvilíneas, tipos línea recta, exponencial, potencial y logarítmica, con el fin de observar cual tiene mejor correlación.

Con base en lo anterior se procedió a calcular, para cada regresión matemática, un coeficiente de correlación, valores estimados de TPDA y con ellos una tasa de crecimiento para cada tipo de vehículo (Anexo digital 3).

Mientras mayor sea el coeficiente de correlación, mayor será la credibilidad de esa tasa de crecimiento. Por lo que, se seleccionó, para cada caso, la tasa de crecimiento que corresponde al mayor coeficiente de correlación de cada tipo de vehículo, de esta manera el análisis se apega más a la realidad.

III.1.1.3.4. Factor de crecimiento

El factor de crecimiento del tránsito vehicular, se traduce al ritmo con que éste aumentará durante el período de análisis del proyecto, para esto es necesario conocer la tendencia de distribución vehicular para de esta manera estimar el número acumulado de vehículos que circularán por el carril crítico de proyecto.

Con este factor de crecimiento y los años de diseño del pavimento, se obtuvo el tráfico de diseño o volumen de tránsito que se tendrá en un futuro.

III.1.1.3.5. Distribución del tránsito por carriles de circulación

Comúnmente, para el caso de autopistas, existe un carril por el cual circulan los vehículos más pesados (extrema derecha) y otro donde se dan mayor número de repeticiones (extrema izquierda). Por lo anterior, se debe conocer el carril que sufrirá el mayor daño, este carril se denomina carril de proyecto.

Corro (1999), menciona que en carreteras de dos carriles, el tránsito de proyecto se considera como la mitad del total que soportará la carretera.

En carreteras con más de dos carriles, debe estimarse la proporción de vehículos que soportará el carril de proyecto. Si no se cuenta con información confiable, pueden estimarse las siguientes distribuciones del tránsito total para dicho carril de proyecto:

Tabla III.2. Distribución del tránsito en el carril de proyecto.

Número de carriles en ambas direcciones	Coefficiente de distribución en el carril de proyecto, en por ciento.
2	50
4	40 - 50
6	30 - 40

Fuente: Método de diseño del Instituto de Ingeniería de la UNAM de Corro (1999).

El número de carriles de cada tramo carretero se tomó del Atlas de la Red Carretera de México de la SCT (2011).

III.1.1.3.6. Tránsito Equivalente en el Carril de Proyecto

Atendiendo a Cabrera y Hernández (2011), cuando se considera el tránsito para el diseño de pavimento, el espesor de este último se ve afectado por una carga de neumático sencillo. Si el pavimento está sujeto a múltiples neumáticos se deberá convertir a una carga de neumático sencillo equivalente (ESWL), de modo que el método de la AASHTO (1993), se basa en la aplicación de un neumático sencillo.

En el caso del método del Instituto de Ingeniería de la UNAM, para el análisis del tránsito equivalente acumulado (ΣL), el método considera el cálculo de los coeficientes de daño a diferentes profundidades de la estructura del pavimento, lo cual se procesa con el empleo de las tablas del Apéndice E del método de diseño original del Instituto de Ingeniería (Anexo B), reporte No. 444. En este mismo apéndice se puede consultar el peso con carga máxima y vacío, al igual que la presión de inflado de las llantas. En cuanto a la proporción de vehículos cargados y vacíos, Corro (1999), sugiere emplear una proporción, constante para todos los vehículos, entre 60 y 80% de vehículos cargados y el complemento al 100% de vehículos vacíos.

Al obtenerse los coeficientes de daño para todos y cada uno de los vehículos vacíos y cargados a las profundidades $Z = 0$ y $Z = 30$, se multiplicaron éstos por la composición del tránsito en porcentaje. Con ello se obtuvo el Número de ejes equivalentes para cada vehículo y para cada profundidad.

Al tener el tránsito equivalente, los VRS_z de las capas no estabilizadas, el módulo resiliente de la carpeta, y el nivel de confianza del proyecto, se determinan los espesores requeridos para cada capa de la sección estructural, empleando los modelos matemáticos desarrollados para este fin.

III.1.2. Integración de variables

El siguiente paso consistió en conjuntar los mapas resultantes de precipitación máxima, temperatura máxima y mínima en ArcMap[®] por medio del análisis multicriterio, con la herramienta *Spatial Analyst – Raster Calculator*. Con esta opción, se suman los pesos normalizados a la unidad asignados en cada mapa de clima. Los resultados podrán variar (numéricamente) desde 3 hasta 15, en donde el rango de 3 a 6 indica que las condiciones atmosféricas en cierta zona son favorables para la construcción de un pavimento; mientras que en lugares en donde el rango sea de 13 a 15 las condiciones climáticas serán extremas (desfavorables) como para pensarse en un desempeño adecuado de una estructura de pavimento a lo largo de toda su vida útil.

Bajo las condiciones anteriormente explicadas, el programa evaluó las tres variables, las conjuntó y arrojó como resultado un mapa, denominado “Zonificación de temperatura y precipitación para el óptimo desempeño de pavimentos en el territorio nacional”, en donde se observan sectores de la

República Mexicana con diferentes comportamientos esperados durante la vida útil de los pavimentos.

III.2. Extracción de muestras en campo

III.2.1. Análisis probabilístico del plan de muestreo

De los 332 tramos carreteros de la Red Federal proporcionados por la DGST, se buscó tomar unidades de muestreo representativas en la Republica Mexicana. A continuación se muestran algunos de los tramos principales y secundarios proporcionados, la tabla completa se puede observar en el Anexo C.

Tabla III.3. Tramos principales y secundarios de acuerdo a la DGST de cada entidad federativa.

RUTA	NOM_DGST	KMS	EDO
R001	CAMPECHE - MERIDA	159.00	CAMP
R002	CAMPECHE - UMAN	232.00	CAMP
R003	MUNA - FELIPE CARRILLO PUERTO	217.00	QROO
...
...
R330	SAN PEDRO - CABO SAN LUCAS	120.00	BCS
R331	LIB. SAN JOSE DEL CABO	120.20	BCS
R332	RAMAL A SAN CARLOS	14.00	BCS

Fuente DGST de cada Estado (2013).

Debido a la gran cantidad de kilómetros de carretera construidos en la Red Federal, se tomó una muestra representativa, distribuida a lo largo de la Republica Mexicana. Para determinar el tamaño de la muestra se realizó un análisis probabilístico de las carreteras del país basado en lo que propone Altman y Bland (1995). El análisis se ejecutó por medio del muestreo probabilístico conociendo el tamaño de la muestra, el cual se generó con la siguiente fórmula.

$$n = Z\alpha^2 \frac{N * p * q}{i^2(N - 1) + Z\alpha^2 * p * q}$$

Ecuación III.1. Tamaño de la muestra

Donde:

N = tamaño de la población

Z = nivel de confianza,

p = probabilidad de éxito, o proporción esperada

q = probabilidad de fracaso

i = precisión (Error máximo admisible en términos de proporción)

α = nivel de confianza $\pm Z_\alpha = 1.96$

El tamaño de la población, de las carreteras federales es de 48,792 kilómetros de longitud. El nivel de confianza usado para el estudio se obtuvo de la campana de Gauss, esta gráfica se muestra en la Figura III.2.

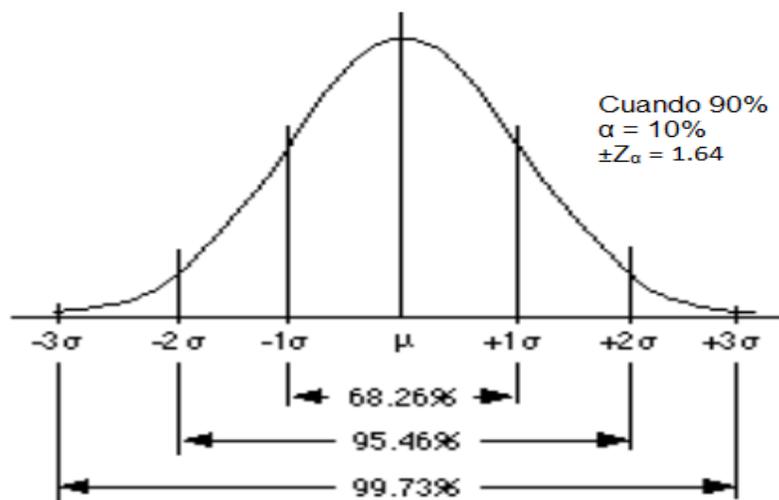


Figura III.2. Campana de Gauss, siendo α el nivel de desconfianza

Fuente: Distribución Estadística de Berenson, *et al.* (2006)

En cuanto a los valores 'p' y 'q' se obtuvieron siguiendo la distribución estadística de Bernoulli mencionada por Berenson, *et al.* (2006), en la cual la

sumatoria de intentos en donde se obtenga éxitos y fracasos para obtener el valor deseado va a resultar la unidad. De aquí podemos obtener la siguiente:

$$1 = p + q,$$

Ecuación III.2. Probabilidad de éxitos y fracasos en la campana de Gauss.

Donde,

$$p = 1/Z - 1,$$

Z = Nivel de confianza

Sustituyendo Z = 90%, se obtiene: p = 0.11. Si se sustituye p = 0.11, resulta: q = 0.89. Redondeando para fines prácticos, se usa p = 0.1 y q = 0.9 el cual al usarse en la formula (Ecuación III.1) se usará 'pq'. Para fines prácticos se obtuvo de la Tabla III.4.

Tabla III.4. Probabilidad de éxito (p) y de fracaso (q).

p	q	pq
0.01	0.99	0.0099
0.05	0.10	0.0048
0.10	0.90	0.0900
0.20	0.80	0.1600
0.30	0.70	0.2100
0.40	0.60	0.2400
0.50	0.50	0.2500

Fuente: Distribución Estadística de Berenson, *et al.* (2006).

Usando la fórmula de la Ecuación III.1 se obtuvo para la red carretera de 48,972 kilómetros: p = 10%; q = 90%; Nivel de confianza = 90% (Zα = 1.65); Error de muestreo i = 3%. Sustituyendo los valores en la fórmula, se obtuvieron 271 kilómetros a muestrear.

La distribución de estos kilómetros (Figura III.3), se eligió con la norma de criterios estadísticos de muestreo (M-CAL-1-02/01) mediante números aleatorios. El resultado fueron 88 tramos carreteros.



Figura III.3. Distribución de tramos de carretera muestreados.

Fuente: SCT y Viatest (2013).

La tabla de números aleatorios usada se muestra a continuación:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	220	127	133	93	221	110	236	111	4	913	256	257	296	51	12	177	66	303	301	191	126	126	201	319	79	85	115	112	191	310	163	178	54	46	180	218	241	317	172	300
2	70	113	147	122	170	166	177	3	16	299	31	236	72	120	143	21	134	99	73	249	236	209	10	232	297	64	8	63	97	87	284	230	152	43	125	189	266	278	248	58
3	291	228	332	95	150	78	27	125	169	18	68	109	170	313	189	211	297	321	288	30	39	263	200	226	179	259	51	232	296	45	9	0	234	119	277	54	308	14	242	96
4	34	271	247	300	220	253	51	249	266	76	191	171	155	135	88	181	313	218	184	131	250	143	239	171	19	83	18	47	35	252	70	51	320	189	124	229	200	205	22	195
5	78	124	233	312	218	255	125	311	161	196	268	128	44	30	49	2	193	174	218	160	152	7	49	152	126	38	246	164	193	55	0	48	221	261	312	328	291	249	298	101
6	175	331	2	267	136	317	29	306	280	272	184	44	7	96	330	243	297	46	0	30	234	177	176	3	67	12	270	115	122	138	116	43	145	47	67	109	265	131	1	290
7	38	70	6	60	10	69	303	250	4	287	187	156	112	23	176	147	252	231	40	328	210	47	44	54	299	134	139	197	179	60	81	71	126	1	316	146	314	206	129	18
8	27	277	270	224	71	310	316	143	298	322	214	274	250	251	266	275	112	327	306	135	93	196	228	179	215	326	84	123	318	204	313	89	120	131	84	194	300	208	32	188
9	264	251	51	258	63	190	242	16	316	226	199	286	280	45	23	203	231	302	262	216	211	329	140	152	15	107	128	245	69	195	21	123	116	11	9	213	327	167	171	147
10	63	282	234	83	227	299	261	148	326	16	139	311	93	254	234	90	172	131	16	105	160	45	196	4	46	330	313	33	325	148	285	127	182	236	221	259	31	241	143	326
11	42	97	14	324	98	184	307	267	325	25	128	2	236	98	237	53	332	261	91	132	185	296	24	173	83	112	91	94	141	159	327	289	255	54	113	43	297	206	134	294
12	230	58	38	176	17	166	16	323	169	300	147	94	57	290	276	202	118	85	276	289	55	318	109	285	198	280	72	14	229	223	85	51	202	102	254	56	255	70	310	237
13	147	332	246	47	294	264	225	270	215	280	123	33	296	176	65	311	279	42	85	36	123	169	154	47	314	112	130	32	312	1	28	203	123	77	136	50	126	111	282	44
14	128	235	226	163	155	259	171	175	86	48	306	151	314	245	4	82	136	184	114	66	121	330	313	206	253	146	166	315	64	206	258	183	257	314	98	49	46	248	104	256
15	288	241	163	321	76	161	201	36	49	56	203	200	130	98	7	293	7	52	289	303	221	203	58	35	255	321	132	152	224	228	231	274	110	202	236	167	34	194	0	225
16	264	45	195	114	44	12	120	185	81	4	253	10	129	136	64	147	193	134	189	168	76	321	257	33	158	138	242	123	86	28	58	81	13	213	72	253	239	115	172	79
17	124	216	48	22	211	137	49	277	129	271	94	172	234	254	293	23	242	153	123	176	171	273	77	143	135	236	22	157	21	88	222	139	42	267	251	181	11	319	305	24
18	76	224	282	261	38	46	308	329	226	126	190	67	206	174	0	131	192	65	36	184	58	39	111	70	113	201	65	268	159	332	194	142	100	53	188	281	148	283	31	236
19	196	32	248	299	225	275	234	226	191	297	172	208	186	172	130	167	67	264	231	223	271	281	287	226	282	92	135	264	282	264	247	259	280	64	97	52	153	312	23	56
20	53	243	144	69	22	223	299	101	249	217	138	242	257	315	54	32	9	251	100	325	134	294	318	146	100	239	194	119	273	130	246	25	228	321	66	116	113	198	58	305
21	98	110	308	326	275	179	104	299	297	238	205	226	154	13	105	63	259	216	188	328	36	18	324	198	127	125	99	54	167	64	117	164	91	171	73	159	274	102	36	73
22	277	45	21	177	244	138	93	99	29	47	14	331	98	121	88	13	253	117	294	332	231	78	101	23	0	165	128	207	118	330	118	63	220	237	141	50	294	193	103	116
23	94	64	152	221	165	205	182	56	208	302	225	77	236	220	293	297	174	303	327	51	39	78	218	15	318	282	93	113	11	319	303	303	121	314	217	33	200	321	61	329
24	214	289	81	131	285	329	181	287	90	259	121	188	330	330	298	38	248	324	84	252	278	207	38	61	75	54	203	171	47	89	67	72	77	75	179	76	270	167	230	303
25	133	117	64	40	242	278	275	313	3	22	264	231	285	51	45	195	167	322	295	132	43	286	113	43	17	129	23	101	41	213	206	2	134	231	298	228	135	66	332	220

Figura III.4. Números aleatorios para determinar las rutas a muestrear.

Fuente: Elaboración Propia (2013).

De acuerdo a lo que indica la norma se determinó el inicio de los tramos por medio de urnas, el resultado fue iniciar en la columna 8 y en el renglón 2. En la Tabla III.5 se enlistan algunos de los tramos muestreados, identificados con un ID, referente al orden en que fueron seleccionados, este ID sirvió para determinar con la tabla de números aleatorios compuesta (Figura III.5), de la misma norma, el kilómetro de arranque para realizar las extracciones. El resto de la tabla se muestra en el Anexo D.

Tabla III.5. Tramos carreteros muestreados.

ID	Código	RUTA	TRAMO	KMS	KM	ESTADO
1	R003	MEX-184	MUNA - FELIPE CARRILLO PUERTO	217.00	3	QUINTANA ROO
2	R125	MEX-190	OAXACA - TEHUANTEPEC	251.00	3	OAXACA
3	R249	MEX-180	SOTO LA MARINA - LA COMA	232.50	3	TAMAULIPAS
...
...
86	R147	MEX-045	IRAPUATO - LEON	170.00	3	GUANAJUATO
87	R123	MEX-190	HUAJUAPAN DE LEON - OAXACA	181.00	3	OAXACA
88	R306	MEX-002	SANTA ANA - SONOITA	252.00	3	SONORA

Fuente: SCT y Viatest (2013).

La designación del kilómetro inicial de las extracciones se realizó con la tabla de números aleatoria compuesta (Figura III.5), extrayendo un número de la urna, el resultado fue 6, por lo que se comenzó de dicha columna a seleccionar los coeficientes de A. Este coeficiente, se multiplicó por la distancia total de cada carretera y de esta manera se determinó la ubicación longitudinal de cada extracción.

Las extracciones a lo ancho del camino se distribuyeron a criterio del personal de laboratorio, en general tratando de realizar una extracción al centro y una en cada hombro.

Columna 01		Columna 02		Columna 03		Columna 04		Columna 05		Columna 06		Columna 07		Columna 08		Columna 09		Columna 10	
N	A	N	A	N	A	N	A	N	A	N	A	N	A	N	A	N	A	N	A
21	0.175	17	0.491	18	0.427	30	0.590	20	0.999	14	0.033	14	0.082	20	0.053	17	0.668	15	0.049
10	0.611	5	0.036	24	0.924	21	0.992	12	0.796	26	0.044	11	0.102	8	0.058	26	0.229	21	0.740
30	0.932	18	0.476	14	0.731	10	0.919	22	0.979	20	0.057	6	0.105	28	0.079	24	0.909	30	0.982
25	0.336	28	0.013	10	0.310	29	0.524	18	0.016	9	0.083	1	0.148	14	0.107	7	0.307	23	0.163
29	0.854	6	0.114	28	0.056	20	0.410	3	0.690	21	0.124	13	0.206	17	0.189	28	0.511	24	0.161
18	0.864	26	0.609	19	0.844	1	0.559	13	0.120	24	0.151	7	0.279	24	0.189	3	0.873	8	0.852
24	0.841	2	0.927	1	0.551	24	0.767	29	0.011	13	0.153	17	0.310	4	0.197	29	0.621	19	0.816
14	0.008	4	0.016	13	0.842	6	0.832	16	0.419	23	0.154	5	0.373	15	0.227	6	0.390	11	0.210
1	0.482	3	0.594	30	0.652	2	0.256	28	0.707	30	0.249	19	0.424	13	0.313	11	0.193	29	0.246
6	0.362	7	0.243	22	0.723	14	0.373	11	0.875	10	0.341	18	0.468	11	0.335	15	0.054	16	0.162
26	0.803	30	0.841	5	0.278	5	0.028	2	0.209	12	0.375	12	0.476	23	0.354	22	0.391	17	0.868
23	0.313	21	0.922	8	0.376	9	0.997	24	0.071	11	0.413	3	0.503	22	0.478	14	0.790	6	0.827
11	0.755	11	0.615	2	0.173	13	0.030	14	0.392	6	0.461	26	0.558	29	0.481	13	0.078	7	0.857
7	0.991	15	0.787	6	0.864	26	0.043	15	0.810	8	0.608	2	0.569	3	0.484	21	0.156	2	0.637
13	0.249	29	0.724	15	0.437	25	0.277	19	0.493	17	0.619	27	0.593	6	0.559	12	0.676	13	0.109
20	0.716	14	0.087	25	0.332	17	0.340	9	0.137	28	0.650	24	0.654	5	0.559	30	0.262	25	0.478
3	0.856	19	0.353	27	0.577	4	0.244	6	0.864	3	0.658	9	0.660	25	0.611	1	0.083	1	0.403
27	0.119	27	0.248	9	0.628	23	0.403	27	0.846	18	0.682	22	0.710	21	0.622	18	0.047	18	0.422
12	0.084	9	0.647	21	0.172	15	0.595	10	0.802	2	0.705	8	0.781	27	0.624	5	0.867	20	0.647
8	0.180	13	0.354	17	0.874	28	0.480	23	0.321	22	0.705	30	0.791	19	0.721	23	0.800	27	0.010
17	0.913	8	0.479	23	0.274	11	0.480	30	0.860	5	0.726	20	0.845	18	0.721	8	0.595	22	0.717
16	0.003	10	0.117	11	0.007	3	0.555	21	0.271	27	0.733	16	0.855	9	0.747	2	0.039	12	0.414
2	0.194	20	0.355	7	0.210	27	0.535	26	0.688	7	0.831	23	0.857	30	0.758	10	0.772	4	0.800
19	0.885	23	0.356	26	0.456	7	0.615	4	0.622	16	0.868	29	0.873	2	0.771	25	0.394	9	0.620
4	0.615	12	0.599	3	0.638	16	0.354	7	0.036	1	0.885	21	0.890	1	0.785	16	0.909	10	0.677
22	0.748	24	0.436	20	0.466	18	0.160	5	0.332	19	0.925	10	0.907	12	0.803	19	0.014	5	0.546
15	0.674	16	0.947	12	0.654	19	0.383	17	0.148	29	0.926	15	0.924	26	0.818	27	0.984	14	0.660
9	0.788	1	0.764	4	0.774	8	0.191	1	0.113	15	0.938	25	0.929	10	0.833	4	0.715	28	0.895
28	0.455	22	0.545	29	0.563	12	0.834	25	0.272	4	0.967	4	0.981	7	0.926	9	0.607	26	0.554
5	0.568	25	0.214	16	0.747	22	0.697	8	0.049	25	0.977	28	1.216	16	3.396	20	0.019	3	0.613

Figura III.5. Tabla de números aleatoria compuesta.

Fuente: Elaboración Propia (2013).

III.2.2. Obtención de muestreos

En cada uno de los tramos previamente enlistados, se extrajeron tres núcleos de la carpeta asfáltica por kilómetro asignado, excepto los tramos de Chihuahua, en este caso se extrajeron 4 kilómetros debido al tamaño del estado (Figura III.6) con un diámetro de 4" (10cm).

Para los materiales granulares se realizó un Pozo a Cielo Abierto (PCA) en cada uno de los 88 tramos carreteros, en los cuales se extrajo material de las

capas inferiores, con el fin de conocer sus propiedades físicas y mecánicas. En cada PCA se registraron los espesores de las capas granulares (Figura III.7, Figura III.8), y posteriormente se evaluó la capacidad estructural actual de cada tramo carretero.



Figura III.6. Núcleo de carpeta asfáltica con un espesor de 5.5 cm

Al igual que en la extracción de núcleos, el hueco se rellenó con mezcla asfáltica fría.



Figura III.7. Medición de espesor de la base



Figura III.8. Medición de espesor de la subbase

III.3. Ensayo de materiales en laboratorio

III.3.1. Pruebas a carpeta asfáltica

Todo el material extraído en campo se envió a laboratorio, en donde, para efectos de poder evaluarlo y conocer sus características mecánicas, fue necesario preparar las muestras a un espesor adecuado para poderlas ensayar. Cada núcleo se clasificó por ruta y kilómetro (Figura III.9).

Ya con los núcleos de concreto asfáltico preparados se determinó su Módulo Resiliente (M_R), el cual se obtiene mediante la prueba de tensión indirecta siguiendo la norma ASTM D4123-95. La prueba de Tensión Indirecta se realiza mediante la aplicación de cargas en la parte lateral del espécimen, así como se muestra en la Figura III.10.



Figura III.9. Preparación de pastillas de mezcla asfáltica previo al ensayo

Las cargas se registraron por medio de sensores LVDT y mediante la deformación generada se calculó el módulo resiliente. Cuando se tiene mayor deformación en el espécimen, la rigidez es menor, por lo que su M_R también disminuye y viceversa.

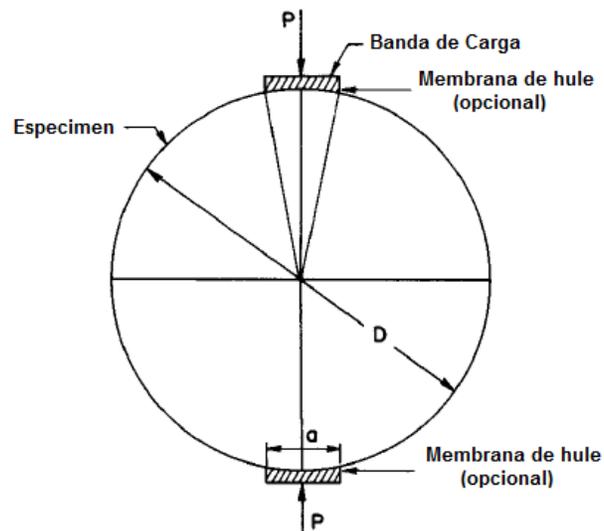


Figura III.10. Representación de las cargas aplicadas en la prueba de tensión indirecta

Las cargas aplicadas representan el tránsito que actúa sobre el pavimento, simulando las cargas dinámicas del mismo.

Cada núcleo de mezcla asfáltica se evaluó como se muestra en la siguiente figura, obteniendo así el módulo resiliente.

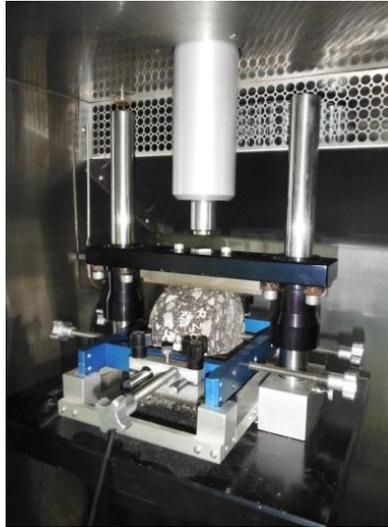


Figura III.11. Prueba de tensión indirecta en pastillas de mezcla asfáltica

Para conocer el M_R de cada tramo carretero, se emplearon cartas de control de medias (Anexo digital 4), siguiendo la norma M-CAL-1-03/03.

El resultado final se obtuvo ponderando los valores (Tabla III.6) ubicados entre los límites estadísticos (Figura III.12).

Los resultados obtenidos de cada tramo se evaluaron en conjunto (con cartas de control) para determinar los valores típicos esperados, por lo que se usó el Límite Superior Estadístico ($39,000 \text{ kg/cm}^2$) y la media ($25,000 \text{ kg/cm}^2$) de dicha carta de control, la cual se observa en el anexo digital 4.

Tabla III.6. Ejemplo de Obtención de M_R en concreto asfáltico.

Carretera		MEX-057				
Tramo		SAN LUIS POTOSI - MATEHUALA				
km		10+000 - 12+000				
		\varnothing (mm)	Espesor (mm)	M_R (MPa)		
1	R184_KM10A	91.99	79.40	2543	2543	
2	R184_KM10B	93.58	35.43	2334	2334	
3	R184_KM10C	93.77	54.96	2893		
4	R184_KM11A	93.11	45.86	1993		
5	R184_KM11B	93.06	45.39	2788		
6	R184_KM11C	92.92	56.87	2634		
7	R184_KM12C	92.02	53.95	2433	2433	
8	R184_KM12B	94.11	49.88	2223		
9	R184_KM12A	93.28	78.20	2189		
				$M_R =$	2437	MPa

Fuente: Elaboración Propia (2013).

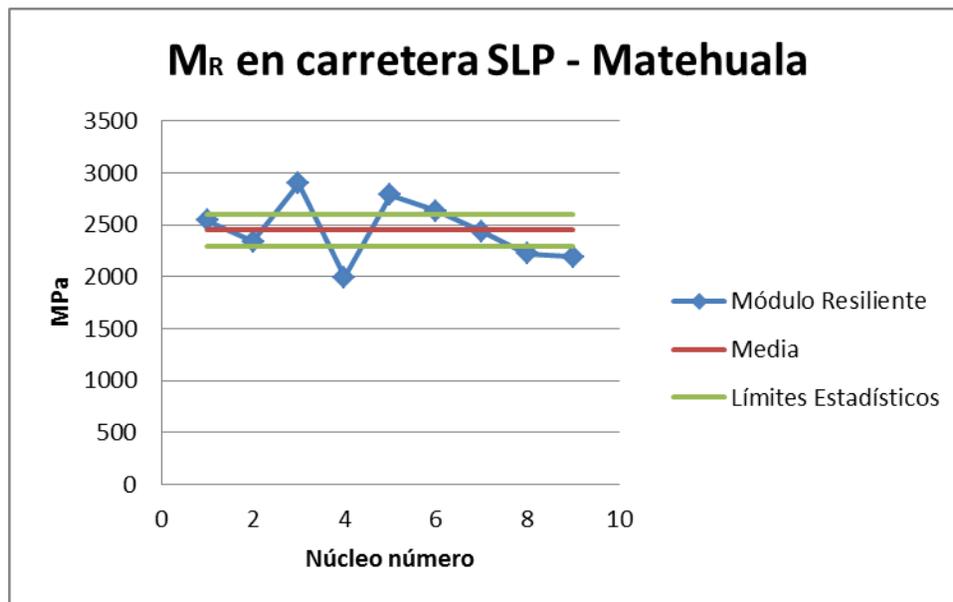


Figura III.12. Carta de control de medias del tramo analizado.

Fuente: Elaboración Propia (2013).

III.3.2. Pruebas a materiales granulares

Para las capas granulares de los pavimentos como lo son las bases, subbases y subrasantes se requirió conocer sus características físicas y mecánicas. Los resultados se muestran en el anexo digital 5.

El material extraído de los pozos a cielo abierto realizados en los distintos tramos carreteros, se envió a cinco laboratorios diferentes. Para conocer las características físicas se realizaron las siguientes pruebas: contenido de agua (Figura III.13), de acuerdo a la norma M-MMP-1-04/03; equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas (Figura III.14), con la norma M-MMP-4-04-004/02; límites de consistencia según la norma M-MMP-1-07/07; granulometría de materiales compactables para terracerías (Figura III.15) bajo la norma M-MMP-1-06/03.

Para la determinación de las características mecánicas, se realizaron otras pruebas para determinar sus propiedades de resistencia como es el CBR (California Bearing Ratio) siguiendo la norma M-MMP-1-11/13 además de la prueba triaxial para determinar el Módulo Resiliente (M_R) al aplicar cargas dinámicas a los materiales, con la norma AASHTO T 307-99.



Figura III.13. Determinación del contenido de humedad de las muestras

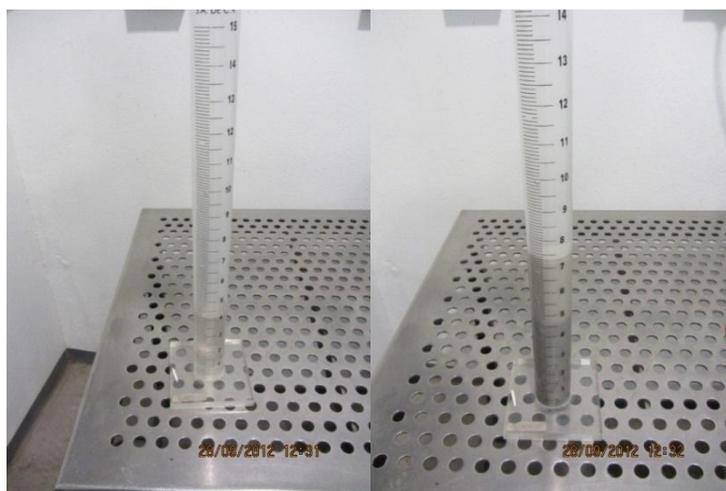


Figura III.14. Determinación del equivalente de arena de las muestras



Figura III.15. Tamices para la obtención de composición granulométrica

El CBR, es un índice de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante en condiciones controladas de compactación y humedad, y se expresa como porcentaje de la carga necesaria para introducir un pistón de sección circular en una muestra de suelo, respecto a la requerida para que el mismo pistón penetre a la misma profundidad de una muestra tipo de roca caliza triturada de California.



Figura III.16. Prueba para obtener el Valor de Soporte California (CBR)

El módulo resiliente es un parámetro que se utiliza para comprobar la resistencia de los suelos ante cargas dinámicas. Este valor da una idea de la calidad de la capa y de la durabilidad, ya que se obtiene al aplicar cargas cíclicas lo cual origina un estado de tensión similar al que el material experimenta en campo con las cargas de tránsito.

Para la obtención del módulo resiliente en los suelos, a diferencia de la mezcla asfáltica, se aplica la prueba triaxial. Siguiendo la analogía de la resiliencia de un material dado, se aplican cargas dinámicas buscando que el material trabaje en su elasticidad, este se aprecia en la Figura III.17.

Al final de la prueba el resultado es el módulo resiliente. En cuanto a las características mecánicas del terreno natural, se observaron diferencias marcadas en distintas zonas, por lo que se tomaron cinco valores (regiones) de CBR. Al ensayar las muestras de Terreno Natural, los resultados arrojaron distintos valores de M_R . Estos resultados se dividieron en regiones, desde una región Muy favorable hasta una Muy desfavorable para resistir las cargas de tránsito a las que será expuesta (fatiga y deformación).



Figura III.17. Muestra de suelo en la cámara triaxial

Los materiales granulares fueron ensayados en cinco laboratorios diferentes, por lo que los datos obtenidos se recabaron de los reportes que dichos laboratorios entregaron.

III.4. Diseño de estructuras de pavimento con programa DISPAV-5

Zárate (2003) menciona que el diseño de los pavimentos se tiene que efectuar con base en las propiedades fundamentales de los materiales, y tomando en cuenta el comportamiento a largo plazo, envejecimiento y fatiga, a partir de modelos matemáticos y herramientas de cálculo más avanzados, que consideren, el comportamiento reológico de los materiales. Por lo que, para realizar un diseño adecuado se conjuntaron todos los datos requeridos para efectuar el correcto análisis, por lo que la integración de toda la información necesaria para cada tramo carretero por analizar, fue un paso muy importante para la obtención de resultados confiables.

Debido a la gran cantidad de datos obtenidos en los distintos ensayos de laboratorio, se consideró adecuado encasillar los valores en rangos, los cuales son hasta cierto punto aceptables debido al comportamiento típico observado.

Estos rangos de valores, permitieron diseñar el catálogo de secciones por medio del método del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se realizó la revisión y el cálculo de las estructuras de pavimento mediante el programa DISPAV-5, versión 2.

En todos los casos se cuidó que los CBR de las capas cumplieran con el valor mínimo establecido en las normas mexicanas de calidad de materiales para la construcción de pavimentos, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2010).

En cuanto a los vehículos que transitarán por las carreteras; se realizó lo comentado por Cal y Mayor y Cárdenas (2007), en donde se evaluó el crecimiento en de cada carretera seleccionada para un período de proyecto de 20 años (tasa de crecimiento); con lo que se determinó los millones de ejes equivalentes (ESAL's) que circularán al finalizar dicho período de proyecto por cada carretera.

Una vez calculados los ESAL's de cada tramo carretero, se ordenaron de mayor a menor y se dividieron dichos datos en 5 categorías de tránsito, tomando el límite superior de cada grupo como el límite a evaluar en cada categoría.

III.5. Análisis comparativo de secciones con AASHTO 2002

En este apartado se realizó el diseño de algunas secciones estructurales de pavimentos asfálticos para la República Mexicana con el método AASHTO

2002, considerando la información integrada en el mapa de zonificación, y se compararon los resultados con los obtenidos con el programa DISPAV-5.

Además de los datos extraídos del mapa de zonificación, se integró la información de cada tramo carretero para obtener resultados con criterios similares a los usados en el DISPAV-5. El número de variables que tienen injerencia en el resultado en el método AASHTO 2002 es mucho mayor que las consideradas en el DISPAV-5. De hecho, con la información que se tiene actualmente, no es posible definir con precisión todas las variables del método. El programa de cómputo del método AASHTO 2002 usado en esta investigación es una versión de prueba previa a la versión definitiva (DARWin ME).

III.5.1. Comparativo de estructuras de pavimento

Se decidió efectuar el comparativo en 12 tramos carreteros. Dicho comparativo consistió en observar la respuesta en tres diseños para cada tramo. Los dos primeros diseños se evaluaron con el programa DISPAV-5, en el primero se observó la respuesta de la estructura actual bajo las cargas del tránsito y en el segundo se dio una alternativa óptima para esas condiciones. El tercer y último diseño consistió en evaluar la estructura bajo el método AASHTO 2002, con la finalidad de observar diferencias con el segundo diseño.

Para la selección de los tramos se buscó una distribución geográfica a lo largo de la República Mexicana. Lo anterior, con la intención de observar la respuesta de la estructura de pavimento bajo la combinación de diferentes condiciones climáticas y niveles de tránsito. Los datos mostrados a continuación son los usados en cada tramo carretero.

Tabla III.7. Datos de cada tramo carretero considerados para el análisis de cada sección estructural.

Clave	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
No. Carriles	2	2	2	2	4	2	2	2	2	2	4	4	
TPDA	1205	3834	4052	4120	7764	11557	11737	12312	12359	14415	19052	19101	
Tasa de crecimiento	1.00%	1.50%	1.57%	3.26%	2.99%	1.99%	3.01%	2.01%	1.49%	2.50%	3.01%	2.49%	
Vehículos de carga	A2	89.7%	88.0%	85.4%	59.8%	77.9%	93.2%	71.4%	60.9%	84.6%	68.9%	72.4%	80.9%
	B3	2.5%	1.0%	0.1%	10.6%	5.2%	0.8%	2.6%	2.3%	4.2%	6.6%	5.9%	4.4%
	C2	4.3%	3.4%	5.3%	3.8%	6.3%	4.9%	7.2%	3.9%	5.5%	7.8%	6.2%	5.8%
	C3	1.3%	1.3%	2.8%	3.4%	3.5%	0.6%	5.7%	4.4%	1.2%	4.1%	3.0%	1.8%
	T3-S2	0.7%	4.3%	3.4%	12.4%	2.4%	0.2%	7.9%	21.8%	2.5%	8.2%	7.4%	3.2%
	T3-S3	0.8%	0.9%	1.3%	3.3%	1.0%	0.2%	4.1%	3.0%	1.6%	2.9%	2.5%	2.9%
	T3-S2-R4	0.7%	0.5%	1.7%	6.7%	3.7%	0.1%	1.1%	3.7%	0.4%	1.5%	2.6%	1.0%
Coef. Distribución	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	

Fuente: Elaboración Propia (2013).

En la Tabla III.8, se observa el tránsito de diseño calculado para cada tramo. A partir de 40 millones de ejes equivalentes los pavimentos fueron evaluados como caminos de altas especificaciones con un nivel de confianza del 95%; para el resto se consideraron como caminos normales y un nivel de confianza del 85%.

Es de hacer notar que el programa DISPAV-5 evalúa la estructura de pavimento a deformación y fatiga, los valores límite para cada parámetro son función del tipo de carretera considerada (carreteras normales o de altas especificaciones).

El método AASHTO 2002 considera un porcentaje del 25 % como la intensidad de agrietamiento máxima en la superficie del pavimento (AC Bottom Up Cracking) como límite de falla y para deformación (Permanent Deformation – Total

Pavment) un máximo de 2.5 cm (1.00 in) en carreteras normales y 1.2 cm (0.47 in) en carreteras de altas especificaciones. Con lo anterior, se buscó hacer un símil en las condiciones evaluadas con DISPAV-5. Adicionalmente se evaluó el Índice de Regularidad Internacional (IRI), con un valor límite superior de 2.85 m/km (63.3 in/mi).

Tabla III.8. ESAL's proyectados en los distintos tramos carreteros analizados.

Tramo Carretero	Tránsito de diseño (millones ESAL's)	
	Fatiga (z=0)	Deformación (Z=30)
1	2.9	2.8
2	12.6	11.5
3	17.6	16.5
4	65.5	53.5
5	56.8	51.3
6	14.9	19
7	108.1	96.6
8	175.6	143.8
9	47.6	45.7
10	135.1	120.9
11	177.6	155.6
12	108.5	105.9

Fuente: Elaboración Propia (2013).

En la parte climática, el programa DISPAV-5, no considera la inclusión de datos que determinen algún espesor con base en la respuesta a diferentes condiciones. Por el contrario, en el método AASHTO 2002, sí es requerida información detallada de las estaciones climatológicas cercanas al sitio del proyecto en un formato especial. Dado que en México no se cuenta con la información de clima con ese nivel de detalle, se optó por correlacionar información de estaciones climatológicas de Estados Unidos de sitios donde las condiciones climáticas fueran semejantes a cada uno de los 12 tramos en estudio.

Para lo anterior, fue necesario cotejar los registros de las estaciones hidrométricas de Estados Unidos contra los registros de las estaciones mexicanas similares a los tramos carreteros seleccionados.

La información de las estaciones hidrométricas de Estados Unidos se obtuvo de la página oficial de la Organización Meteorológica Mundial. Es importante señalar que con los datos de clima considerados se pretenden simular las condiciones climáticas de México.

La Tabla III.9, muestra un listado con el nombre de tramo, los kilómetros muestreados, TPDA y la región, en donde se ubica cada tramo carretero para el posterior análisis de estructuras, así como la estación climática considerada con registro similar para el análisis con el programa AASHTO 2002.

El programa AASHTO 2002, al ser un método empírico-mecanicista requiere un mayor número de datos de entrada, uno de ellos es la definición de las características de materiales para la estructura (por ejemplo: el tipo de asfalto). Por lo que en la mezcla asfáltica se optó por considerar un AC-20 para módulos comprendidos entre 20,000 y 30,000 kg/cm². Para módulos inferiores se consideró un AC-10 y para mayores el AC-30. Otros datos adicionales requeridos por el programa es el volumen de vacíos (5%), densidad (2.37 t/m³ o 148 pcf), contenido de asfalto (6%) y módulo de Poisson (0.35 para las capas con asfalto, 0.10 para las bases estabilizadas con cemento y 0.50 para las granulares).

También se necesitó la granulometría de las carpetas asfálticas, la cual se obtuvo por medio del programa MODULO-5, utilizando el modelo de Witzack, en el cual se requirió ingresar el tipo de asfalto y el módulo resiliente. Las características consideradas para las mezclas asfálticas se muestran en Tabla III.10.

En cuanto a las características físicas y mecánicas de las capas granulares, se ingresaron los datos obtenidos en laboratorio tales como granulometría y módulo resiliente (obtenido en la prueba triaxial).

Tabla III.9. Tramos carreteros analizados.

Clave	Ruta	Tramo	TPDA	Kilómetros	Región	Estación	Estado
1	MEX-188	Haltunchen – San Antonio Cayal	1205	8+000 - 10+000	mA	Key West, Florida	Campeche
2	MEX-180	Soto la Marina – La Coma	3834	210+000 - 212+000	M	Mobile, Alabama	Tamaulipas
3	MEX-017	Moctezuma – Agua Prieta	4052	145+000 - 147+000	B	Grand Junction, Colorado	Sonora
4	MEX-040D	Durango – Gómez Palacio	4120	189+000 - 191+000	mB	Grand Junction, Colorado	Durango
5	MEX-180	Mérida – Puerto Juárez	7764	304+000 - 306+000	M	Key West, Florida	Quintana Roo
6	MEX-190	Tuxtla Gutiérrez – Cd. Cuauhtémoc	11557	169+000 - 171+000	mB	Columbia, Carolina del Sur	Chiapas
7	MEX-070-080	San Luis Potosí – Lagos de Moreno	11737	114+000 - 116+000	B	Burlington, Vermont	Jalisco
8	MEX-002	Santa Ana - Sonoyta	12312	20+000 - 22+000	M	Sacramento, California	Sonora
9	MEX-120	Quiroga - Tapalcatepec	12359	209+000 - 211+000	A	San Juan, Puerto Rico	Michoacán
10	MEX-015	Tepic - Mazatlán	14415	139+000 - 141+000	mA	San Juan, Puerto Rico	Nayarit
11	MEX-040	Saltillo - Torreón	19052	160+000 - 162+000	B	Brownsville, Texas	Coahuila
12	MEX-119	Puebla - Tlaxcala	19101	26+000 - 28+000	mB	Burlington, Vermont	Tlaxcala

Fuente: Elaboración Propia (2013).

Nomenclatura de la zonificación: mA = Muy Alta, A = Alta, M = Media, B=Baja, mB = Muy Baja

Para los diseños dos (DISPAV-5) y tres (AASHTO 2002) se trató de seguir, en la medida de lo posible, la composición estratigráfica real del sitio (sobre

todo en las capas inferiores). Lo anterior para observar si existía alguna diferencia entre espesores de las capas superiores, partiendo de un mismo soporte.

Tabla III.10. Datos usados en la carpeta asfáltica.

Tramo	M _R (MPa)	Asfalto	Granulometría (% retenido)		
			malla ¾"	malla 3/8"	malla # 4
1	2560	AC-20	0%	38%	30%
2	2897	AC-20	0%	30%	27%
3	1980	AC-10	0%	49%	31%
4	2326	AC-20	0%	40%	24%
5	3004	AC-30	0%	28%	27%
6	2302	AC-20	0%	40%	23%
7	3053	AC-30	0%	28%	29%
8	3358	AC-30	0%	20%	27%
9	3110	AC-30	0%	28%	31%
10	2208	AC-20	0%	41%	21%
11	2220	AC-20	0%	41%	22%
12	1269	AC-10	0%	62%	25%

Fuente: Elaboración Propia (2013).

En tramos donde se manifestó una escasa respuesta en la parte de fatiga, se implementó el uso de una capa de base estabilizada, con el objeto de cubrir dicha deficiencia. Para tal efecto se contó con dos opciones: base estabilizada con asfalto (BEA) y base estabilizada con cemento (BEC).

Las BEA se forman con material de calidad de base al cual se le incorpora en forma de emulsión de tres a cuatro por ciento en masa de cemento asfáltico para mejorar su comportamiento mecánico y disminuir el efecto de plasticidad; mientras que a las BEC, se les incorpora de seis a diez por ciento en masa de cemento portland en forma de lechada para obtener una resistencia a la compresión simple a los siete días de edad e incrementar su rigidez, reduciendo así el efecto de la fatiga sobre la carpeta. Su resistencia a compresión simple no debe ser menor de 2,5 MPa (25 kg/cm²).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se muestran los resultados obtenidos en la experimentación.

IV.1. Proceso de información

IV.1.1. Adquisición de variables

IV.1.1.1. Terreno Natural

Los valores tabulados del terreno natural y algunas otras capas de los 332 tramos proporcionados por la Dirección General de Servicios Técnicos de cada entidad federativa se encuentran en el anexo digital 1.

IV.1.1.2. Variables climáticas

Del comparativo entre las técnicas Kriging Ordinario e IDW se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla IV.1. Resultados de técnica IDW y Kriging.

		Técnica			
		IDW		Kriging	
		Correlación	Incertidumbre	Correlación	Incertidumbre
Variables	Temperatura Máxima Diaria	65.72%	0.0040 ° C	64.52%	0.0119 ° C
	Temperatura Mínima Diaria	63.80%	0.0755 ° C	58.30%	0.0214 ° C
	Precipitación Máxima Diaria	52.56%	0.8477 mm	51.86%	1.067 mm

Fuente: Elaboración Propia (2013).

En general se aprecia un mejor ajuste (mientras más alta sea la correlación, el modelo mejor explica el fenómeno) y un menor error medio en la técnica IDW, por lo que esta técnica se ajusta mejor a las variables atmosféricas por modelar, razón por la cual se seleccionó esta técnica para realizar los mapas. Cabe aclarar que, al tratarse de datos a nivel nacional, la precisión de los mapas será de 1:1'000,000.

IV.1.1.2.1. Temperatura

De los datos históricos de los últimos 5 años se determinó el valor más alto registrado en cada estación hidrométrica, anotando también mes, año y coordenadas de dicho registro. Con los datos recabados se interpoló mediante la técnica IDW (por ser la que mejor ajuste mostró ante este fenómeno). El resultado es un mapa de Temperatura Máxima Diaria (Figura IV.1), con rangos Jenks (agrupación con mínima dispersión en cada rango, por lo que existe una misma cantidad de datos),

En dicha figura se muestran 5 Rangos que oscilan entre los 29.2°C y 42.1°C. El primer rango va de 29.2°C a 37.6°C, este rango se distribuye en 106,434 km² que representa el 5.42% del territorio nacional y se distribuye principalmente en los Estados del centro de la República, además de encontrar influencia en la Sierra Madre Occidental (Durango, Jalisco y Zacatecas).

Para el segundo rango (37.7°C a 39.8°C), los datos se distribuyeron alrededor del primero, presentando influencia en Chiapas y Quintana Roo, su área de influencia representa el 14.92%. El tercer rango el cual se encuentra entre 39.9°C y 42.0°C, se extiende a una gran cantidad de Estados hacia el Sur de la República, alcanzando también Occidente y parte del Noreste, sin extenderse tanto en esta última región. 540,974 km² (27.54%) es la cantidad de superficie que este rango alcanza.

El cuarto rango (42.1°C a 44.1°C), completa la zona Sur del país (Campeche, Yucatán, parte de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Veracruz); además de que se extiende por la mayor parte de las Bajas Californias, Chihuahua, Nuevo León y Tamaulipas, alcanzando el 35.48% del territorio nacional. Por último, el quinto rango que oscila de 44.2°C a 49.1°C representa el 16.64% restante y pasa por el Estado de Sonora, una parte de Coahuila, San Luis Potosí, Veracruz y Tamaulipas.

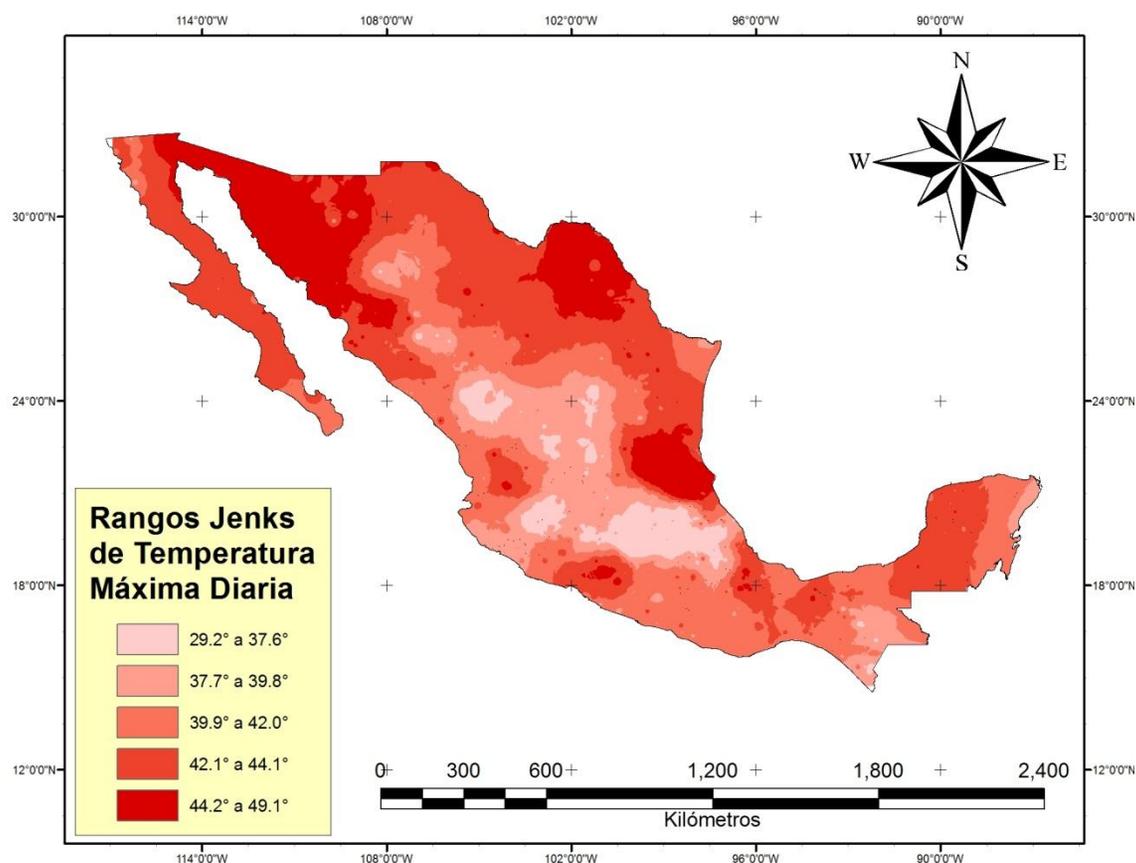


Figura IV.1. Mapa de temperatura máxima diaria por zonas

Fuente: Elaboración propia.

Para la temperatura mínima, de igual manera se usaron los registros de los últimos cinco años. En este caso se trabajó con el valor más bajo registrado en

dicho período de tiempo. Como resultado se obtuvo un mapa con cinco rangos de Temperatura Mínima Diaria (Figura IV.2).

Los Rangos van de los 14.6°C a los -21.0°C. El primer rango es el más conservador ya que en él se encuentran valores de 14.6°C a 2.5°C, este rango se distribuye en los Estados del Sureste, Guerrero, Colima y costas de Michoacán, Jalisco y Nayarit (381,407 km²). El segundo rango (2.4°C a -1.7°C), Completa casi en su totalidad los Estados de Occidente (hasta Sinaloa) y el Centro (excepto Morelos y parte de Puebla, Hidalgo y Toluca), además de que envuelve completamente a Baja California Sur, su porcentaje de influencia es de 23.98% de los 1'964,375 km² que componen el territorio nacional.

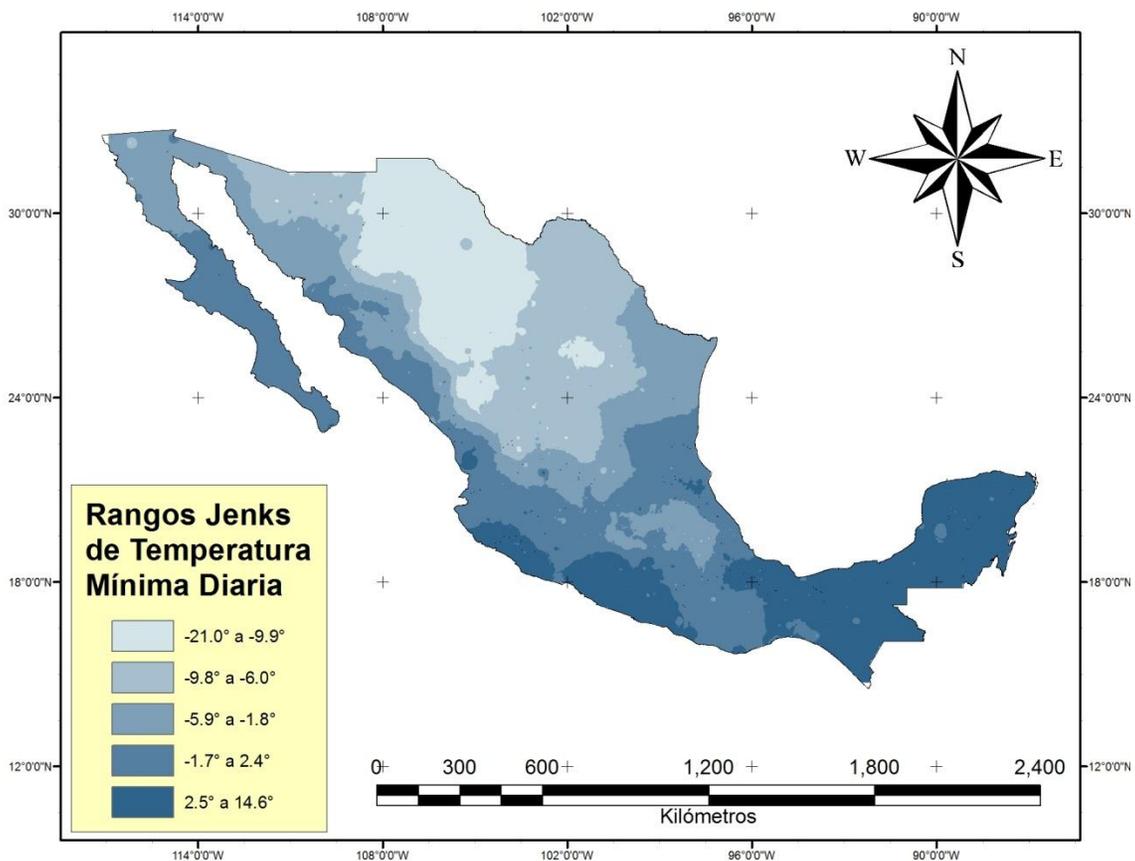


Figura IV.2. Mapa de temperatura mínima diaria por zonas

Fuente: Elaboración propia.

El tercer rango el cual se encuentra entre -1.8°C y -5.9°C , cubre el área faltante del Centro de la República, además de que llega a Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí, Sonora y Baja California Norte, su área es de $403,505\text{ km}^2$. El cuarto rango que va de -6.0°C a -9.8°C (20.72%), afecta al resto de los Estados del Norte, excepto Chihuahua, parte de Coahuila y Durango. Estos son influenciados directamente por el quinto rango que oscila entre -9.9°C y -21.0°C representando el 15.35% restante.

IV.1.1.2.2. Precipitación

Para el proceso de la información de precipitación máxima se siguió el mismo principio explicado en los casos de temperatura, con lo que se obtuvo un mapa con cinco rangos de Precipitación Máxima Diaria (Figura IV.3).

Los Rangos van desde los 13.8 mm hasta los 291.5 mm de lluvia. El primer rango cubre una parte importante del territorio (42.06%), ya que va desde Baja California, hasta algunos Estados del Centro (Puebla), cubriendo solo una parte de Sonora, Durango, Jalisco, Coahuila, San Luis Potosí e Hidalgo. El rango siguiente (88.0 a 124.0 mm) Se muestra conservador y se extiende alrededor del primero, alcanzando unas zonas extras en Yucatán, Chiapas y Guerrero, su alcance es de 365.636 km^2 (18.61%).

El tercer rango se encuentra entre 124.1 mm a 162.1 mm, maneja la misma tendencia que el anterior, cubriendo (20.74%) a Quintana Roo y parte de Yucatán, Oaxaca, Nayarit, Guerrero y Baja California Sur. El cuarto rango va de 162.2 mm a 207.7 mm de lluvia (13.37%), se presenta principalmente en el Golfo y algunas costas de Jalisco, Guerrero y Baja California Sur. El rango restante (207.8 mm a 291.5 mm) se muestra en Nuevo León, Veracruz, Jalisco, Oaxaca, Tabasco y Chiapas, estas últimas zonas, típicas de Huracanes, su área es de $102,367\text{ km}^2$ (5.21%).

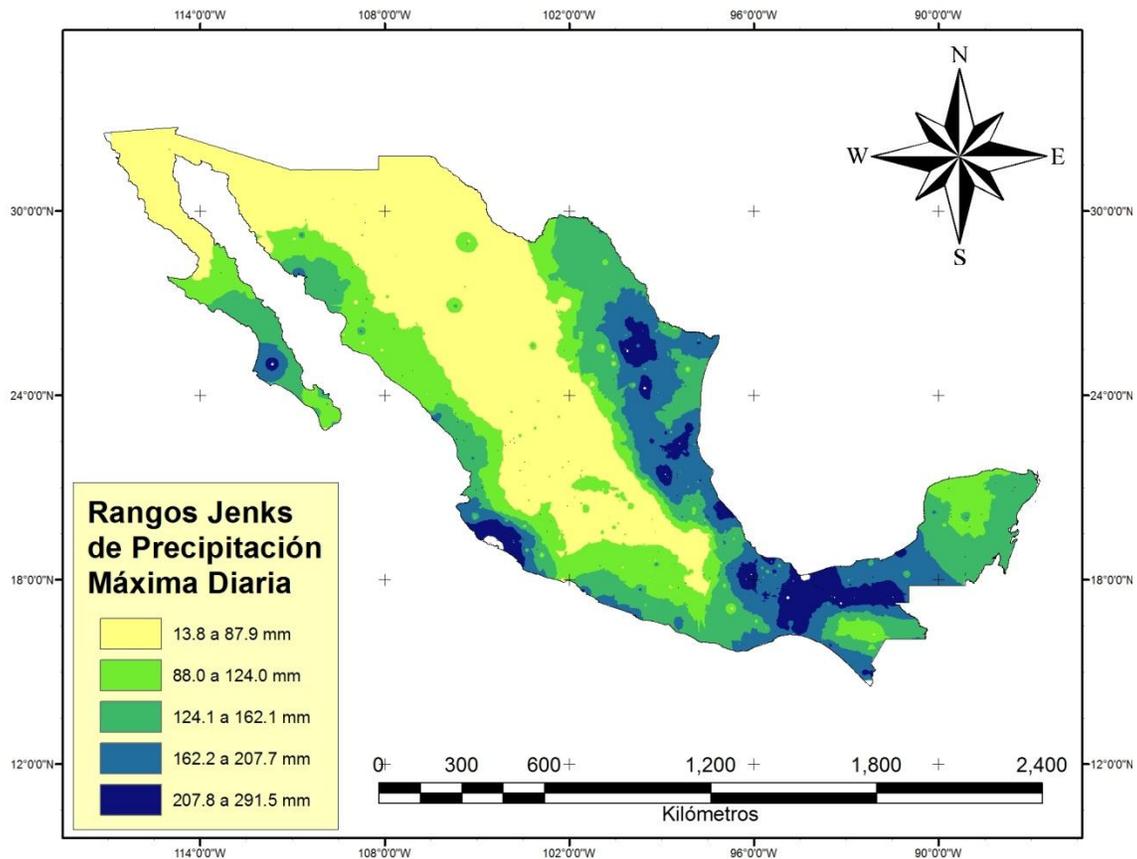


Figura IV.3. Mapa de precipitación máxima diaria por zonas

Fuente: Elaboración propia.

IV.1.2. Integración de variables

Cada variable atmosférica cuenta con un peso normalizado a la unidad (Tabla IV.2). La suma de estos pesos arroja rangos (Tabla IV.3) con los que se identifican condiciones atmosféricas (favorable a desfavorable) para la construcción de un pavimento flexible. Por lo que normalizar valores a la unidad (de 1 a 5 respectivamente a cada caso) facilita el análisis espacial del mapa resultante. De esta manera se obtiene una zonificación de temperatura y precipitación para el óptimo desempeño de pavimentos en el territorio nacional, ilustrado en la Figura IV.4.

Tabla IV.2. Pesos asignados al rango de cada variable atmosférica

Peso	Temperatura Máxima	Peso	Temperatura Mínima	Peso	Precipitación Máxima
1	29.2° a 37.6°	5	-21.0° a -9.9°	1	13.8 a 87.9 mm
2	37.7° a 39.8°	4	-9.8° a -6.0°	2	88.0 a 124.0 mm
3	39.9° a 42.0°	3	-5.9° a -1.8°	3	124.1 a 162.1 mm
4	42.1° a 44.1°	2	-1.7° a 2.4°	4	162.2 a 207.7 mm
5	44.2° a 49.1°	1	2.5° a 14.6°	5	207.8 a 291.5 mm

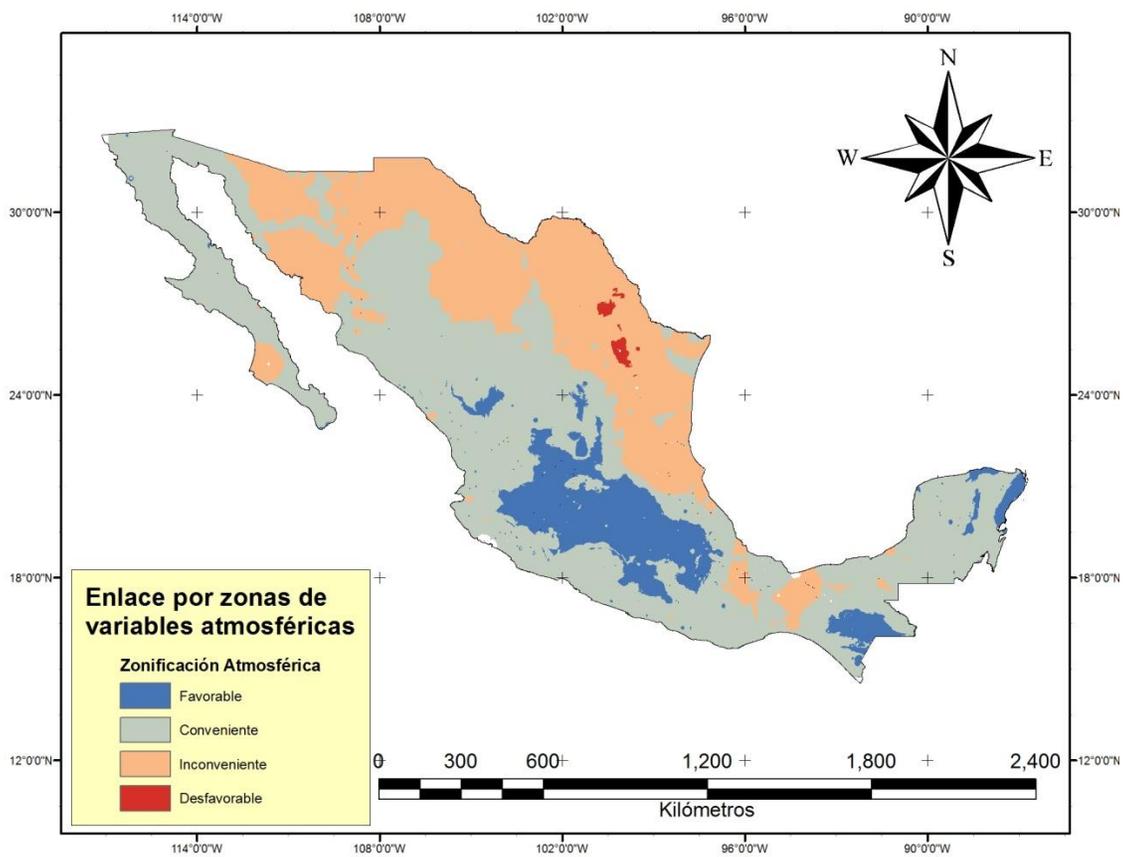


Figura IV.4. Zonificación de temperatura y precipitación para el desempeño de pavimentos en el territorio nacional

Fuente: Elaboración propia.

Tabla IV.3. Rangos resultantes de análisis multicriterio en variables atmosféricas

Rango	Zonificación
3 a 6	Favorable
7 a 9	Conveniente
10 a 12	Inconveniente
13 a 15	Desfavorable

La zona atmosférica *Favorable* se encuentra principalmente en los Estados del Centro, y alcanza algunas partes de Durango, Chiapas y Quintana Roo, representando el 12.13% del total. En cuanto a la zona *Conveniente*, es la que mayor influencia se percibe (54.72%), dejando fuera de su influencia, en general, solo a parte de los Estados del Norte (Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas), además de que no considera a parte de San Luis Potosí, Veracruz y Oaxaca. Estas regiones mencionadas entran en la zona denominada *Inconveniente* y representa el 32.75% (643,255 km²). Dejando solo el 0.40% para la zona *Desfavorable* que toca unas pequeñas áreas en Nuevo León Y Coahuila.

Con el mapa anterior, es posible identificar de manera territorial las zonas atmosféricas donde las condiciones para la estructura de pavimento son adecuadas para construir estructuras de pavimento bajo los criterios tradicionales y zonas atmosféricas donde se debe poner especial atención por las variables atmosféricas presentes. Existiendo entre ambos extremos condiciones intermedias. Por ejemplo, una zona con valores altos (críticos) se refiere a una zona “desfavorable” debida a que las condiciones atmosféricas son extremas. En contraparte, una zona con valores bajos será aquella en que las condiciones de temperatura y precipitación son “ideales” para el óptimo comportamiento de una estructura de pavimento a lo largo de su vida útil.

IV.2. Extracción de muestras en campo

IV.2.1. Análisis probabilístico del plan de muestreo

Los kilómetros muestreados de algunos tramos carreteros se muestran a continuación, el resto de los tramos se observan en el Anexo E.

Tabla IV.4. Kilómetros a muestrear por tramo

BCódigo	Tramo	Total de Km	Coef.	Km Inicial	Km Final	Km a ensayar	Estado
R003	MUNA - FELIPE CARRILLO PUERTO	217.00	0.885	192	194	3	QUINTANA ROO
R125	OAXACA - TEHUANTEPEC	251.00	0.705	177	179	3	OAXACA
...
...
R123	HUAJUAPAN DE LEON - OAXACA	181.00	0.624	113	115	3	OAXACA
R306	SANTA ANA - SONOITA	252.00	0.079	20	22	3	SONORA

Fuente: Elaboración Propia (2013)

IV.3. Ensayo de materiales en laboratorio

IV.3.1. Pruebas a carpeta asfáltica

El Módulo Resiliente (M_R) de los núcleos de cada tramo (Tabla IV.5) se determinó de acuerdo a la media y límites estadísticos que arrojó el análisis con las cartas de control (M-CAL-1-03/03). Los módulos de algunos tramos se enlistan a continuación, el resto se encuentra en el Anexo F.

Tabla IV.5. Módulo Resiliente de cada tramo carretero

Código de la Ruta	Tramo	Estado	Km Inicial	Km Final	M _R (MPa)
R003	MUNA - FELIPE CARRILLO PUERTO	QUINTANA ROO	192	194	<u>2845.959</u>
R003	MUNA - FELIPE CARRILLO PUERTO	YUCATÁN	92	94	<u>2584.486</u>
...
...
R325	CABO SAN LUCAS - LA PAZ	BAJA CALIFORNIA SUR	69	71	<u>2809.696</u>
R326	LA PAZ - CD. INSURGENTES	BAJA CALIFORNIA SUR	205	207	<u>2029.069</u>
R329	SANTA ROSALIA - GUERRERO NEGRO	BAJA CALIFORNIA SUR	117	119	<u>2665.295</u>

Fuente: Elaboración Propia (2013)

El límite superior estadístico (3,900 MPa) y la media (2,500 MPa) resultantes fungen como los valores de M_R con los que se puede realizar la revisión de secciones en el catálogo de pavimentos.

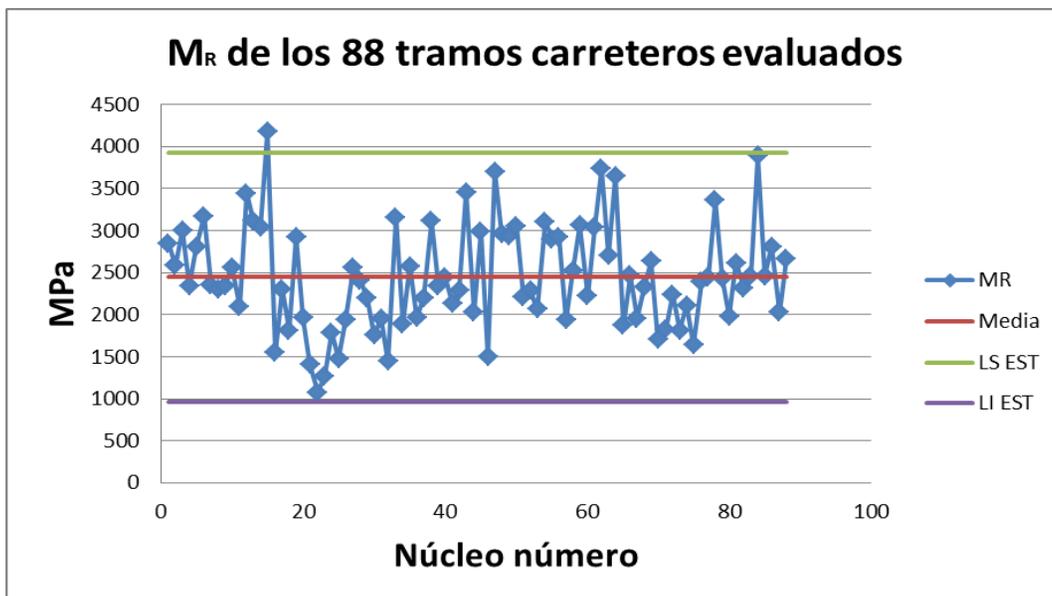


Figura IV.5. Carta de control de medias de M_R de todos los tramos carreteros

Fuente: Elaboración Propia (2013).

IV.3.2. Pruebas a materiales granulares

Para los valores de CBR, a pesar de ser calculados, se consideraron las recomendaciones de la normativa SCT para no tener valores menores a los que marca dicha normativa.

Mientras que los valores del M_R se consideraron los valores típicos ensayados durante las pruebas de los materiales granulares.

IV.4. Diseño de estructuras de pavimento con programa DISPAV-5

Los valores del Módulo Resiliente (M_R) de la mezcla asfáltica contemplados para el diseño se muestran a continuación:

Tabla IV.6. Módulos Resilientes en mezclas asfálticas

Módulos Resilientes para Carpetas Asfálticas (kg/cm^2)	
CA3	CA4
25,000	39,000

Para los materiales granulares, los valores considerados (CBR y M_R) para las bases, subbases y subsantes fueron los mostrados en las tablas siguientes.

Tabla IV.7. Módulos Resilientes y CBR en Bases

	Base H. 2	Base H. 3	BEA	BEC
M_R (kg/cm^2)	2,000	3,000	7,000	75,000
CBR	100%	100%	-	-

Tabla IV.8. Módulos Resilientes y CBR en Subbase y Subrasante

	Subbase	Subrasante
M_R (kg/cm ²)	1,000	600
CBR	60%	20%

Los resultados del terreno natural más comunes entre CBR y M_R se enlistan en la siguiente tabla.

Tabla IV.9. Características mecánicas consideradas en cada región

Región	CBR (%)	M_R (kg/cm ²)
Muy Favorable (R5)	30	900
Favorable (R4)	25	740
Media (R3)	20	600
Desfavorable (R2)	15	500
Muy desfavorable (R1)	10	350

En la siguiente tabla, se enlistan las cinco categorías de tránsito, en donde se aprecian los millones de ejes equivalentes, se usó el límite superior tanto en fatiga (Z_0) como en deformación (Z_{30}).

Tabla IV.10. Categorías de tránsito (millones de ejes equivalentes)

	Z_0	Z_{30}
$\Sigma EE1$	0.0 a 9.8	0.0 a 8.5
$\Sigma EE2$	9.9 a 20.0	8.6 a 16.4
$\Sigma EE3$	20.1 a 39.1	16.5 a 32.4
$\Sigma EE4$	39.2 a 77.8	32.5 a 65.4
$\Sigma EE5$	77.9 a 101.5	65.5 a 82.5

El período de diseño que se consideró fue de 20 años; además de un módulo de Poisson de 0.35 para las capas asfálticas y 0.50 para las granulares. Se revisó las secciones para carreteras normales con las categorías de tránsito uno, dos y tres, con un nivel de confianza del 85%.

Para carreteras de altas especificaciones se consideró las cinco categorías de tránsito, con un nivel de confianza del 95%.

Los caminos de altas especificaciones son aquellos en los que se desea conservar un nivel de servicio alto al final de la vida de proyecto (1.2 cm de deformación en la rodada y agrietamiento ligero a medio); mientras que los caminos normales son los que permiten deformaciones del orden de 2.5 cm en la rodada y agrietamiento medio a fuerte, al final de la vida de proyecto.

El criterio de selección de los diseños se basó en tratar de construir secciones con espesores mínimos que cumplan con la vida prevista de proyecto.

Lo anterior permite pensar que se optimizarán costos, además de que se pretende obtener el mayor beneficio de las características mecánicas de cada capa. Para cada caso se establecieron al menos tres propuestas de diseño.

La primera consistente de base hidráulica, la segunda con base estabilizada con asfalto y la tercera con base estabilizada con cemento.

IV.1.1. Diseños para carreteras normales

Los diseños resultantes, para carreteras normales y bajo las consideraciones previamente señaladas se muestran a continuación:

Tabla IV.11. Diseños de carreteras normales propuestos para las cinco regiones con tránsito 1

$\Sigma EE1. Z_0=9.8$ y $Z_{30}=8.5$			
R1			
R2			
R3			
R4			
R5			

Tabla IV.12. Diseños de carreteras normales propuestos para las cinco regiones con tránsito 2

$\Sigma EE2. Z_0=20.0$ y $Z_{30}=16.4$			
R1			
R2			
R3			
R4			
R5			

Tabla IV.13. Diseños de carreteras normales propuestos para las cinco regiones con tránsito 3

$\Sigma EE3. Z_0=39.1$ y $Z_{30}=32.4$			
R1			
R2			
R3			
R4			
R5			

En los diseños se alcanza a apreciar que mientras mejor es la respuesta del terreno natural y las condiciones climáticas, los espesores son menores. También se aprecia que el espesor típico de la subrasante es de 30 centímetros.

IV.1.2. Diseños para carreteras de altas especificaciones

Para carreteras de altas especificaciones los diseños propuestos son los siguientes:

Tabla IV.14. Diseños de carreteras de altas especificaciones propuestos para las cinco regiones con tránsito 1

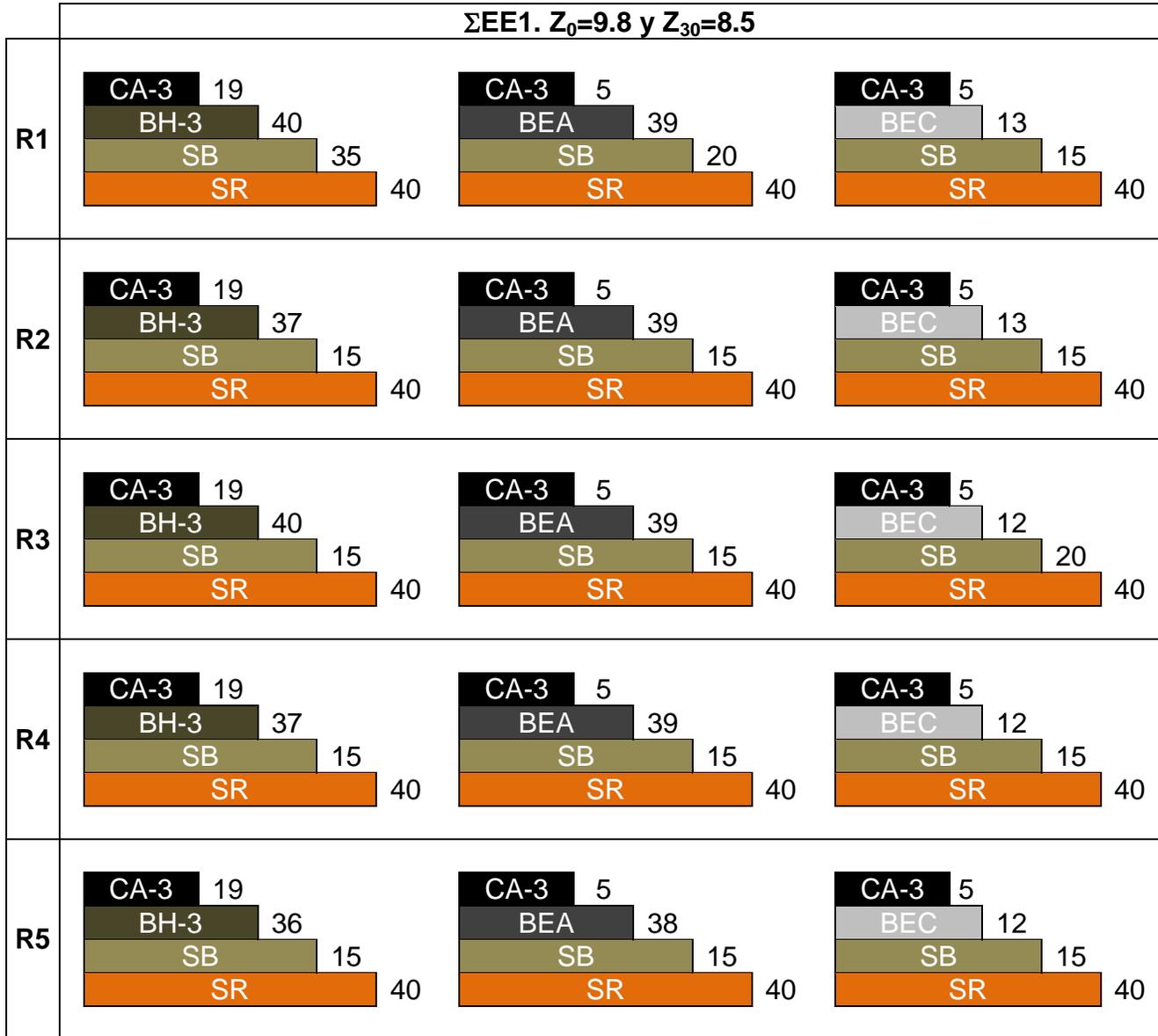


Tabla IV.15. Diseños de carreteras de altas especificaciones propuestos para las cinco regiones con tránsito 2

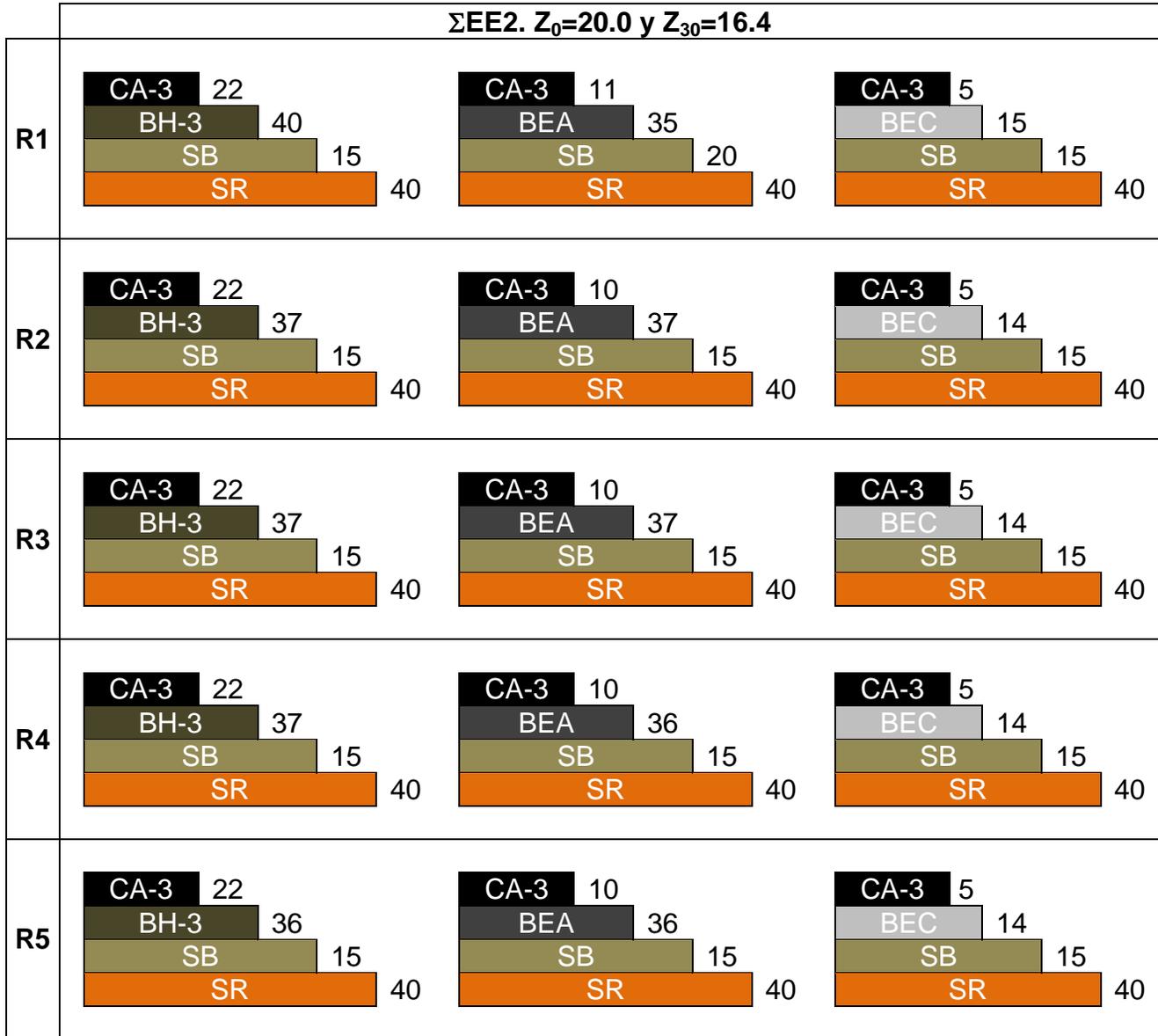


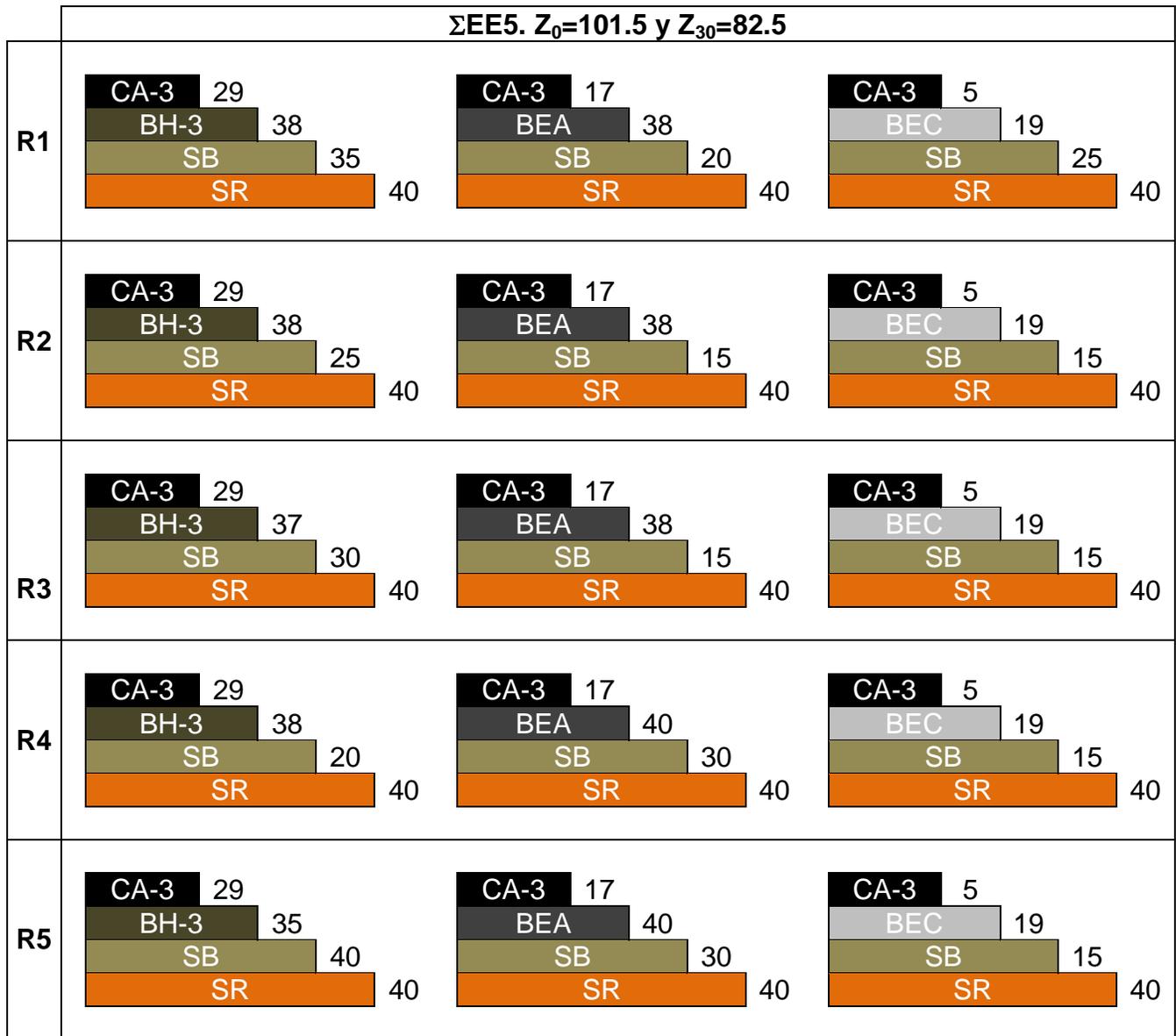
Tabla IV.16. Diseños de carreteras de altas especificaciones propuestos para las cinco regiones con tránsito 3

$\Sigma EE3. Z_0=39.1$ y $Z_{30}=32.4$			
R1			
R2			
R3			
R4			
R5			

Tabla IV.17. Diseños de carreteras de altas especificaciones propuestos para las cinco regiones con tránsito 4

$\Sigma E E 4. Z_0=77.8$ y $Z_{30}=65.4$			
R1			
R2			
R3			
R4			
R5			

Tabla IV.18. Diseños de carreteras de altas especificaciones propuestos para las cinco regiones con tránsito 5



En las secciones propuestas se aprecia que las estructuras son demasiado robustas comparadas con las que se suelen utilizar actualmente. Lógicamente estas aumentan conforme se incrementan las cargas del tránsito y, disminuyen al encontrar una mejor respuesta por parte del terreno natural.

Para este tipo de carreteras el espesor de la subrasante se mostró típicamente de 40 centímetros.

IV.1.3. Discusión del catálogo de secciones

Con la obtención de los diversos diseños se logra el objetivo primordial de la investigación. Mediante estas propuestas, el ingeniero puede guiarse para determinar los espesores de pavimento bajo ciertos parámetros. Además de que se aprecia la importancia de evaluar las condiciones específicas de cada sitio y determinar la sección estructural que funcionará adecuadamente en cada caso.

Cada sitio en particular (a nivel Nacional), cuenta con características singulares. Este trabajo trató de acotar las variables que intervienen en el diseño de pavimentos y trabajó con rangos (de cada parámetro) considerados como valores típicos (producto de ensayos de laboratorio).

Los resultados son una guía de la cual se puede elegir la sección que se construirá para algún determinado lugar. El catálogo constituye un aporte para facilitar la toma de decisiones. Sin embargo, la decisión final siempre será tomada por las partes involucradas en el proyecto.

IV.5. Análisis comparativo de secciones con AASHTO 2002

Los 12 tramos seleccionados para el comparativo se observan en la siguiente figura.

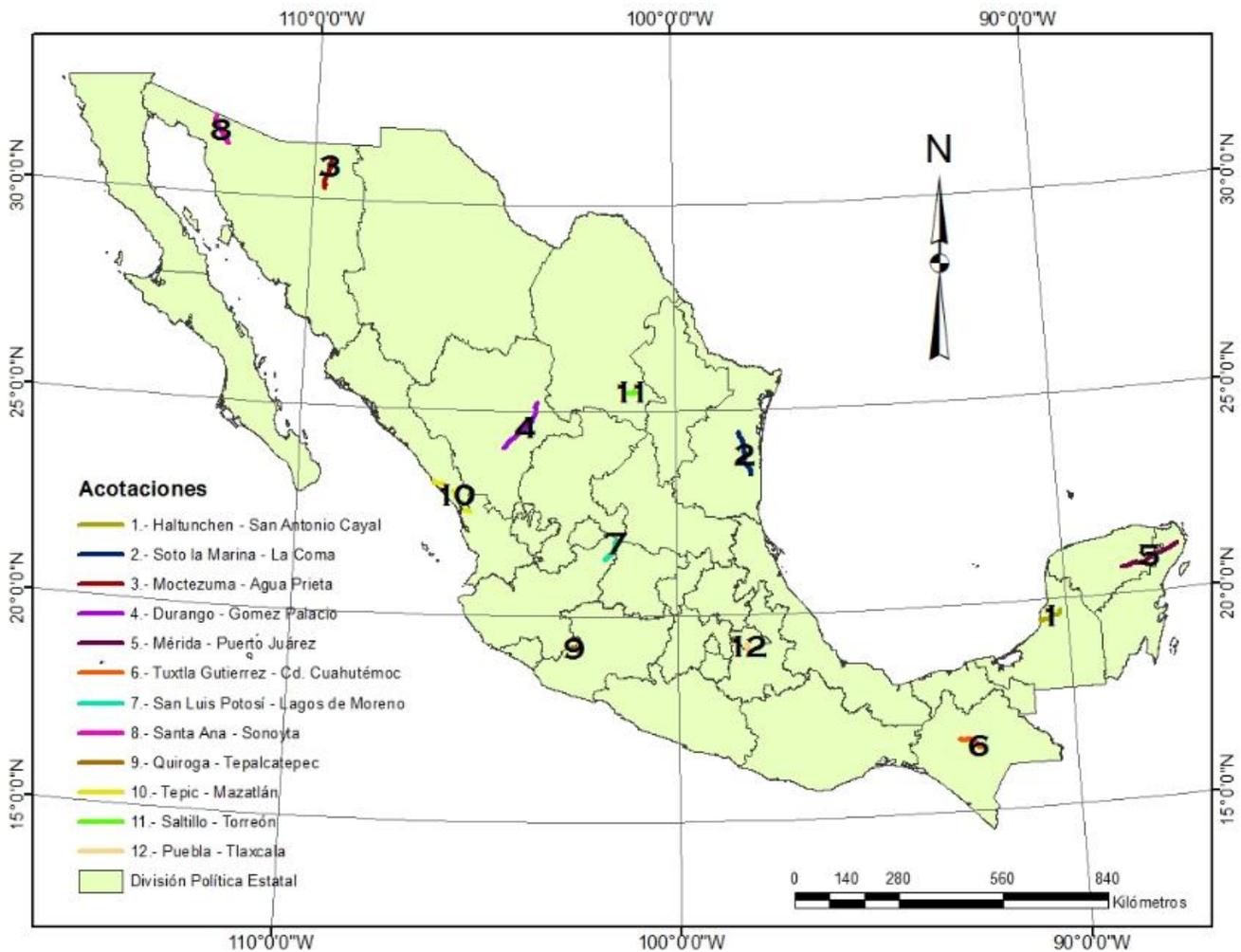


Figura IV.6. Distribución de tramos carreteros analizados y criterios para análisis de tránsito.

Fuente: Elaboración propia

De manera esquemática, en los tramos seleccionados se analizó el peso correspondiente de cada variable atmosférica con el objeto de obtener la zonificación correspondiente en cada caso (Tabla IV.19).

Tabla IV.19. Zonificación de los tramos carreteros seleccionados en función de los pesos asignados por cada variable atmosférica.

Tramo Carretero	Pesos				Zonificación
	T máx.	T mín.	P máx.	Total	
1	4	1	3	8	Conveniente
2	4	3	4	11	Inconveniente
3	5	4	1	10	Inconveniente
4	1	5	1	7	Conveniente
5	3	1	2	6	Favorable
6	2	1	5	8	Conveniente
7	2	3	1	6	Favorable
8	5	4	1	10	Inconveniente
9	3	2	2	7	Conveniente
10	3	2	3	8	Conveniente
11	3	4	4	11	Inconveniente
12	1	3	2	6	Favorable

IV.5.1. Comparativo de estructuras de pavimento

Para facilitar el comparativo entre los dos métodos de diseño, método del Instituto de Ingeniería de la UNAM vs el método Empírico Mecanicista de la AASHTO, se colocaron los resultados en una serie de tablas que se muestran a continuación, donde se resumen los resultados de cada método.

Para el caso de los diseños uno y dos (DISPAV-5), se compara la deformación y fatiga del tránsito proyectado (ejes equivalentes de la Tabla III.8), con el tránsito que debe ser resistido por la estructura planteada. En el tercer diseño (AASHTO 2002) se comparan la deformación máxima permisible y el agrietamiento por fatiga máximo (expresada en porcentaje, máximo 25%), con la alcanzada por cada tramo.

En cada tramo en particular, por cuestiones prácticas del comparativo, se usaron los valores obtenidos en las pruebas de CBR y M_R , a pesar de que en algunos tramos se alcanza a apreciar que el material no tiene un comportamiento satisfactorio, ya que se observan en algunas capas un menor M_R con respecto al de la capa de apoyo. Se anota también la zonificación climática resultante.

En las tablas se aprecian tres diseños. Al costado izquierdo de las capas de cada diseño se anotan los centímetros de cada capa, mientras que las características mecánicas (CBR y M_R) son los datos resultantes de los ensayos de laboratorio para el tramo carretero en cuestión. Por último en la parte inferior izquierda se observan los resultados de la evaluación de cada diseño, indicando con color verde cuando la evaluación es satisfactoria y en rojo cuando no lo es.

Tabla IV.20. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002
Tramo Haltunchen – San Antonio Cayal

1.- HALTUNCHEN - SAN ANTONIO CAYAL. Nivel de Confianza de 85% (N. C.)								
DISPAV-5 Actual		DISPAV-5 Mejorada		AASHTO 2002		Características mecánicas		
						Material	VRS	$M_{R_{P80}}$ (Mpa)
6	CA	15	CA	10	CA	CARPETA (CA)	-	2560
16	B	16	B	15	B	BASE (B)	102%	84
48	SB	48	SB	48	SB	SUBBASE (SB)	66%	228
20	SR	20	SR	20	SR	SUBRASANTE (SR)	35%	119
	TN		TN		TN	T. N. (mA)	15%	90
Fat.	0.1 < 2.9	3 > 2.9		25 > 0		Zonificación	Conveniente	
Def.	3.7 > 2.8	150 > 2.8		2.5 > 1.83				

En este tramo carretero, la vida previsible a fatiga de la sección existente respecto a la obtenida con el análisis con el programa DISPAV-5 es menor a la requerida. Se observa que la capa de la base cuenta con un M_R menor que su capa de apoyo, por lo que es probable que exista rompimiento de granos, lo cual indica que la capa ha fallado. Si se requiriera rehabilitar el tramo para ponerlo en condiciones óptimas, sería necesario reemplazar dicha capa. Si se conservan las

mismas capas granulares (materiales y espesores) es necesario aumentar 9 cm de carpeta asfáltica para resistir el tránsito esperado para el período de análisis. Mientras tanto, para el AASHTO 2002 el diseño es satisfactorio con 4 cm más de carpeta y 1 cm menos de base hidráulica.

Tabla IV.21. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002

Tramo Soto la Marina – La Coma

2.- SOTO LA MARINA - LA COMA. Nivel de Confianza de 85% (N. C.)								
Estructura Actual		Estructura NOM-2008		AASHTO 2002		Características mecánicas		
						Material	VRS	Mr _{P80} (Mpa)
6	CA	16	CA	10	CA	CARPETA (CA)	-	2897
35	B	35	B	25	B	BASE (B)	98%	256
24	SR	24	SR	24	SR	SUBRASANTE (SR)	29%	54
	TN		TN		TN	T. N. (M)	9%	60
Fat.	8 < 12.6	14.8 > 12.6		25 > 0		Zonificación Inconveniente		
Def.	150 > 11.5	150 > 11.5		2.5 > 2.2				

En esta sección el problema es en de fatiga y deformación. Con 10 cm más en la carpeta asfáltica, se logran un comportamiento satisfactorio en el diseño dos de mecanismos de falla. Para el diseño propuesto tres, los espesores disminuyen en las capas base y subrasante.

Tabla IV.22. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002

Tramo Moctezuma – Agua Prieta

3.- MOCTEZUMA - AGUA PRIETA. Nivel de Confianza de 85% (N. C.)								
Estructura Actual		Estructura NOM-2008		AASHTO 2002		Características mecánicas		
						Material	VRS	Mr _{P80} (Mpa)
15	CA	5	CA	5	CA	CARPETA (CA)	-	1980
20	B	11	BEC	10	BEC	BEC	-	7500
30	SR	20	B	10	B	BASE (B)	102%	108
	TN	30	SR		TN	SUBRASANTE (SR)	40%	56
			TN			T. N. (B)	6%	50
Fat.	0.7 < 17.6	20.9 > 17.6		25 > 0		Zonificación Inconveniente		
Def.	126.7 > 16.5	150 > 16.5		2.5 > 1.96				

A partir de este tramo es necesario emplear bases estabilizadas de cemento (BEC) o asfalto (BEA). Sus componentes se indican en el último párrafo de la sección III.5.1. El tramo carretero actual analizado muestra también problema de fatiga. Si se agrega BEA los espesores serían demasiado robustos, por lo que se optó por introducir una BEC, con ésta se logra solventar de buena manera los diseños dos y tres. Además en el diseño tres se alcanza una sección con capas más delgadas, incluso la subrasante ya no es necesaria desde el punto de vista estructural.

Tabla IV.23. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002
Tramo Durango – Gómez Palacio

4.- DURANGO - GOMEZ PALACIO. Nivel de Confianza de 95% (N. C.)								
Estructura Actual		Estructura NOM-2008		AASHTO 2002		Características mecánicas		
						Material	VRS	Mr _{P80} (Mpa)
10	CA	10	CA	5	CA	CARPETA (CA)	-	2326
22	B	11	BEC	10	BEC	BEC	-	7500
20	SB	40	B	40	B	BASE (B)	108%	186
	TN	85	SB	85	SB	SUBBASE (SB)	63%	73
			TN		TN	T. N. (mB)	3%	35
Fat.	0.1 < 65.5		66 > 65.5		25 > 0	Zonificación Conveniente		
Def.	0.1 < 53.5		53.5 = 53.5		1.2 > 0.68			

El análisis de la estructura actual (diseño uno) arroja deficiencia tanto en la fatiga como en la deformación, esto por las inadecuadas características del terreno natural (región mB), así como por la alta tasa de crecimiento y distribución vehicular. En este caso es necesario agregar una BEC. Los diseños dos y tres resultantes son parecidos y satisfactorios.

Tabla IV.24. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002

Tramo Mérida – Puerto Juárez

5.- MERIDA - PUERTO JUAREZ. Nivel de Confianza de 95% (N. C.)								
Estructura Actual		Estructura NOM-2008		AASHTO 2002		Características mecánicas		
						Material	VRS	Mr _{P80} (Mpa)
9	CA	5	CA	5	CA	CARPETA (CA)	-	3004
19	B	15	BEC	10	BEC	BEC	-	7500
21	SB	21	SB	20	SB	BASE (B)	104%	157
21	SR	40	SR	90	SR	SUBBASE (SB)	60%	272
	TN		TN		TN	SUBRASANTE (SR)	32%	110
						T. N. (M)	9%	60
Fat.	0.2 < 56.8	98.6 > 56.8		25 > 0				
Def.	1.8 < 51.3	52.6 > 51.3		1.2 > 1.16		Zonificación	Favorable	

Aquí se aprecia un menor M_R de la base con respecto a su capa de apoyo (subbase), por lo que la capa se puede considerar de calidad inferior a la mencionada, motivo por el cual se optó por mejorar dicha capa para los diseños DISPAV-5 Mejorada y AASHTO 2002.

La estructura actual no pasa la revisión por fatiga ni por deformación, a pesar de que el terreno natural es aceptable. Por lo que en este caso la problemática que se acentúa en el diseño dos es la fatiga, lo que se resuelve con la colocación de una BEC. Para el diseño tres fue necesario mejorar las condiciones de subrasante (120 MPa) y terreno natural (90 MPa), resultando espesores más grandes con respecto al diseño dos. En la práctica se alcanzan mejores condiciones del material abriendo caja y sustituyéndolo por otro con mejor respuesta mecánica. Aún con estas consideraciones, los espesores en este último diseño son mayores al segundo.

Tabla IV.25. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002

Tramo Tuxtla Gutiérrez – Cd. Cuauhtémoc

6.- TUXTLA GUTIERREZ - CD. CUAUHTEMOC. Nivel de Confianza de 85% (N. C.)								
Estructura Actual		Estructura NOM-2008		AASHTO 2002		Características mecánicas		
						Material	VRS	Mr _{P80} (Mpa)
18	CA	5	CA	5	CA	CARPETA (CA)	-	2302
15	B	19	BEA	25	BEA	BEA	-	700
27	SB	30	B	40	B	BASE (B)	101%	324
	TN	30	SB	40	SB	SUBBASE (SB)	58%	234
			TN		TN	T. N. (mB)	3%	35
Fat.	21.4 > 14.9		15.7 > 14.9		25 > 0	Zonificación Conveniente		
Def.	2.2 < 19		21 > 19		2.5=2.5			

El diseño parece ser adecuado, se observa una carpeta con un espesor bastante grande, por lo que se propone emplear BEA y disminuir el espesor de la carpeta. Los espesores en el diseño dos son más delgados que en el tres, esto puede deberse a que el método AASHTO 2002 considera a una sección como satisfactoria cuando el problema por deformación es solventado (capas inferiores), dando una mayor importancia a este parámetro.

Tabla IV.26. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002

Tramo San Luis Potosí – Lagos de Moreno

7.- SAN LUIS POTOSI - LAGOS DE MORENO. Nivel de Confianza de 95% (N. C.)								
Estructura Actual		Estructura NOM-2008		AASHTO 2002		Características mecánicas		
						Material	VRS	Mr _{P80} (Mpa)
15	CA	5	CA	5	CA	CARPETA (CA)	-	3053
25	B	19	BEC	20	BEC	BEC	-	7500
20	SB	17	SB	15	SB	BASE (B)	109%	91
	TN		TN		TN	SUBBASE (SB)	104%	137
						T. N. (B)	6%	50
Fat.	0.8 < 108.1		145 > 108.1		25 > 0	Zonificación Favorable		
Def.	0.3 < 96.6		110.2 > 96.6		1.2 > 0.86			

Se observa la mala calidad de los materiales de la base, lo que pudo haber provocado algún rompimiento de granos (M_R de base menor que el de la subbase) por lo que se optó dejar solo a la subbase. La estructura actual no

cumple con las condiciones de fatiga ni deformación, debido a que el terreno natural se encuentra en una región de mala calidad. Al agregar BEC es posible encontrar una solución adecuada para el diseño dos.

En cuanto al tercer diseño, además de la BEC se requirió aumentar el valor de M_R en terreno natural (259 MPa), con lo que los espesores disminuyeron bastante en comparación del diseño dos. Como ya se había indicado, este comportamiento se debe a la mala calidad del terreno natural, lo cual se agrava en este caso por el tránsito elevado en el tramo.

Tabla IV.27. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002
Tramo Santa Ana – Sonoyta

8.- SANTA ANA - SONOYTA. Nivel de Confianza de 95% (N. C.)								
Estructura Actual		Estructura NOM-2008		AASHTO 2002		Características mecánicas		
						Material	VRS	$M_{r_{P80}}$ (Mpa)
15	CA	5	CA	5	CA	CARPETA (CA)	-	3358
20	B	25	BEC	20	BEC	BEC	-	7500
30	SB	28	B	30	B	BASE (B)	108%	129
	TN		TN		TN	SUBBASE (SB)	83%	78
						T. N. (M)	9%	60
Fat.	1.3 < 175.6		192 > 175.6		25 > 0	Zonificación		
Def.	6.3 < 143.8		323 > 143.8		1.2 > 1.12	Inconveniente		

La problemática es similar a la anterior, la diferencia es que la región cuenta con terreno natural de calidad media. El programa DISPAV-5 tiene una muy grande limitante, sus revisiones llegan hasta un máximo de 150, en este caso los ejes calculados exceden dicho límite por lo que se observó la tendencia de crecimiento para cada caso al aumentar 1 centímetro a cada capa, estimando de esta manera que espesores cumplieran con los valores requeridos. En el diseño dos se usó BEC con lo que se logra reducir el espesor de la carpeta asfáltica. Para el tercer diseño además de los espesores hubo que modificar los módulos resilientes de base (290 MPa) y terreno natural (290 MPa).

Tabla IV.28. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002

Tramo Quiroga – Tepalcatepec

9.- QUIROGA - TEPALCATEPEC. Nivel de Confianza de 95% (N. C.)								
Estructura Actual		Estructura NOM-2008		AASHTO 2002		Características mecánicas		
						Material	VRS	Mr _{P80} (Mpa)
20	CA	5	CA	5	CA	CARPETA (CA)	-	3110
30	B	20	BEC	10	BEC	BEC	-	7500
22	SB	18	SB	15	SB	BASE (B)	136%	63
	TN		TN		TN	SUBBASE (SB)	25%	111
						T. N. (A)	12%	74
Fat.	3.4 < 47.6		150 > 47.6		25 > 0			
Def.	138.5 > 45.7		46.2 > 45.7		1.2 > 0.94	Zonificación	Conveniente	

En este tramo también se aprecia el posible rompimiento de granos en la base (M_R de base menor que el de la subbase) y la probable mala calidad de los materiales en dicha capa, por lo que se sugiere reemplazarla y agregar BEC. La estructura actual muestra un buen comportamiento a la deformación, por lo que pensar en reducir las capas inferiores para optimizar la estructura es válido. La deficiencia se encuentra en la fatiga, lo que exige un aumento de rigidez en las capas superiores. Para lo anterior se implementó BEC tanto en el diseño dos como en el tres. A pesar de que las condiciones de terreno natural son bastante aceptables, en el tercer diseño, se necesita mejorar la capacidad de respuesta en la subbase y en el terreno natural (350 MPa en ambos casos).

Tabla IV.29. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002

Tramo Tepic – Mazatlán

10.- TEPIC - MAZATLAN. Nivel de Confianza de 95% (N. C.)								
Estructura Actual		Estructura NOM-2008		AASHTO 2002		Características mecánicas		
						Material	VRS	Mr _{P80} (Mpa)
45	CA	20	CA	20	CA	CARPETA (CA)	-	2208
20	B	28	BEA	30	BEA	BEA	-	700
	TN	15	B	25	B	BASE (B)	124%	212
			TN		TN	T. N. (mA)	15%	90
Fat.	150 > 135.1		134.3 > 135.1		25 > 0			
Def.	150 > 120.9		150 > 120.9		1.2=1.2	Zonificación	Conveniente	

El diseño actual parece ser adecuado, debido a que a lo largo de la vida del tramo se rehabilitaba con carpetas asfálticas nuevas, esto no es común y probablemente se deba a problemas de hundimientos. Sin embargo, al efectuar un análisis para optimizar la estructura se propone la solución dos y tres con una carpeta aceptable a cambio de la implementación de BEA, los espesores del diseño tres son mayores, debido a que el diseño con AASHTO 2002 da más importancia a las capas granulares.

Tabla IV.30. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002

Tramo Saltillo – Torreón

11.- SALTILLO - TORREON. Nivel de Confianza de 95% (N. C.)								
Estructura Actual		Estructura NOM-2008		AASHTO 2002		Características mecánicas		
						Material	VRS	Mr _{P80} (Mpa)
18	CA	5	CA	5	CA	CARPETA (CA)	-	2220
15	B	24	BEC	25	BEC	BEC	-	7500
15	SB	20	SB	20	SB	BASE (B)	116%	191
25	SR	40	SR	20	SR	SUBBASE (SB)	103%	244
	TN		TN		TN	SUBRASANTE (SR)	26%	165
						T. N. (M)	6%	50
Fat.	3.3 < 177.6	242.3 > 177.6		25 > 0		Zonificación Inconveniente		
Def.	6.1 < 155.6	164.2 > 155.6		1.2=1.2				

En este tramo carretero, además del comportamiento insatisfactorio en la base, se aprecia de nuevo la limitante del DISPAV-5 con respecto al cálculo hasta 150 millones de ejes equivalentes.

La mala calidad del terreno natural además de los pequeños espesores de las capas arroja una estructura actual que no satisface la cantidad de ejes equivalentes proyectados. Por lo que es necesario agregar una BEC, cuyo espesor se incrementa debido a que la deformación es un punto crítico por la calidad de las capas inferiores.

En el diseño tres fue necesario cambiar el módulo resiliente de la subrasante y del terreno natural hasta 500 MPa, lo que demuestra que este programa considera un diseño adecuado con base en las condiciones de las capas inferiores.

Tabla IV.31. Comparativa entre la condición actual vs. DISPAV-5 y AASHTO 2002

Tramo Puebla – Tlaxcala

12.- PUEBLA -TLAXCALA. Nivel de Confianza de 95% (N. C.)								
Estructura Actual		Estructura NOM-2008		AASHTO 2002		Características mecánicas		
						Material	VRS	Mr _{P80} (Mpa)
20	CA	5	CA	5	CA	CARPETA (CA)	-	1269
25	B	35	BEC	35	BEC	BEC	-	7500
45	SR	35	B	45	B	BASE (B)	82%	203
	TN	45	SR	30	SR	SUBRASANTE (SR)	35%	67
			TN		TN	T. N. (mB)	3%	35
Fat.	0.8 < 108.5		150 > 108.5		25 > 0	Zonificación Favorable		
Def.	0.1 < 105.9		111.1 > 105.9		1.2=1.2			

En este último tramo la problemática se centra en la falta de soporte por parte de las capas inferiores. Los diseños dos y tres son idénticos, el diseño tres considera en la capa subrasante y terreno natural un cambio a 200 MPa (M_R) para alcanzar un diseño adecuado.

V. CONCLUSIONES

Para establecer las conclusiones de manera adecuada (apropiada), se evaluó el cumplimiento de los objetivos y las hipótesis.

El objetivo general fue desarrollar una guía de espesores de estructuras de pavimentos flexibles atendiendo las condiciones climáticas actuales con la finalidad de auxiliar al ingeniero en la toma de decisiones. En el capítulo *IV.4. Diseño de estructuras de pavimento con programa DISPAV-5* se establecieron rangos y consideraciones con los que se evaluaron los diseños, obteniendo los resultados que se muestran en el mismo capítulo. De manera resumida se tiene:

En los diseños obtenidos de la guía AASHTO 2002, se consideraron las condiciones de tránsito, la calidad de los materiales de construcción y las características del suelo sobre el que se encuentra desplantada la estructura de pavimento, se determinó si la estructura actual cumple con el periodo de diseño de 20 años. Esta consideración no es del todo correcta ya que las estructuras actuales fueron construidas hace algún tiempo, se desconoce la vida actual de cada tramo carretero y por lo tanto no es de sorprender que al realizar una revisión de la estructura actual como si fuera una estructura nueva, no se cumpla con la vida considerada para el período de diseño determinado.

Aunque los diseños efectuados consideran solamente la construcción de carreteras nuevas, estos pueden servir para determinar el desempeño de alguna estructura existente. Además de que con ellos se puede facilitar la toma de decisiones para alguna medida de conservación.

En los ensayos de Módulo Resiliente (M_R) de algunos especímenes de mezcla asfáltica, se obtuvieron valores altos, arriba de 4,000 MPa. Lo anterior pudo deberse a que el tramo evaluado presentaba envejecimiento en la carpeta asfáltica (rigidez), lo que arrojó datos con valores altos en comparación con las mezclas asfálticas recién producidas. Estos valores altos de M_R no indican necesariamente un comportamiento satisfactorio de la carpeta.

Otros datos obtenidos en las pruebas de laboratorio (M_R), arrojan posible rompimiento de algunas capas granulares y su mala calidad (comportamiento plástico), indicando una posible falla en la capa. Por lo que su respuesta mecánica irá en decremento al corto plazo, lo ideal es cambiar dicha capa para prolongar la vida útil del pavimento.

Al realizar los diseños de las secciones de pavimento con el programa DISPAV-5 y debido a que los materiales de 271 kilómetros (88 tramos carreteros) se evaluaron mediante pruebas de laboratorio, se pudo observar que la fórmula de correlación que presenta dicho programa entre el CBR y el M_R es poco precisa, ya que no se reprodujeron los resultados obtenidos en laboratorio.

Los ESAL's altos no necesariamente son producto de un TPDA alto, sino que más bien, se ven influenciados en gran medida por la distribución vehicular (con porcentaje alto de vehículos pesados) y su correspondiente tasa de crecimiento. Esto se alcanza apreciar en la comparativa entre el tramo Saltillo-Torreón y Puebla-Tlaxacala. El primero aun cuando tiene un menor TPDA cuenta con un porcentaje mayor de vehículos pesados y una tasa de crecimiento mayor, resultando ESAL's mucho más críticos.

Basado en los resultados de la investigación, la hipótesis se cumple en los tramos evaluados, ya que la mayoría de las secciones de pavimento, en estos

casos, resultaron deficientes debido a fallas prematuras por fatiga, deformación o ambas.

También con el comparativo se aprecia que las condiciones atmosféricas aportan diferentes conclusiones: por una parte, en general los tramos carreteros con zonificación Favorable y Conveniente cuentan con mayor M_R en las carpetas asfálticas en comparación con la mayoría de los tramos carreteros con zona Inconveniente.

En otros casos se observa que, aunque cuenta con M_R alto (tramo 8), la zona resultante es Inconveniente debido a los altos pesos otorgados por la temperatura máxima y mínima, esto denota un mayor desgaste en la carpeta asfáltica por envejecimiento acelerado. Caso contrario a lo que ocurre con el tramo 12, en donde a pesar de que existe un M_R bajo en la carpeta, la zona es Favorable por los bajos pesos otorgados por estos parámetros.

Casi siempre, en los tramos en los que se aprecia un M_R menor de la base hidráulica con respecto a la de la subbase, se aprecia mayor cantidad de precipitación registrada en la zona. Esta acumulación de agua satura la capa y en conjunto con la alta intensidad de cargas impuestas por los vehículos en los tramos en cuestión arrojan una reducción de la respuesta mecánica en las capas granulares.

Como conclusión del objetivo general, se puede afirmar que con esta tesis de espesores se construye una guía con la que se puede alcanzar una mejor respuesta de las estructuras de pavimento y sobretodo las vidas de proyecto consideradas inicialmente. Ante los resultados expuestos se debe ser cauteloso, ya que las secciones, no deben aplicarse como regla general, sino que solamente apoyan en la toma de decisiones. Junto con esta guía, el criterio basado en la

experiencia del ingeniero permitirá tomar mejores decisiones, y a la postre la integración y concepción de mejores carreteras.

Los objetivos específicos han sido:

- Identificar las variables más significativas que determinan el buen funcionamiento de una estructura de pavimento. Esto se logró al indicarlas en el capítulo *III.1.1. Adquisición de variables*, cumpliéndose cabalmente.
- Establecer regiones a lo largo del país, en donde se aprecie la interacción de dichas variables y se identifiquen las zonas más y menos vulnerables. Esto se propuso en el capítulo *III.1.2. Integración de variables* y evaluarlo en el capítulo *IV.1.2. Integración de variables*, de modo que este objetivo también fue logrado con éxito.
- Crear una base de datos de las características mecánicas actuales de los pavimentos en la Red Federal de Carreteras del país. Esto se logró en el capítulo *III.3. Ensayo de materiales en laboratorio*, en donde se almacenó toda la información obtenida y se muestra en los anexos digitales 4 y 5.
- Evaluar el desempeño de los pavimentos en las carreteras nacionales, hacer un comparativo y observar si cumplen con las exigencias actuales. En relación a este objetivo, se trabajó en el capítulo *III.5. Análisis comparativo de secciones con AASHTO 2002*, y al respecto se obtuvieron las siguientes conclusiones particulares:

En los diseños mostrados en el comparativo, se trató de conservar la estructuración original, cambiando, en la medida de lo posible, solo las capas superiores, además de que se trató de aplicar en todo momento los valores obtenidos tanto de CBR como de M_R para cada caso. Lo anterior no fue siempre posible debido a que en ocasiones el terreno natural y las capas inferiores no cumplían con un valor aceptable, según el método AASHTO 2002. Esto se alcanza apreciar en el Tramo Haltunchen – San Antonio Cayal, en donde se conservan los espesores tanto de la subbase como de la subrasante.

Cada método (o programa) empleado para diseñar estructuras de pavimento otorga distinta importancia a los diferentes parámetros. Para un diseño eficiente de las estructuras de pavimento, se deben evaluar las condiciones climáticas, intensidad del tránsito y características mecánicas de los materiales. Por lo que es fundamental realizar una adecuada recolección de dichos parámetros, ya sea mediante ensayos de laboratorio y aforos tanto de tránsito como de la temperatura y precipitación.

La mayoría de los espesores de carpeta que arroja el diseño de estructuras evaluadas con el programa DISPAV-5 se rigen por el parámetro de fatiga, ya que en la mayoría de los casos la respuesta de las carpetas asfálticas (M_R y espesor) era insuficiente para cumplir con dicho parámetro. Esto se genera debido a que la evaluación de la fatiga hecha por el programa puede ser demasiado estricta. Quizá se podría perfeccionar el diseño si fuera posible adaptar las leyes de fatiga específicas para la mezcla evaluada. Una restricción del programa es que evalúa (fatiga y deformación) solo hasta 150 millones de ejes equivalente, por lo que limita el diseño, dando al proyectista la tarea de interpretar los espesores adecuados (tramo Saltillo – Torreón).

El método AASHTO 2002 da un mayor peso a la capacidad de respuesta que las capas inferiores (deformación) presentan ante la acción del tránsito. Por lo que en muchos de los casos fue necesario considerar un mejoramiento de las características mecánicas en dichas capas. En la práctica se sustituye el material por uno que cumpla lo requerido. A pesar de ello, el pavimento, en muchos casos, requiere espesores más robustos, tal y como sucede en el tramo Mérida – Puerto Juárez, en donde es evidente la pobre respuesta de las capas inferiores a la deformación provocada por el tránsito, aun cuando el mismo no es tan crítico.

Es importante recordar que los datos obtenidos para el M_R tanto en la carpeta asfáltica como en los materiales granulares, así como el CBR en dichos materiales, son resultado de ensayos de laboratorio y que el diseño considera una vida útil de 20 años para cada tramo analizado.

En resumen fueron alcanzados los cuatro objetivos específicos planteados. Como consecuencia de lo anterior y con apoyo de los temas tratados en el capítulo *IV. Resultados y discusión*, se puede afirmar que la hipótesis con la que se planteó el trabajo ha podido ser demostrada.

LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Las condiciones climáticas y el incremento del tránsito irán variando conforme transcurran los años, por lo que las secciones aquí propuestas serán válidas por un cierto tiempo. Es conveniente pensar en retomar lo aquí realizado y actualizar las secciones de pavimento conforme avancen los años.

Los métodos de diseño usados, aparentemente siguen siendo adecuados, sin embargo; sería interesante desarrollar un nuevo programa que se ajuste a las exigencias actuales.

Aunque el método AASHTO considera abundantes datos para el diseño de secciones de pavimento, muchas no se ajustan a lo que en México se necesita. Por lo que será importante retomar la idea de dicho método pero adaptada a las exigencias y condiciones del país.

En los tramos carreteros que fallaron en el comparativo se aprecia la importancia de revisar la condición actual en las carreteras, valdría la pena realizar esta revisión a cada carretera que presenta problemas constantes o en aquellas en las que se desee conocer su vida remanente para actuar antes de que se dé una falla estructural. Estas revisiones darán una idea de que capa es necesario retirar, rehabilitar o reforzar para que la estructura de pavimento pueda seguir brindando un adecuado nivel de servicio.

BIBLIOGRAFÍA

- Altman, D.G. and Bland J.M. (1995).** Statistics notes: The normal distribution. London.
- Arellano, L. and Zárate A., M. (2007).** Importancia y necesidad de la presencia de laboratorios de control de calidad, en la construcción y conservación de carreteras. Revista Asfáltica. Número 11, octubre 2007. Asociación Mexicana del Asfalto. México, D. F.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, (1993).** AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.- American Association of State Highway and Transportation Officials.- Washington, D.C., USA.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, (2002).** AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.- American Association of State Highway and Transportation Officials.- Washington, D.C., USA.
- Asphalt Institute, (1993).** Thickness Design Asphalt Pavements for Highways & Streets; Manual Series No. 1 (MS-1).- Asphalt Institute.- Lexington KY, USA.
- Berenson, M. L., Levine, D. M. and Krehbiel, T. C. (2006).** Estadística para administración, Editorial Mc. Graw Hil.
- Cabrera H., E. and Hernández V., H. (2011).** Ingeniería de tránsito, tipo de vehículos y cargas consideradas en el proyecto. Proyecto Estructural de Pavimentos Asfálticos. XXIV Congreso Mundial de Carreteras, Capítulo 3. Cd. De México.
- Cal y Mayor R, R. and Cárdenas G., J. (2007).** Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones . México D.F. Alfaomega. Octava Edición.
- Chadwyck, H. (1978).** Structural design of new road pavements. Cambridge, Inglaterra.
- Corro C., S., Magallanes, R. and Prado O., G. (1981).** Instructivo para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles para Carreteras; Series Instituto de Ingeniería de la UNAM, No. 444.- UNAM, México, D.F.

- Corro C., S. (1999).** Método de diseño del Instituto de Ingeniería de la UNAM (DISPAV-5). Proyecto Estructural de Pavimentos Asfálticos. XXIV Congreso Mundial de Carreteras, Capítulo 8. Cd. De México.
- Corro C., S. and Prado O., G. (1999).** Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos, Incluyendo Carreteras de Altas Especificaciones (DISPAV-5 Versión 2.0). Series del Instituto de Ingeniería CI-8. Cd. De México.
- Crespo V., C. (2010).** Vías de Comunicación. México : LIMUSA.
- Dirección de Vialidad y Tránsito (1981).** “Chaussées Neuves a Faible Trafic”. Ministerio de Transporte, Francia.
- Escalante S., C. I. (2006).** Construcción y modernización de carreteras. Revista Asfáltica. Número 4, enero 2006. Asociación Mexicana del Asfalto. México, D. F.
- Huang Y., H. (1969).** Computation of equivalent single-wheel loads using layered theory.- Highway research board.
- Jenks, G. F. (1963).** Generalization in statistical mapping. Annals of the Association of American Geographers, 53: 15-26.
- Jordán L., A. (2005).** Manual de Edafología. Sevilla, España.
- Journel, A. G. and Huijbregts, C. J. (1978).** Minig Geostatistics, Academic Press, New York.
- Juárez B., E. and Rico R., A. (2007).** Mecánica de Suelos . México D.F. LIMUSA. Tomo II.
- Lavaud A., P. (2007).** Construyendo pavimentos asfálticos duraderos. Revista Asfáltica. Número 11, octubre 2007. Asociación Mexicana del Asfalto. México, D. F.
- Magdaleno M., R. (2010).** Tesis. Caracterización geoestadística del suelo de la zona urbana en un valle aluvial: Caso ciudad de Aguascalientes, Ags., México.
- Mendoza, A. (1992).** Enfoques Recientes en la Compactación de Suelos.- Publicación Técnica No. 33.- Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.

Miner M., A. (1945). Cumulative Damage in Fatigue. Transactions of American Society of Mechanical Engineers (ASME), Vol. 67. Estados Unidos de América.

Ministerio de Fomento (2002). Rehabilitación de firmes. Orden circular 9/2002. Series normativas. Dirección General de Carreteras, España.

Ministerio de Obras Públicas (1990). Instrucción 6.1-I.C y 6.2-I.C, Secciones de Firme; Catálogo de Diseño MOPU.- España.

Normativa AASHTO. AASHTO T 193, Método de prueba estándar para determinar la relación de soporte de California (CBR) de un suelo sometido a esfuerzos cortantes.

Normativa AASHTO. AASHTO T 274, Modulo Resiliente de suelos de subrasante.

Normativa AASHTO. AASHTO T 307-99, Método de prueba estándar para determinar el módulo resiliente en suelos y materiales granulares.

Normativa ASTM. ASTM D 4123, Método de prueba estándar de prueba de tensión indirecta para módulo resiliente de mezclas bituminosas.

Normativa ASTM. ASTM D 5340, Método de prueba estándar para encuestas del aeropuerto, índice de calidad de pavimento.

Normativa SCT. M-MMP-1-04/03, Método de prueba estándar de laboratorio para determinar el contenido de agua en suelos.

Normativa SCT. M-MMP-1-06/03, Método de prueba estándar para el análisis de granulometría de materiales compactables para terracerías.

Normativa SCT. M-MMP-1-07/07, Método de prueba estándar para los límites de consistencia.

Normativa SCT. M-MMP-1-11/13, Métodos de muestreo y prueba de materiales. Valor Soporte de California (CBR) y Expansión (Exp) en Laboratorio.

Normativa SCT. M-MMP-4-04-004/02, Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas.

Normativa SCT. N-CMT-1-01/02, Características de los materiales. Materiales para Terraplén.

- Normativa SCT.** N-CMT-1-02/02, Características de los materiales. Materiales para Subyacente.
- Normativa SCT.** N-CMT-1-03/02, Características de los materiales. Materiales para Subrasante.
- Normativa SCT.** N-CMT-4-02-001/11, Características de los materiales. Materiales para Subbases.
- Normativa SCT.** N-CMT-4-02-002/11, Características de los materiales. Materiales para Bases Hidráulicas.
- Normativa SCT.** N-CMT-4-04/08, Características de los materiales. Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.
- Normativa SCT.** N-CMT-4-05-001/06, Características de los materiales. Calidad de Materiales Asfálticos.
- Normativa SCT.** N-CMT-4-05-002/06, Características de los materiales. Calidad de Materiales Asfálticos Modificados.
- Normativa SCT.** M-CAL-1-02/01, Control y aseguramiento de calidad. Criterios estadísticos de muestreo.
- Normativa SCT.** M-CAL-1-03/03, Control y aseguramiento de calidad. Análisis Estadísticos de Control de Calidad.
- Olivera B., F. (2004).** Estructuración de Vías Terrestres. México D. F. CECSA.
- Ramos M., J. E. (1991).** Antecedentes y desarrollo histórico de los pavimentos en México. Memorias del Seminario Internacional de Pavimentos. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.
- Rico. A. (1992).** Consideraciones sobre Compactación de Suelos en Obras de Infraestructura de Transporte.- Documento Técnico No. 7.- Instituto Mexicano del Transporte.- Querétaro, México.
- Romo, M. P. and Torres, R. (1993).** Procedimiento Simplificado para el Diseño Geométrico de Pavimentos Flexibles.- Reporte de Investigación, Instituto de Ingeniería, UNAM., México, D.F.

- Rondón Q., H. A. and Reyes L., F. A. (2007).** Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Bogotá, Colombia.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2008).** Valores de pesos y dimensiones aprobados por la SCT. México DF.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2010).** Normativa para la Infraestructura del Transporte y Calidad de Materiales para Pavimentos y Terracerías.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2011).** Atlas de la Red Carretera de México, México DF.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2011).** Opúsculo del sector Carretero de México, México DF.
- Serment G., V. A. (2011).** Evolución histórica de los pavimentos asfálticos y métodos de diseño de pavimentos. Proyecto Estructural de Pavimentos Asfálticos. XXIV Congreso Mundial de Carreteras, Capítulo 1. Cd. De México.
- Zárate A., M. (2003).** Diseño de Pavimentos Flexibles, primera parte. Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. México, D.F.
- Zárate A., M. (2007).** Diseño de Pavimentos Flexibles, segunda parte. Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. México, D.F.
- Zhang, R., Myers, D. E. y Warrick, A. W. (1992).** Estimation of the Spatial Distribution of Soil Chemical Using Pseudo Cross-Variograms. Soil Science Society of America Journal, Vol. 56, No. 5, pags: 1444-1452.

INTERNET

Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México. Bancos de material. (Documento Web) <http://dgst.sct.gob.mx/index.php?id=546>
7 de marzo del 2012.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Datos Viales de México (Documento Web) <http://dgst.sct.gob.mx/index.php?id=668>
21 de marzo del 2012.

Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Archivos para ArcMap (Documento Web) <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
14 de febrero del 2012.

Servicio Meteorológico Nacional. Datos climáticos de temperatura máxima, mínima y precipitación máxima. (Documento Web)
http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=77
28 de febrero del 2012.

Diccionario Geológico
<http://www.estrucplan.com.ar/contenidos/geologia/DiccionarioGeologico/Index.asp>
9 mayo del 2012.

Organización Meteorológica Mundial.
<http://wwis.aemet.es/093/m093.htm>
16 de enero del 2013.

ANEXOS

**ANEXO A. VALORES DE PESOS Y DIMENSIONES APROBADOS POR LA
SCT EN EL AÑO 2008.**

Tabla A. 1. Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino.

CONFIGURACIÓN DE EJES	TIPO DE CAMINO				
	ET4 Y ET2 Y A2	A4	B4 Y B2	C	D
 SENCILLO DOS LLANTAS	6,50		6,00	5,50	5,00
 SENCILLO CUATRO LLANTAS	10,00		9,50	8,00	7,00
 MOTRIZ SENCILLO CUATRO LLANTAS	11,00		10,50	9,00	8,00
 MOTRIZ DOBLE O TANDEM SEIS LLANTAS	15,00		13,00	11,50	11,00
 DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	17,00		15,00	13,50	12,00
 MOTRIZ DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	18,00		17,00	14,50	13,50
 TRIPLE O TRIDEM DOCE LLANTAS	23,50		22,50	20,00	N/A

N/A = NO AUTORIZADO

⁽¹⁾ En el caso de los vehículos de pasajeros, la Secretaría, con el propósito de promover la seguridad, autoriza descargas en los vehículos que cuenten con suspensión neumática, con una concentración máxima de 7,5 t en el eje delantero.

Tabla A. 2. Peso bruto vehicular máximo por clase de vehículo y camino.

VEHÍCULO Ó CONFIGURACIÓN VEHICULAR	NÚM. DE EJES	NÚM. DE LLANTAS	PESO BRUTO VEHICULAR (t)			
			ET Y A	B	C	D
B2	2	6	17,5	16,5	14,5	13,0
B3	3	8	21,5	19,0	17,0	16,0
B3	3	10	24,5	23,0	20,0	18,5
B4	4	10	27,0	25,0	22,5	21,0
C2	2	6	17,5	16,5	14,5	13,0
C3	3	8	21,5	19,0	17,0	16,0
C3	3	10	24,5	23,0	20,0	18,5
C2-R2	4	14	37,5	35,5	NA	NA
C3-R2	5	18	44,5	42,0	NA	NA
C3-R3	6	22	51,5	47,5	NA	NA
C2-R3	5	18	44,5	41,0	NA	NA
T2-S1	3	10	27,5	26,0	22,5	NA
T2-S2	4	14	34,5	31,5	28,0	NA
T3-S2	5	18	41,5	38,0	33,5	NA
T3-S3	6	22	48,0	45,5	40,0	NA
T2-S3	5	18	41,0	39,0	34,5	NA
T3-S1	4	14	34,5	32,5	28,0	NA
T2-S1-R2	5	18	47,5	45,0	NA	NA
T2-S1-R3	6	22	54,5	50,5	NA	NA
T2-S2-R2	6	22	54,5	50,5	NA	NA
T3-S1-R2	6	22	54,5	51,5	NA	NA
T3-S1-R3	7	26	60,5	57,5	NA	NA
T3-S2-R2	7	26	60,5	57,5	NA	NA
T3-S2-R4	9	34	66,5	66,0	NA	NA
T3-S2-R3	8	30	63,0	62,5	NA	NA
T3-S3-S2	8	30	60,0	60,0	NA	NA
T2-S2-S2	6	22	51,5	46,5	NA	NA
T3-S2-S2	7	26	58,5	53,0	NA	NA

NA – NO AUTORIZADO

Tabla A. 3. Largo máximo autorizado por clase de vehículo y camino.

VEHÍCULO Ó CONFIGURACIÓN	NÚM. DE EJES	NÚM. DE LLANTAS	LARGO TOTAL (m)			
			ET Y A	B	C	D
B2	2	6	14,0	14,0	14,0	12,5
B3	3	8	14,0	14,0	14,0	12,5
B3	3	10	14,0	14,0	14,0	12,5
B4	4	10	14,0	14,0	14,0	12,5
C2	2	6	14,0	14,0	14,0	12,5
C3	3	8	14,0	14,0	14,0	12,5
C3	3	10	14,0	14,0	14,0	12,5
C2-R2	4	14	31,0	28,5	NA	NA
C3-R2	5	18	31,0	28,5	NA	NA
C3-R3	6	22	31,0	28,5	NA	NA
C2-R3	5	18	31,0	28,5	NA	NA
T2-S1	3	10	23,0	20,8	18,5	NA
T2-S2	4	14	23,0	20,8	18,5	NA
T3-S2	5	18	23,0	20,8	18,5	NA
T3-S3	6	22	23,0	20,8	18,5	NA
T2-S1-R2	5	18	31,0	28,5	NA	NA
T2-S1-R3	6	22	31,0	28,5	NA	NA
T2-S2-R2	6	22	31,0	28,5	NA	NA
T3-S1-R2	6	22	31,0	28,5	NA	NA
T3-S1-R3	7	22	31,0	28,5	NA	NA
T3-S2-R2	7	26	31,0	28,5	NA	NA
T3-S2-R4	9	34	31,0	28,5	NA	NA
T3-S2-R3	8	30	31,0	28,5	NA	NA
T3-S3-S2	8	30	25,0	25,0	NA	NA
T2-S3	5	18	23,0	20,0	18,0	NA
T3-S1	4	14	23,0	20,0	18,0	NA
T2-S2-S2	6	22	31,0	28,5	NA	NA
T3-S2-S2	7	26	31,0	28,5	NA	NA

NA – NO AUTORIZADO

Tabla A. 4. Nomenclatura y configuración de vehículos tipo B2.

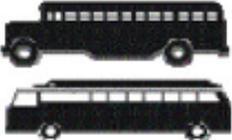
AUTOBÚS (B)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
B2	2	6	
B2	2	6	
B2	2	6	

Tabla A. 5. Nomenclatura y configuración de vehículos tipo C.

CAMIÓN UNITARIO (C)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
C2	2	6	
C3	3	8 ó 10	

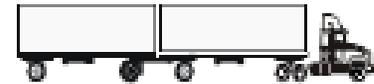
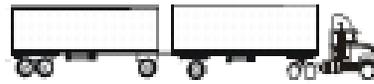
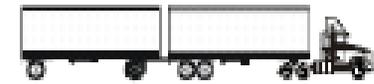
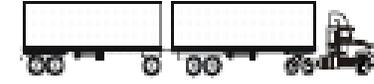
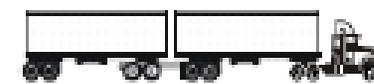
Tabla A. 6. Nomenclatura y configuración de vehículos tipo C2-R2 y diversos.

CAMIÓN - REMOLQUE (C-R)			
NOMENCLATUERA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
C2-R2	4	14	
C3-R2	5	18	
C2-R3	5	18	
C3-R3	6	22	

Tabla A. 7. Nomenclatura y configuración de vehículos tipo T2-S2 y diversos.

TRACTOCAMIÓN ARTICULADO			
NOMENCLATUERA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1	3	10	
T2-S2	4	14	
T2-S3	5	18	
T3-S1	4	14	
T3-S2	5	18	
T3-S3	6	22	

Tabla A. 8. Nomenclatura y configuración de vehículos tipo T2-S2-R3 y diversos.

TRACTOCAMIÓN SEMIREMOLQUE - REMOLQUE (T-S-R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1-R2	5	18	
T2-S2-R2	6	22	
T2-S1-R3	6	22	
T3-S1-R2	6	22	
T3-S1-R3	7	26	
T3-S2-R2(1)	7	26	
T3-S2-R3	8	30	
T3-S2-R4(1)	9	34	
T2-S2-S2	6	22	
T3-S2-S2	7	26	
T3-S3-S2	8	30	

ANEXO B. COEFICIENTES DE DAÑO A DIFERENTES TIPOS DE VEHICULOS.

Tabla B. 1. Coeficiente de daño vehículo tipo A2.



A2 Automóvil

Camino A, B, C	Conjunto	Peso, en ton		p, kg/cm ²	+ d _m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d _v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
	1*	1.0	0.8	2.0	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
	2*	1.0	0.8	2.0	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
	Σ	2.0	1.6		0.004	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

* EJE SENCILLO
 ** EJE TANDEM
 *** EJE TRIPLE

Tabla B. 2. Coeficiente de daño vehículo tipo A' 2.



A'2 Camión ligero, con capacidad de carga hasta de 3 ton

Camino A, B, C	Conjunto	Peso, en ton		p, kg/cm ²	+ d _m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d _v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
	1*	1.7	1.3	4.6	0.268	0.003	0.000	0.000	0.268	0.001	0.000	0.000
	2*	3.8	1.2	4.6	0.268	0.061	0.023	0.015	0.268	0.001	0.000	0.000
	Σ	5.5	2.5		0.536	0.064	0.023	0.015	0.536	0.002	0.000	0.000

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

* EJE SENCILLO
 ** EJE TANDEM
 *** EJE TRIPLE

Tabla B. 3. Coeficiente de daño vehículo tipo B2.



B2 Autobús de dos ejes

	Conjunto	Peso, en ton		p, kg/cm ²	+ d _m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d _v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
Camino A	1*	5.5	3.5	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.079	0.001	0.010
	2*	10.0	7.0	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.679	0.501	0.433
	Σ	15.5	10.5		2.000	1.890	2.457	2.939	2.000	0.757	0.502	0.443
Camino B	1*	5.0	3.5	5.8	1.000	0.261	0.106	0.071	1.000	0.079	0.001	0.010
	2*	9.0	6.5	5.8	1.000	1.234	1.483	1.630	1.000	0.558	0.359	0.292
	Σ	14.0	10.0		2.000	1.495	1.589	1.701	2.000	0.637	0.360	0.302
Camino C	1*	4.0	3.0	5.8	1.000	0.126	0.002	0.021	1.000	0.044	0.009	0.004
	2*	8.0	6.0	5.8	1.000	0.944	0.900	0.878	1.000	0.448	0.249	0.190
	Σ	12.0	9.0		2.000	1.010	0.902	0.899	2.000	0.492	0.258	0.194

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 4. Coeficiente de daño vehículo tipo B3.



B3 Autobús de tres ejes

	Conjunto	Peso, en ton		p, kg/cm ²	+ d _m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d _v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
Camino A	1*	5.5	4.0	5.4	0.666	0.286	0.155	0.116	0.666	0.107	0.034	0.021
	2**	14.0	8.0	5.4	1.333	1.083	0.722	0.735	1.333	0.214	0.057	0.037
	Σ	19.5	12.0		1.999	1.369	0.877	0.852	1.999	0.321	0.091	0.058
Camino B	1*	5.0	4.0	5.4	0.666	0.216	0.099	0.070	0.666	0.107	0.034	0.021
	2**	14.0	7.5	5.4	1.333	1.083	0.722	0.735	1.333	0.172	0.042	0.026
	Σ	19.0	11.5		1.999	1.299	0.821	0.805	1.999	0.279	0.076	0.047
Camino C	1*	4.0	3.5	5.4	0.666	0.107	0.034	0.021	0.666	0.068	0.018	0.010
	2**	14.0	7.5	5.4	1.333	1.083	0.722	0.735	1.333	0.172	0.042	0.026
	Σ	18.0	11.0		1.999	1.190	0.756	0.756	1.999	0.240	0.060	0.036

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 5. Coeficiente de daño vehículo tipo B4.



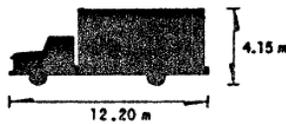
B4 Autobús de cuatro ejes

	Conjunto	Peso, en ton		ρ , kg/cm ²	+ d_m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d_v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
Camino A	1**	7.0	5.0	5.4	1.333	0.136	0.030	0.018	1.333	0.038	0.006	0.003
	2**	14.0	8.0	5.4	1.333	1.083	0.722	0.735	1.333	0.214	0.057	0.037
	Σ	21.0	13.0		2.666	1.219	0.792	0.753	2.666	0.252	0.063	0.040
Camino B	1**	7.0	5.0	5.4	1.333	0.136	0.030	0.018	1.333	0.038	0.006	0.003
	2**	14.0	8.0	5.4	1.333	1.083	0.722	0.735	1.333	0.214	0.057	0.037
	Σ	21.0	13.0		2.666	1.219	0.752	0.753	2.666	0.252	0.063	0.040
Camino C	1**	7.0	5.0	5.4	1.333	0.136	0.030	0.018	1.333	0.038	0.006	0.003
	2**	14.0	8.0	5.4	1.333	1.083	0.722	0.735	1.333	0.214	0.057	0.037
	Σ	21.0	13.0		2.666	1.219	0.752	0.753	2.666	0.252	0.063	0.040

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 6. Coeficiente de daño vehículo tipo C2.



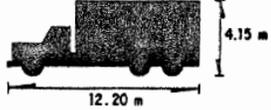
C2 Camión de dos ejes

	Conjunto	Peso, en ton		ρ , kg/cm ²	+ d_m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d_v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
Camino A	1*	5.5	3.5	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.079	0.019	0.010
	2*	10.0	3.0	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.044	0.009	0.004
	Σ	15.5	6.5		2.000	1.890	2.457	2.939	2.000	0.123	0.028	0.014
Camino B	1*	5.0	3.0	5.8	1.000	0.261	0.106	0.071	1.000	0.044	0.009	0.004
	2*	9.0	3.0	5.8	1.000	1.234	1.483	1.630	1.000	0.044	0.009	0.004
	Σ	14.0	6.0		2.000	1.495	1.589	1.701	2.000	0.088	0.018	0.008
Camino C	1*	4.0	2.5	5.8	1.000	0.126	0.036	0.021	1.000	0.022	0.003	0.002
	2*	8.0	2.5	5.8	1.000	0.944	0.900	0.878	1.000	0.022	0.003	0.002
	Σ	12.0	5.0		2.000	1.070	0.936	0.899	2.000	0.044	0.006	0.004

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 7. Coeficiente de daño vehículo tipo C3.



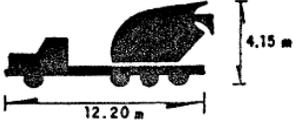
C3 Camión de tres ejes

Conjunto	Peso, en ton		p, kg/cm ²	+ d _m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d _v = Coeficiente de daño vacío				
	+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	
Camino A	1*	5.5	4.0	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.126	0.036	0.021
	2**	18.0	4.5	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.028	0.003	0.002
	Σ	23.5	8.5		3.000	2.817	2.457	2.940	3.000	0.154	0.039	0.023
Camino B	1*	5.0	3.8	5.8	1.000	0.261	0.106	0.071	1.000	0.106	0.028	0.016
	2**	15.0	4.2	5.8	2.000	1.615	1.072	1.089	2.000	0.021	0.002	0.001
	Σ	20.0	8.0		3.000	1.876	1.178	1.160	3.000	0.127	0.030	0.017
Camino C	1*	4.0	3.5	5.4	0.666	0.107	0.034	0.021	0.666	0.068	0.018	0.010
	2**	14.0	4.0	5.4	1.333	1.083	0.722	0.735	1.333	0.015	0.002	0.001
	Σ	18.0	7.5		1.999	1.190	0.756	0.756	1.999	0.083	0.020	0.011

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 8. Coeficiente de daño vehículo tipo C4.



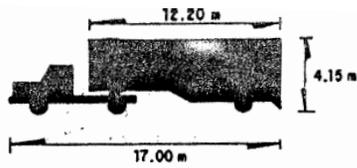
C4 Camión de cuatro ejes

Conjunto	Peso, en ton		p, kg/cm ²	+ d _m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d _v = Coeficiente de daño vacío				
	+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	
Camino A	1*	5.5	4.5	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.187	0.064	0.040
	2***	22.5	8.0	5.8	3.000	2.422	2.289	2.818	3.000	0.084	0.020	0.011
	Σ	28.0	12.5		4.000	2.771	2.456	2.937	4.000	0.271	0.084	0.051

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 9. Coeficiente de daño vehículo tipo T2-S1.



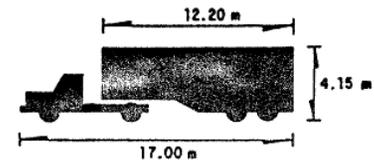
T2-S1 Tractor de dos ejes con semirremolque de un eje

Camino	Conjunto	Peso, en ton		ρ , kg/cm ²	+ d_m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d_v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
Camino A	1*	5.5	3.2	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.057	0.012	0.006
	2*	10.0	3.4	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.071	0.016	0.009
	3*	10.0	3.4	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.071	0.016	0.009
	Σ	25.5	10.0		3.000	3.431	4.747	5.759	3.000	0.199	0.044	0.024
Camino B	1*	5.0	3.0	5.8	1.000	0.261	0.106	0.071	1.000	0.044	0.009	0.004
	2*	9.0	3.0	5.8	1.000	1.234	1.483	1.630	1.000	0.044	0.009	0.004
	3*	9.0	3.0	5.8	1.000	1.234	1.483	1.630	1.000	0.044	0.009	0.004
	Σ	23.0	9.0		3.000	2.729	3.072	3.331	3.000	0.132	0.027	0.012

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 10. Coeficiente de daño vehículo tipo T2-S2.



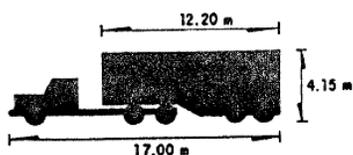
T2-S2 Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes

Camino	Conjunto	Peso, en ton		ρ , kg/cm ²	+ d_m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d_v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
Camino A	1*	5.5	4.0	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.126	0.036	0.021
	2*	10.0	3.5	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.079	0.019	0.010
	3**	18.0	4.0	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.017	0.002	0.001
	Σ	33.5	11.5		4.000	4.358	4.747	5.760	4.000	0.222	0.057	0.032
Camino B	1*	5.0	3.4	5.8	1.000	0.261	0.106	0.071	1.000	0.071	0.016	0.009
	2*	9.0	3.4	5.8	1.000	1.234	1.483	1.630	1.000	0.071	0.016	0.009
	3**	15.0	3.7	5.8	2.000	1.615	1.072	1.089	2.000	0.012	0.001	0.001
	Σ	29.0	10.5		4.000	3.110	2.661	2.790	4.000	0.154	0.033	0.019

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 11. Coeficiente de daño vehículo tipo T3-S2.



T3-S2

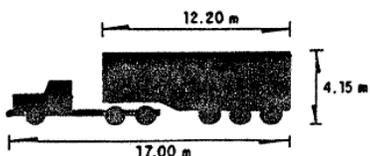
Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes

Camino	Conjunto	Peso, en ton		p, kg/cm ²	+ d _m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d _v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
Camino A	1*	5,5	4,0	5,8	1,000	0,349	0,167	0,119	1,000	0,126	0,036	0,021
	2**	18,0	4,0	5,8	2,000	2,468	2,290	2,821	2,000	0,017	0,002	0,001
	3**	18,0	4,0	5,8	2,000	2,468	2,290	2,821	2,000	0,017	0,002	0,001
	Σ	41,50	12,0		5,000	5,285	4,747	5,761	5,000	0,160	0,040	0,023
Camino B	1*	5,0	3,5	5,8	1,000	0,261	0,106	0,071	1,000	0,079	0,019	0,010
	2**	15,0	4,0	5,8	2,000	1,615	1,072	1,089	2,000	0,017	0,002	0,001
	3**	15,0	4,0	5,8	2,000	1,615	1,072	1,089	2,000	0,017	0,002	0,001
	Σ	35,0	11,5		5,000	3,491	2,250	2,249	5,000	0,113	0,023	0,012

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 12. Coeficiente de daño vehículo tipo T3-S3.



T3-S3

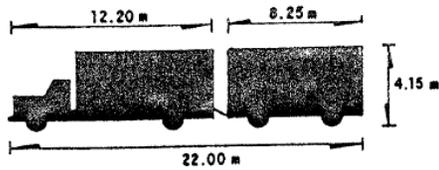
Tractor de tres ejes con semirremolque de tres ejes

Camino	Conjunto	Peso, en ton		p, kg/cm ²	+ d _m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d _v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
Camino A	1*	5,5	4,0	5,8	1,000	0,349	0,167	0,119	1,000	0,126	0,036	0,021
	2**	18,0	4,0	5,8	2,000	2,468	2,290	2,821	2,000	0,017	0,002	0,001
	3***	22,5	5,0	5,8	3,000	2,422	2,289	2,818	3,000	0,011	0,002	0,001
		46,0	13,0		6,000	5,239	4,746	5,758	6,000	0,154	0,040	0,023

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 13. Coeficiente de daño vehículo tipo C2-R2.



C2-R2

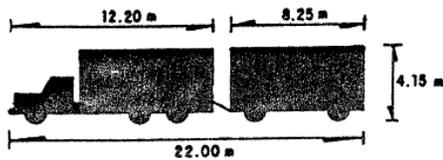
Camión de dos ejes con
remolque de dos ejes

Camino A	Conjunto	Peso, en ton			+ d_m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d_v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío	$p, \text{kg/cm}^2$	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
1*	5,5	3,5	5,8	1,000	0,349	0,167	0,119	1,000	0,079	0,019	0,010	
2*	10,0	3,0	5,8	1,000	1,541	2,290	2,820	1,000	0,044	0,009	0,004	
3*	10,0	2,0	5,8	1,000	1,541	2,290	2,820	1,000	0,009	0,001	0,000	
4*	10,0	2,0	5,8	1,000	1,541	2,290	2,820	1,000	0,009	0,001	0,000	
Σ	35,5	10,5		4,000	4,972	7,037	8,579	4,000	0,141	0,030	0,014	

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 14. Coeficiente de daño vehículo tipo C3-R2.



C3-R2

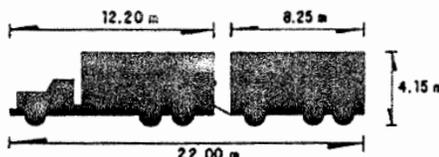
Camión de tres ejes con
remolque de dos ejes

Camino A	Conjunto	Peso, en ton			+ d_m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d_v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío	$p, \text{kg/cm}^2$	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
1*	5,5	4,0	5,8	1,000	0,349	0,167	0,119	1,000	0,126	0,036	0,021	
2**	18,0	4,5	5,8	2,000	2,468	2,290	2,821	2,000	0,028	0,003	0,002	
3*	10,0	2,0	5,8	1,000	1,541	2,290	2,820	1,000	0,009	0,001	0,000	
4*	10,0	2,0	5,8	1,000	1,541	2,290	2,820	1,000	0,009	0,001	0,000	
Σ	43,5	12,5		5,000	5,899	7,037	8,580	5,000	0,172	0,041	0,023	

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 15. Coeficiente de daño vehículo tipo C3-R3.



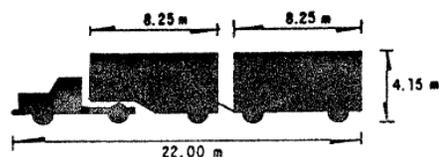
CR-R3 Camión de tres ejes con remolque de tres ejes

Camino	A	Conjunto	Peso, en ton		p, kg/cm ²	+ d _m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d _v = Coeficiente de daño vacío			
			+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
		1*	5.5	4.0	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.126	0.036	0.021
		2**	18.0	4.5	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.028	0.003	0.002
		3*	10.0	2.0	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.009	0.001	0.000
		4**	18.0	3.0	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.005	0.000	0.000
		Σ	51.5	13.5		6.000	6.826	7.037	8.581	6.000	0.168	0.040	0.023

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 16. Coeficiente de daño vehículo tipo T2-S1-R2.



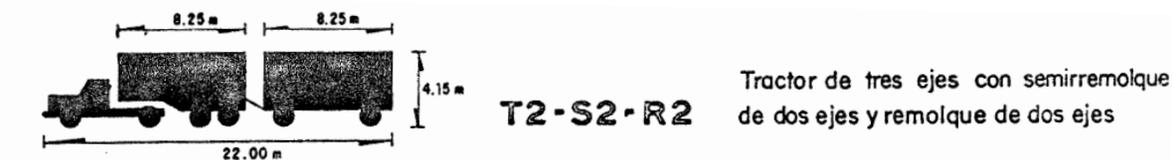
T2-S1-R2 Tractor de dos ejes con semirremolque de un eje y remolque de dos ejes

Camino	A	Conjunto	Peso, en ton		p, kg/cm ²	+ d _m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d _v = Coeficiente de daño vacío			
			+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
		1*	5.5	3.2	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.057	0.012	0.006
		2*	10.0	3.4	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.071	0.016	0.009
		3*	10.0	2.4	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.018	0.003	0.001
		4*	10.0	2.3	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.015	0.002	0.001
		5*	10.0	2.2	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.013	0.002	0.001
		Σ	45.5	13.5		5.000	6.513	9.327	11.399	5.000	0.174	0.035	0.018

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 17. Coeficiente de daño vehículo tipo T2-S2-R2.

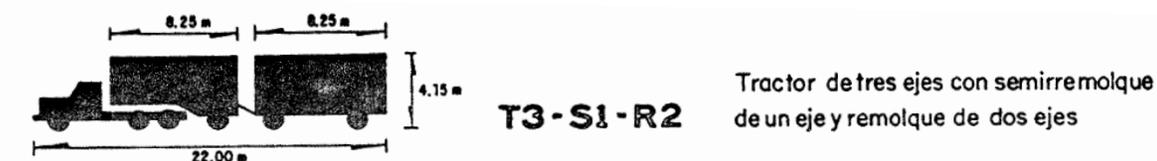


Camino A	Conjunto	Peso, en ton		p, kg/cm ²	+ d _m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d _v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
	1*	5.5	4.0	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.126	0.036	0.021
	2**	10.0	4.0	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.126	0.036	0.021
	3***	18.0	3.5	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.009	0.001	0.000
	4*	10.0	2.3	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.015	0.002	0.001
	5*	10.0	2.2	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.013	0.002	0.001
	Σ	53.5	16.0		6.000	7.440	9.327	11.400	6.000	0.289	0.077	0.044

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 18. Coeficiente de daño vehículo tipo T3-S1-R2.

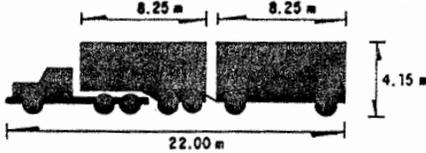


Camino A	Conjunto	Peso, en ton		p, kg/cm ²	+ d _m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d _v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
	1*	5.5	4.0	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.126	0.036	0.021
	2**	18.0	4.0	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.017	0.002	0.001
	3*	10.0	2.5	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.022	0.003	0.002
	4*	10.0	2.3	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.015	0.002	0.001
	5*	10.0	2.2	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.013	0.002	0.001
	Σ	53.5	15.0		6.000	7.440	9.327	11.400	6.000	0.193	0.045	0.026

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 19. Coeficiente de daño vehículo tipo T3-S2-R2.



T3-S2-R2 Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de dos ejes

Camino A	Conjunto	Peso, en ton			+ d_m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d_v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío	p , kg/cm ²	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
	1*	5.5	4.0	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.126	0.036	0.021
	2**	18.0	4.0	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.017	0.002	0.001
	3**	18.0	3.5	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.009	0.001	0.000
	4*	10.0	2.3	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.015	0.002	0.001
	5*	10.0	2.2	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.013	0.002	0.001
	Σ	61.5	16.0		7.000	8.367	9.327	11.401	7.000	0.180	0.043	0.024

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 20. Coeficiente de daño vehículo tipo T3-S2-R3.



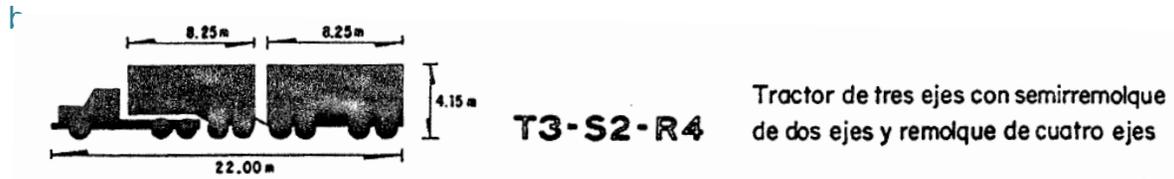
T3-S2-R3 Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de tres ejes

Camino A	Conjunto	Peso, en ton			+ d_m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d_v = Coeficiente de daño vacío			
		+Carga máxima	Vacío	p , kg/cm ²	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
	1*	5.5	4.0	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.126	0.036	0.021
	2**	18.0	4.0	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.017	0.002	0.001
	3**	18.0	3.5	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.009	0.001	0.000
	4*	10.0	2.3	5.8	1.000	1.541	2.290	2.820	1.000	0.015	0.002	0.001
	5**	18.0	3.2	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.006	0.001	0.000
	Σ	69.5	17.0		8.000	9.294	9.327	11.401	8.000	0.173	0.042	0.023

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

Tabla B. 21. Coeficiente de daño vehículo tipo T3-S2-R4.



Camino	A	Conjunto	Peso, en ton		\bar{p} , kg/cm ²	+ d_m = Coeficiente daño bajo carga máxima				d_v = Coeficiente de daño vacío			
			+Carga máxima	Vacío		z = 0	z = 15	z = 30	z = 60	z = 0	z = 15	z = 30	z = 60
			1*	5.5		4.0	5.8	1.000	0.349	0.167	0.119	1.000	0.126
2**	18.0	4.0	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.017	0.002	0.001		
3**	18.0	3.5	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.009	0.001	0.000		
4**	18.0	3.3	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.007	0.001	0.000		
5**	18.0	3.2	5.8	2.000	2.468	2.290	2.821	2.000	0.006	0.001	0.000		
		Σ	77.5	18.0		9.000	10.221	9.327	11.403	9.000	0.165	0.041	0.022

+ Cargas máximas de acuerdo con el "Proyecto de Actualización del Capítulo XI del Reglamento de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, SCT", México, D F, 1978.

- * EJE SENCILLO
- ** EJE TANDEM
- *** EJE TRIPLE

**ANEXO C. TRAMOS CARRETEROS PRINCIPALES Y SECUNDARIOS DE
ACUERDO A LA DGST DE CADA ENTIDAD FEDERATIVA.**

RUTA	NOM_DGST	KMS	EDO
R001	CAMPECHE - MERIDA	159.00	CAMP
R002	CAMPECHE - UMAN	232.00	CAMP
R003	MUNA - FELIPE CARRILLO PUERTO	217.00	QROO
R004	MERIDA - PUERTO JUAREZ	311.00	QROO
R005	VALLADOLID - FELIPE CARRILLO PUERTO	147.00	QROO
R006	VALLADOLID - RIO LAGARTOS	104.10	YUC
R007	CANSAHCAB - TIZIMIN	160.00	YUC
R008	MOTUL - CANSAHCAB	38.00	YUC
R009	MERIDA - DZILAM DE BRAVO	27.10	YUC
R010	MERIDA - CELESTUN	89.30	YUC
R011	HUNUCMA - SISAL	23.00	YUC
R012	MERIDA - PROGRESO	32.50	YUC
R013	FRANCISCO ESCARCEGA - CHAMPOTON	77.00	CAMP
R014	CD. DEL CARMEN - CAMPECHE	195.00	CAMP
R015	VILLAHERMOSA - CD. DEL CARMEN	167.30	CAMP
R016	FRANCISCO ESCARCEGA - CHETUMAL	271.50	QROO
R017	LIBRAMIENTO DE CAMPECHE	26.20	CAMP
R018	VILLAHERMOSA - FRANCISCO ESCARCEGA	297.00	CAMP
R019	SAN MARCO - PALIZADA	67.30	CAMP
R020	JALAPA - JONUTA	5.10	CAMP
R021	RAMAL A NUEVO COAHUILA	80.80	CAMP
R022	HALTUNCHEN - SAN ANTONIO CAYAL	74.70	CAMP
R023	PRESIDENTE DIAZ ORDAZ - SABANCUY	57.40	CAMP
R024	CHENCOYI - TENABO	27.42	CAMP
R025	REFORMA AGRARIA - PUERTO JUAREZ	339.90	QROO
R026	POLYUC - T. C. (REFORMA AGRARIA - PUERTO JUAREZ)	101.10	QROO
R027	KANTUNIL - CANCUN (CUOTA)	308.10	QROO
R028	RAMAL A SUBTENIENTE LOPEZ	3.60	QROO
R029	COATZACOALCOS - VILLAHERMOSA	166.00	TAB
R030	MALPASO - EL BELLOTE	184.50	TAB
R031	VILLAHERMOSA - ESCOPETAZO	61.55	TAB
R032	EL SUSPIRO - TENOSIQUE	71.90	TAB
R033	TENOSIQUE - EL CEIBO	56.50	TAB

R034	AUTOPISTA TUXTLA - SAN CRISTOBAL	43.00	CHIS
R035	ENT. C.N.C - LIM.EDOS.VERACRUZ/CHIAPAS	21.20	CHIS
R036	BENEMERITO DE LAS AMERICAS - PALENQUE	422.00	CHIS
R037	CARRETERA HUIXTLA - EL COJOTE	124.30	CHIS
R038	RAMAL A CD. HIDALGO	26.40	CHIS
R039	RAMAL A CHICOASEN	40.00	CHIS
R040	RAMAL A LA ANGOSTURA	52.00	CHIS
R041	RAMAL A LAGOS DE MONTEBELLO	39.40	CHIS
R042	RAMAL A UNION JUAREZ	28.60	CHIS
R043	RAMAL A SUMIDERO	30.00	CHIS
R044	RAMAL LAS JARITAS	40.50	CHIS
R045	RAMAL LAS CRUCES - ARRIAGA	47.20	CHIS
R046	RAMAL A PUERTO CHIAPAS - ESCOLLERAS	28.40	CHIS
R047	TAPANATEPEC - FRONTERA TALISMAN	310.70	CHIS
R048	TAPANATEPEC - TUXTLA GUTIERREZ	159.00	CHIS
R049	TUXTLA GUTIERREZ - CD. CUAUHTEMOC	256.00	CHIS
R050	VILLAHERMOSA - ESCOPETAZO	259.00	CHIS
R051	CATAZAJA - E. C. TUXTLA-C.D. CUAUTHEMOC	210.00	CHIS
R052	AUTOPISTA OCOZOCOAUTLA-ENT. ANADOR HDEZ.	197.50	CHIS
R053	CD. VALLES - TAMPICO	133.68	VER
R054	ALAMO - CHICONTEPEC - HUEJUTLA	82.70	VER
R055	PACHUCA - TEMPOAL	260.80	VER
R056	ALAZAN - CANOAS	173.00	VER
R057	TUXPAN - TAMPICO	191.00	VER
R058	TIUATLAN - ALAMO - ALAZAN	57.10	VER
R059	PACHUCA - TUXPAN	233.50	VER
R060	POZA RICA - VERACRUZ	211.50	VER
R061	RAMAL PASO POR PAPANTLA	6.00	VER
R062	RAMAL A TECOLUTLA	12.10	VER
R063	TEZIHUTLAN - NAUTLA	93.00	VER
R064	ENT PUNTILLA ALDAMA	3.40	VER
R065	ENT. EL PITAL	3.20	VER
R066	TEZIUTLAN - PEROTE	49.00	VER
R067	PUEBLA - XALAPA	151.00	VER
R068	XALAPA - VERACRUZ	105.80	VER

R069	CARRTRINCONDATOLOME	49.00	VER
R070	LIBRAMIENTO VERACRUZ	30.00	VER
R071	FORTIN - CONEJOS	107.50	VER
R072	TEHUACAN - CORDOBA	79.15	VER
R073	CORDOBA - VERACRUZ	124.00	VER
R074	VERACRUZ - COATZACOALCOS	227.70	VER
R075	LA TINAJA - CD. ALEMAN	79.70	VER
R076	LA TINAJA - COSOLEACAQUE (CUOTA)	136.46	VER
R077	COATZACOALCOS - SALINA CRUZ	140.00	VER
R078	AMAZOC - TEZIUTLAN	105.00	PUE
R079	ENT. CARR. FED. TEZIUTLAN- NAUTLA/RAMAL A HUEYTAMALCO	7.00	PUE
R080	TEPEACA - SAN HIPOLITO	39.90	PUE
R081	SAN HIPOLITO - XALAPA	54.00	PUE
R082	TEHUACAN - HUAJUAPAN	119.40	OAX
R083	LOS REYES - ZACATEPEC	177.90	TLAX
R084	SAN MARTIN - TLAXCALA	21.45	TLAX
R085	SAN MARTIN TEXMELUCAN - APIZACO	35.00	TLAX
R086	LIM EDOS. PUEBLA - TLAXCALA	33.30	TLAX
R087	APIZACO - TEJOCOTAL	34.80	TLAX
R088	LIBRAMIENTO A CUAUTLA	7.00	MOR
R089	CUERNAVACA-CUAUTLIXCO	43.50	MOR
R090	AUTOPISTA CUERNAVACA-ACAPULCO	218.00	GRO
R091	MICHAPA-PUENTE DE IXTLA	14.50	MOR
R092	SAN GREGORIO-OAXTEPEC(44+000- 74+000)	71.50	MOR
R093	ALPUYECA-GRUTAS	32.00	MOR
R094	TLALPAN - CUERNAVACA	71.40	MOR
R095	STA. BARBARA - HUAJUAPAN	219.30	OAX
R096	ACAPULCO - PINOTEPA NACIONAL	207.30	GRO
R097	ACAPULCO - ZIHUATANEJO	239.50	GRO
R098	CHILPANCINGO - ACAPULCO	172.30	GRO
R099	CHILPANCINGO - JILOTEPEC	249.96	GRO
R100	CAYACO - LA HORQUETA [TRAMO 1]	41.00	GRO
R101	CD. ALTAMIRANO - ZIHUATANEJO	187.00	GRO
R102	E.C.[ACAPULCO - ZIHUATANEJO] - LA Y - ATOYAC - EL PARAISO	236.50	GRO
R103	SUBRAMAL A CHICHIHUALCO	4.00	GRO
R104	COYUCA DE CATALAN - AJUCHITLAN [TRAMO 1]	30.00	GRO

R105	COYUCA - LA BARRA	5.90	GRO
R106	RAMAL A SAN PEDRO - EL COYOL	35.00	GRO
R107	FILO DE CABALLOS - TLACOTEPEP	34.95	GRO
R108	ZIHUATANEJO - PLAYA AZUL	100.00	GRO
R109	E.C.[ZIHUATANEJO - PLAYA AZUL] - LA UNION - COAHUAYUTLA	27.50	GRO
R110	TLAPA - MARQUELIA	161.60	GRO
R111	IGUALA - CD. ALTAMIRANO	178.00	GRO
R112	E.C. [IGUALA - CHILPANCINGO] - LIMITES DE PUEBLA	30.45	GRO
R113	TOLUCA - CD. ALTAMIRANO	209.00	GRO
R114	PETAQUILLAS - GRUTAS	35.70	GRO
R115	IXTAPAN DE LA SAL - SAN ALEJO - PILCAYA - TETIPAC	2.90	GRO
R116	PUEBLO HIDALGO - BUENAVISTA - RIO IGUAPA	7.30	GRO
R117	TIERRA COLORADA - CRUZ GRANDE	112.50	GRO
R118	JUCHITAN - AZOYU	15.00	GRO
R119	TAXCO - TETIPAC	19.20	GRO
R120	TLAPA - METLATONOC	14.50	GRO
R121	TLATLAUQUITEPEC - ZAPOTITLAN TABLAS	8.00	GRO
R122	E.C. [CHILPANCINGO - ACATLAN DE OSORIO] - AHUACOTZINGO	24.80	GRO
R123	HUAJUAPAN DE LEON - OAXACA	181.00	OAX
R124	OAXACA - PTO ANGEL	245.40	OAX
R125	OAXACA - TEHUANTEPEC	251.00	OAX
R126	LA VENTOSA - TEPANATEPEC	91.80	OAX
R127	OAXACA - PUERTO ESCONDIDO	57.00	OAX
R128	TEOTITLAN - TUXTEPEC	131.00	OAX
R129	PINOTEPA NACIONAL - SALINA CRUZ	394.00	OAX
R130	TUXTEPEC - PALOMARES	167.00	OAX
R131	TUXTEPEC - OAXACA	212.70	OAX
R132	MEXICO - TOLUCA	52.00	MEX
R133	MEXICO - TOLUCA CUERPO B	44.00	MEX
R134	TOLUCA - CD. ALTAMIRANO	148.00	MEX
R135	TOLUCA - ZITACUARO	71.00	MEX
R136	TOLUCA - PALMILLAS	68.12	MEX
R137	TEXCOCO - ECATEPEC	37.00	MEX
R138	TOLUCA - NAUCALPAN	43.00	MEX
R139	TOLUCA - CD. ALTAMIRANO	148.00	MEX

R140	MEXICO - CUAUTLA	4.20	MEX
R141	ACAMBARO - CELAYA	125.80	GTO
R142	ACAMBARO - MORELIA	57.00	MICH
R143	CELAYA - DOLORES HIDALGO	85.42	GTO
R144	DOLORES HIDALGO - OJUELOS	189.85	GTO
R145	TANQUE BLANCO-SAN MIGUEL ALLENDE TRAMO:LIMEDOS QRO/GTO-SAN M.DEALLENDE	35.11	GTO
R146	LEON - SAN LUIS POTOSI	166.70	SLP
R147	IRAPUATO - LEON	170.00	GTO
R148	IRAPUATO - ZAPOTLANEJO	217.00	JAL
R149	LIM. EDOS. MICH. /GTO. - ACAMBARO	111.20	GTO
R150	LEON - LIM. EDO. GTO.JAL.	17.88	GTO
R151	LA PIEDAD-CD. MANUEL DOBLADO	45.00	GTO
R152	MARAVATIO - ACAMBARO	39.00	GTO
R153	MORELIA - SALAMANCA	107.95	GTO
R154	QUERETARO (LIM. EDOS. QRO. /GTO.) - IRAPUATO	113.70	GTO
R155	QRO. - SAN LUIS POTOSI	196.30	SLP
R156	SALVATIERRA - YURIRIA	27.00	GTO
R157	QUERETARO-SAN LUIS POTOSI TRAMO:RAMAL CANADA DE MORENO	18.80	GTO
R158	SAN LUIS DE LA PAZ - GUANAJUATO	103.29	GTO
R159	SANTA TERESA - SILAO	12.00	GTO
R160	MORELIA - SALAMANCA	109.49	GTO
R161	LEON - AGUASCALIENTES	123.05	AGS
R162	AUTOPISTA QUERETARO-IRAPUATO	104.70	GTO
R163	HUICHAPAN	82.60	QRO
R164	LIBRAMIENTO A TOLUCA	131.50	QRO
R165	MEXICO - QUERETARO	212.00	QRO
R166	QUERETARO - SAN LUIS POTOSI	36.70	QRO
R167	SAN JUAN DEL RIO - ACAMBARO	55.80	QRO
R168	JALPAN - RIO VERDE	105.00	SLP
R169	SAN JUAN DEL RIO - XILITA	277.00	SLP
R170	LIBRAMIENTO SUR PONIENTE DE QUERETARO	46.90	QRO
R171	RAMAL A SAN JOAQUIN	31.80	QRO
R172	PEDRO ESCOBEDO	5.10	QRO
R173	PACHUCA - CD. SAHAGUN	45.00	HID
R174	PORTEZUELO - PALMILLA	73.80	HID

R175	ENT. COLONIA - PORTEZUELO	378.00	SLP
R176	MEXICO - TUXPAN	80.00	HID
R177	PACHUCA - TUXPAN	82.00	HID
R178	JOROBAS - TULA	30.00	HID
R179	MEXICO - PACHUCA	78.00	HID
R180	APIZACO - TEJOCOTAL	113.00	HID
R181	CD. SAHAGUN - EMILIANO ZAPATA	14.00	HID
R182	HUIZACHE - ANTIGUO MORELOS	198.90	TAMP
R183	RAMAL EL SALTO	12.00	SLP
R184	SAN LUIS POTOSI - MATEHUALA	187.00	SLP
R185	ENT. AHUALULCO - ENT. LA BONITA	80.00	SLP
R186	T. CARBONERA - SAN TIBURCIO	79.20	SLP
R187	CD. VALLES - SAN LUIS POTOSI	262.00	SLP
R188	CD. VALLES - CD. VICTORIA	226.90	TAMP
R189	TAMAZUNCHALE - SAN FELIPE ORIZATLAN	27.00	SLP
R190	SAN LUIS POTOSI - OJUELOS	70.23	SLP
R191	MATEHUALA - ENT. PUERTO MEXICO	242.70	COAH
R192	SAN LUIS POTOSI - ZACATECAS	122.47	SLP
R193	LIBRAMIENTO CD. VALLES	11.50	SLP
R194	LIBRAMIENTO VILLA DE ARRIAGA	5.00	SLP
R195	AGUASCALIENTES - JALPA	65.66	AGS
R196	PROVIDENCIA - LUIS MOYA	62.67	AGS
R197	OJUELOS - AGUASCALIENTES	75.01	AGS
R198	FRESNILLO - VALPARAISO	90.00	ZAC
R199	ENT. TESISTAN - ENT. MALPASO	288.00	ZAC
R200	GUADALAJARA - ZACATECAS	312.00	ZAC
R201	JEREZ - FRESNILLO	60.00	ZAC
R202	LIBRAMIENTO NORESTE	17.50	ZAC
R203	ZAMORA - GUADALAJARA	81.50	JAL
R204	GDL-CHAPALA	26.30	JAL
R205	GUADALAJARA - TEPIC	219.00	NAY
R206	LEON - AGUASCALIENTES	99.00	JAL
R207	JIQUILPAN-GUADALAJARA	135.50	JAL
R208	CD. GUZMAN - COLIMA	77.40	JAL
R209	4 CAMINOS - CERCALISA	15.30	JAL
R210	4 CAMINOS - SAN PEDRO	12.50	JAL
R211	GUADALAJARA-ZACATECAS	76.50	JAL
R212	RAMAL AMECA	50.00	JAL
R213	AMECA - MASCOTA	118.10	JAL
R214	STA. CRUZ-MELAQUE	257.40	JAL

R215	L. DE MORENO - GUADALAJARA	186.17	JAL
R216	CELAYA - OJUELOS	197.50	JAL
R217	SAN LUIS POTOSÍ-LAGOS DE MORENO	152.60	JAL
R218	JIQUILPAN - COLIMA	215.00	COL
R219	TEPATITLAN-JARALILLO	58.00	JAL
R220	MANZANILLO - PTO VALLARTA	197.50	JAL
R221	MANZANILLO-MELAHUE	61.40	JAL
R222	LA BARCA-ATOTONILCO	29.03	JAL
R223	RAMAL TOMATLAN	12.40	JAL
R224	VILLA HIDALGO - AGUASCALIENTES	39.80	JAL
R225	LIBRAMIENTO LAGOS DE MORENO	13.20	JAL
R226	ATLACOMULCO - ZAPOTLANEJO (CUOTA)	292.00	SIN
R227	TEPIC - PUERTO VALLARTA	137.00	NAY
R228	COLIMA - ENT. TECOMÁN	38.80	COL
R229	PLAYA AZUL - MANZANILLO	312.40	COL
R230	LIB. MANZANILLO	110.30	COL
R231	LIBRAMIENTO COLOMOS	4.00	COL
R232	MANZANILLO - CIHUATLAN	43.50	COL
R233	MANZANILLO - MINATITLAN	54.00	COL
R234	ATLACOMULCO - MORELIA	134.00	MICH
R235	CARAPAN - PLAYA AZUL	294.00	MICH
R236	LA PIEDAD - CARAPAN	72.00	MICH
R237	MORELIA - JIQUILPAN	101.00	MICH
R238	QUIROGA - TEPALCATEPEC	251.00	MICH
R239	EL TEMAZCAL - CD. ALTAMIRANO	178.00	MICH
R240	BRISEÑAS - SAHUAYO	29.00	MICH
R241	MORELIA - PATZCUARO	48.00	MICH
R242	OPOPEO - TACAMBARO	40.00	MICH
R243	PATZCUARO - URUAPAN	17.00	MICH
R244	RINCONADA - LA PIEDAD	33.00	MICH
R245	ZIHUATANEJO - LA MIRA	123.00	MICH
R246	ZITACUARO - T. EL LIMON	90.00	MICH
R247	ZAMORA - JIQUILPAN	177.00	MICH
R248	TAMPICO - MANTE	153.30	TAMP
R249	SOTO LA MARINA - LA COMA	232.50	TAMP
R250	ENT. TULA - CD. VICTORIA	173.40	TAMP
R251	GONZALEZ - LLERA	88.60	TAMP
R252	ZARAGOZA-TC [CD. VICTORIA-MTY KM 26]	92.65	TAMP
R253	VICTORIA - SOTO LA MARINA	117.50	TAMP
R254	VICTORIA - MATAMOROS	309.90	TAMP

R255	CD. VICTORIA - MONTERREY CPO. B	269.00	NL
R256	URRACAS - REYNOSA	110.00	TAMP
R257	MATAMOROS - REYNOSA	80.00	TAMP
R258	REYNOSA - NUEVO LAREDO	221.10	TAMP
R259	MONTERREY - NUEVO LAREDO	214.00	TAMP
R260	MATAMOROS - PLAYA LAURO VILLAR	37.80	TAMP
R261	SALTILLO - MONTERREY CPO. B	61.45	NL
R262	MONTERREY - CASTAÑOS	155.90	COAH
R263	TORREON - SAN PEDRO	167.00	COAH
R264	PIEDRAS NEGRAS - CD ACUÑA	83.00	COAH
R265	MORELOS - CD ACUÑA	100.00	COAH
R266	SALTILLO - TORREON	246.00	COAH
R267	MONCLOVA - PIEDRAS NEGRAS	240.30	COAH
R268	MONCLOVA - SAN PEDRO DE LAS COLONIAS	265.00	COAH
R269	OJO CALIENTE - SANTA CRUZ	34.00	COAH
R270	ENT. MORELOS - SALTILLO	323.00	COAH
R271	SALTILLO - MONCLOVA	173.60	COAH
R272	MAZATLAN - CULIACAN	215.30	SIN
R273	PIGGY BACK - COSTA RICA	17.00	SIN
R274	CULIACAN - LOS MOCHIS	204.00	SIN
R275	LOS MOCHIS - CD. OBREGON	69.80	SIN
R276	DURANGO - MAZATLAN	255.00	SIN
R277	ENT. LA ZARCA - HIDALGO DEL PARRAL	361.70	DGO
R278	RAMAL A VILLA OCAMPO	1.00	DGO
R279	LOS HERRERA - TOPIA - LOS ALTARES	80.00	DGO
R280	DURANGO - GOMEZ PALACIO	245.00	DGO
R281	DURANGO - H. DEL PARRAL	401.00	CHIH
R282	BERMEJILLO - EL PALMITO	160.00	DGO
R283	GOMEZ PALACIO - TLAHUALILO	72.50	DGO
R284	RAMAL A FCO. I MADERO	3.60	DGO
R285	GOMEZ PALACIO - LA UNION	42.20	DGO
R286	RAMAL A VILLA JUAREZ	12.00	DGO
R287	ZACATECAS - DURANGO	279.50	DGO
R288	ZACATECAS - TORREON	199.10	DGO
R289	LIB. OTE. DE LA CD. DE DURANGO	10.60	DGO
R290	DURANGO - EL MEZQUITAL	82.90	DGO
R291	LIBRAMIENTO CUENCAME	8.20	DGO
R292	RAMAL A SANTA CLARA	14.00	DGO
R293	PEDRICEÑA - RODEO	98.10	DGO

R294	DURANGO - TORREON	255.20	DGO
R295	H. DEL PARRAL - CULIACAN	140.00	CHIH
R296	RAMAL GPE. Y CALVO PARRAL	28.50	CHIH
R297	LA JUNTA - YECORA	344.00	SON
R298	CHIHUAHUA - OJINAGA	195.00	CHIH
R299	JIMENEZ - CHIHUAHUA	209.00	CHIH
R300	EL SUECO - CD. JUAREZ	349.00	CHIH
R301	CD. JUAREZ - JANOS	190.00	CHIH
R302	EL SUECO - JANOS	229.00	CHIH
R303	ENT. PALOMAS - PARRAL	50.00	CHIH
R304	AGUA PRIETA - IMURIS	162.40	SON
R305	SONOYTA - SAN LUIS COLORADO	201.00	SON
R306	SANTA ANA - SONOITA	252.20	SON
R307	SONOYTA - PUERTO PEÑASCO	70.00	SON
R308	JANOS - AGUA PRIETA	156.00	SON
R309	SARIC - SASABE	35.00	SON
R310	HERMOSILLO - NOGALES	272.00	SON
R311	MOCTEZUMA - AGUA PRIETA	150.00	SON
R312	HERMOSILLO - MOCTEZUMA	163.00	SON
R313	CD. OBREGON - HERMOSILLO	251.00	SON
R314	HERMOSILLO - CHIHUAHUA	345.00	SON
R315	SAN LUIS COLORADO - MEXICALI	51.00	BC
R316	MEXICALI - TIJUANA	157.00	BC
R317	MEXICALI - SAN FELIPE	190.60	BC
R318	ENSENADA - EL CHINERO	195.80	BC
R319	TIJUANA - ENSENADA	95.20	BC
R320	PUNTA PRIETA - PARALELO 28	127.60	BC
R321	PUNTA PRIETA - BAHIA DE LOS ANGELES	66.60	BC
R322	LAZARO CARDENAS - PUNTA PRIETA	280.00	BC
R323	ENSENADA - LAZARO CARDENAS	196.00	BC
R324	TECATE - EL SAUZAL	58.50	BC
R325	CABO SAN LUCAS - LA PAZ	185.00	BCS
R326	LA PAZ - CD. INSURGENTES	209.00	BCS
R327	CD. INSURGENTES - LORETO	84.00	BCS
R328	LORETO - SANTA ROSALIA	129.00	BCS
R329	SANTA ROSALIA - GUERRERO NEGRO	189.00	BCS
R330	SAN PEDRO - CABO SAN LUCAS	120.00	BCS
R331	LIB. SAN JOSE DEL CABO	120.20	BCS
R332	RAMAL A SAN CARLOS	14.00	BCS

ANEXO D. TRAMOS CARRETEROS MUESTREADOS.

ID	Código	RUTA	TRAMO	KMS	KM	ESTADO
1	R003	MEX-184	MUNA - FELIPE CARRILLO PUERTO	217.00	3	QUINTANA ROO
2	R125	MEX-190	OAXACA - TEHUANTEPEC	251.00	3	OAXACA
3	R249	MEX-180	SOTO LA MARINA - LA COMA	232.50	3	TAMAULIPAS
4	R311	MEX-017	MOCTEZUMA - AGUA PRIETA	150.00	3	SONORA
5	R306	MEX-002	SANTA ANA - SONOITA	252.00	3	SONORA
6	R250	MEX-101	ENT. TULA - CD. VICTORIA	173.40	3	TAMAULIPAS
7	R143	MEX-051- GTO	CELAYA - DOLORES HIDALGO	85.42	3	GUANAJUATO
8	R016	MEX-186	FRANCISCO ESCARCEGA - CHETUMAL	271.50	3	CAMPECHE
9	R148	MEX-090	IRAPUATO - ZAPOTLANEJO	217.00	3	GUANAJUATO
10	R267	MEX-057	MONCLOVA - PIEDRAS NEGRAS	240.30	3	COAHUILA
11	R323	MEX-001	ENSENADA - LAZARO CARDENAS	196.00	3	BAJA CALIFORNIA
12	R270	MEX-054	ENT. MORELOS - SALTILLO	323.00	3	ZACATECAS
13	R175	MEX-085	ENT. COLONIA - PORTEZUELO	378.00	3	HIDALGO
14	R036	MEX-307	BENEMERITO DE LAS AMERICAS - PALENQUE	422.00	3	CHIAPAS
15	R185	MEX-063	ENT. AHUALULCO - ENT. LA BONITA	80.00	3	SAN LUIS POTOSI
16	R277	MEX-045	ENT. LA ZARCA - HIDALGO DEL PARRAL	361.70	3	DURANGO

17	R329	MEX-001	SANTA ROSALIA - GUERRERO NEGRO	189.00	3	BAJA CALIFORNIA SUR
18	R226D	MEX-015D	ATLACOMULCO - ZAPOTLANEJO (CUOTA)	292.00	3	MICHOACÁN
19	R101	MEX-134	CD. ALTAMIRANO - T. C. (ZIHUATANEJO - LA MIRA)	187.00	3	GUERRERO
20	R299	MEX-045D-MEX	JIMENEZ - CHIHUAHUA	209.00	4	CHIHUAHUA
21	R099	MEX-093	CHILPANCINGO - JILOTEPEC	249.96	3	GUERRERO
22	R056	MEX-127	ALAZAN - CANOAS	173.00	3	VERACRUZ
23	R287	MEX-045	ZACATECAS - DURANGO	279.50	3	ZACATECAS
24	R313	MEX-015D-015	CD. OBREGON - HERMOSILLO	251.00	3	SONORA
25	R004	MEX-180	MERIDA - PUERTO JUAREZ	311.00	3	QUINTANA ROO
26	R016	MEX-186	FRANCISCO ESCARCEGA - CHETUMAL	271.50	3	CAMPECHE
27	R169	MEX-120	SAN JUAN DEL RIO - XILITLA	277.00	3	QUERETARO
28	R266	MEX-040	SALTILLO - TORREON	246.00	3	COAHUILA
29	R161	MEX-045	LEON - AGUASCALIENTES	123.05	3	AGUASCALIENTES
30	R280	MEX-040D	DURANGO - GOMEZ PALACIO (CUOTA)	245.00	3	DURANGO
31	R004	MEX-180	MERIDA - PUERTO JUAREZ	311.00	3	YUCATÁN
32	R298	MEX-016	CHIHUAHUA - OJINAGA	195.00	4	CHIHUAHUA
33	R316	MEX-002	MEXICALI - TIJUANA	157.00	3	BAJA CALIFORNIA
34	R326	MEX-001	LA PAZ - CD. INSURGENTES	209.00	3	BAJA CALIFORNIA SUR
35	R325	MEX-001	CABO SAN LUCAS - LA PAZ	185.00	3	BAJA CALIFORNIA SUR
36	R169	MEX-120	SAN JUAN DEL	277.00	3	QUERETARO

			RIO - XILITLA			
37	R215	MEX-080	LAGOS DE MORENO-GUADALAJARA	186.17	3	JALISCO
38	R086	MEX-119	PUEBLA - TLAXCALA	33.30	3	TLAXCALA
39	R049	MEX-190	TUXTLA GUTIERREZ - CD. CUAUHEMOC	256.00	3	CHIAPAS
40	R081	MEX-140	SAN HIPOLITO - XALAPA	54.00	3	PUEBLA
41	R129	MEX-200	SANTIAGO PINOTEPA NACIONAL - SALINA CRUZ	394.00	3	OAXACA
42	R226	MEX-015	TEPIC - MAZATLAN	292.00	3	NAYARIT
43	R191	MEX-057	MATEHUALA - ENT. PUERTO MEXICO	242.70	3	NUEVO LEON
44	R249	MEX-180	SOTO LA MARINA - LA COMA	232.50	3	TAMAULIPAS
45	R297	MEX-016	LA JUNTA - YECORA	344.00	4	CHIHUAHUA
46	R029	MEX-180	COATZACOALCOS - VILLAHERMOSA	166.00	3	TABASCO
47	R208	MEX-054	CD. GUZMAN - COLIMA	77.40	3	COLIMA
48	R090	MEX-095D	CUERNAVACA - ACAPULCO (CUOTA)	218.00	3	MORELOS
49	R003	MEX-184	MUNA - FELIPE CARRILLO PUERTO	217.00	3	YUCATÁN
50	R313	MEX-015D-015	CD. OBREGON - HERMOSILLO	251.00	3	SONORA
51	R299	MEX-045D-MEX	JIMENEZ - CHIHUAHUA	209.00	4	CHIHUAHUA
52	R018	MEX-186	VILLAHERMOSA - FRANCISCO ESCARCEGA	297.00	3	CAMPECHE
53	R076	MEX-145D	LA TINAJA - COSOLEACAQUE (CUOTA)	136.46	3	VERACRUZ

54	R196	MEX-071	PROVIDENCIA - LUIS MOYA	62.67	3	AGUASCALIENTES
55	R272	MEX-015	MAZATLAN - CULIACAN	215.30	3	SINALOA
56	R287	MEX-045	ZACATECAS - DURANGO	279.50	3	ZACATECAS
57	R322	MEX-001	LAZARO CARDENAS - PUNTA PRIETA	280.00	3	BAJA CALIFORNIA
58	R226D	MEX-015D	ATLACOMULCO - ZAPOTLANEJO (CUOTA)	292.00	3	MICHOACÁN
59	R016	MEX-186	FRANCISCO ESCARCEGA - CHETUMAL	271.50	3	QUINTANA ROO
60	R025	MEX-307	REFORMA AGRARIA - PUERTO JUAREZ	339.90	3	QUINTANA ROO
61	R300	MEX-045D- MEX	EL SUECO - CD. JUAREZ	349.00	4	CHIHUAHUA
62	R280	MEX-040D	DURANGO - GOMEZ PALACIO (CUOTA)	245.00	3	DURANGO
63	R048	MEX-190	TAPANATEPEC - TUXTLA GUTIERREZ	159.00	3	CHIAPAS
64	R056	MEX-127	ALAZAN - CANOAS	173.00	3	VERACRUZ
65	R004	MEX-180	MERIDA - PUERTO JUAREZ	311.00	3	YUCATÁN
66	R271	MEX-057	SALTILLO - MONCLOVA	173.60	3	COAHUILA
67	R126	MEX-190	LA VENTOSA - TEPANATEPEC	91.80	3	OAXACA
68	R297	CHIH-D- MEX-001-C	LA JUNTA - YECORA	344.00	4	CHIHUAHUA
69	R217	MEX-070-080	SAN LUIS POTOSÍ- LAGOS DE MORENO	152.60	3	JALISCO
70	R238	MEX-120	QUIROGA - TEPALCATEPEC	251.00	3	MICHOACÁN
71	R047	MEX-200	TAPANATEPEC - TALISMAN	310.70	3	CHIAPAS
72	R302	MEX-010	EL SUECO - JANOS	229.00	4	CHIHUAHUA

73	R259	MEX-085	MONTERREY - NUEVO LAREDO	214.00	3	NUEVO LEON
74	R022	MEX-188	HALTUNCHEN - SAN ANTONIO CAYAL	74.70	3	CAMPECHE
75	R256	MEX-097	LAS URRACAS - T. C. (MATAMOROS - REYNOSA)	110.00	3	TAMAULIPAS
76	R031	MEX-195	VILLAHERMOSA - ESCOPETAZO	61.55	3	CHIAPAS
77	R068	MEX-140	XALAPA - VERACRUZ	105.80	3	VERACRUZ
78	R191	MEX-057	MATEHUALA - ENT. PUERTO MEXICO	242.70	3	NUEVO LEON
79	R268	MEX-030	MONCLOVA - SAN PEDRO DE LAS COLONIAS	265.00	3	COAHUILA
80	R184	MEX-057	SAN LUIS POTOSI - MATEHUALA	187.00	3	SAN LUIS POTOSI
81	R187	MEX-070	CD. VALLES - SAN LUIS POTOSI	262.00	3	SAN LUIS POTOSI
82	R214	MEX-080	ENT. SANTA CRUZ - MELAQUE	257.40	3	JALISCO
83	R199	MEX-023	ENT. TESISITAN - ENT. MALPASO	288.00	3	ZACATECAS
84	R139	MEX-134	TOLUCA - CD. ALTAMIRANO	148.00	3	EDO. DE MEXICO
85	R128	OAX-PUE- MEX-182	TEOTITLAN DE FLORES MAGON - TUXTEPEC	131.00	3	OAXACA
86	R147	MEX-045	IRAPUATO - LEON	170.00	3	GUANAJUATO
87	R123	MEX-190	HUAJUAPAN DE LEON - OAXACA	181.00	3	OAXACA
88	R306	MEX-002	SANTA ANA - SONOITA	252.00	3	SONORA

ANEXO E. KILOMETROS MUESTREADOS POR CADA TRAMO CARRETERO.

Código	Tramo	Total de Km	Coef.	Km Inicial	Km Final	Km a ensayar	Estado
R003	MUNA - FELIPE CARRILLO PUERTO	217.00	0.885	192	194	3	QUINTANA ROO
R125	OAXACA - TEHUANTEPEC	251.00	0.705	177	179	3	OAXACA
R249	SOTO LA MARINA - LA COMA	232.50	0.658	153	155	3	TAMAULIPAS
R311	MOCTEZUMA - AGUA PRIETA	150.00	0.967	145	147	3	SONORA
R306	SANTA ANA - SONOITA	252.00	0.726	183	185	3	SONORA
R250	ENT. TULA - CD. VICTORIA	173.40	0.461	80	82	3	TAMAULIPAS
R143	CELAYA - DOLORES HIDALGO	85.42	0.831	71	73	3	GUANAJUATO
R016	FRANCISCO ESCARCEGA - CHETUMAL	271.50	0.608	165	167	3	CAMPECHE
R148	IRAPUATO - ZAPOTLANEJO	217.00	0.083	18	20	3	GUANAJUATO
R267	MONCLOVA - PIEDRAS NEGRAS	240.30	0.341	82	84	3	COAHUILA
R323	ENSENADA - LAZARO CARDENAS	196.00	0.413	81	83	3	BAJA CALIFORNIA
R270	ENT. MORELOS - SALTILLO	323.00	0.375	121	123	3	ZACATECAS
R175	ENT. COLONIA - PORTEZUELO	378.00	0.153	58	60	3	HIDALGO
R036	BENEMERITO DE LAS AMERICAS - PALENQUE	422.00	0.033	14	16	3	CHIAPAS
R185	ENT. AHUALULCO - ENT. LA BONITA	80.00	0.938	75	77	3	SAN LUIS POTOSI
R277	ENT. LA ZARCA - HIDALGO DEL PARRAL	361.70	0.868	314	316	3	DURANGO
R329	SANTA ROSALIA - GUERRERO	189.00	0.619	117	119	3	BAJA CALIFORNIA SUR

	NEGRO						
R226D	ATLACOMULCO - ZAPOTLANEJO (CUOTA)	292.00	0.682	199	201	3	MICHOACÁN
R101	CD. ALTAMIRANO - T. C. (ZIHUATANEJO - LA MIRA)	187.00	0.925	173	175	3	GUERRERO
R299	JIMENEZ - CHIHUAHUA	209.00	0.057	12	15	4	CHIHUAHUA
R099	CHILPANCINGO - JILOTEPEC	249.96	0.124	31	33	3	GUERRERO
R056	ALAZAN - CANOAS	173.00	0.705	122	124	3	VERACRUZ
R287	ZACATECAS - DURANGO	279.50	0.154	43	45	3	ZACATECAS
R313	CD. OBREGON - HERMOSILLO	251.00	0.151	38	40	3	SONORA
R004	MERIDA - PUERTO JUAREZ	311.00	0.977	304	306	3	QUINTANA ROO
R016	FRANCISCO ESCARCEGA - CHETUMAL	271.50	0.044	12	14	3	CAMPECHE
R169	SAN JUAN DEL RIO - XILITLA	277.00	0.733	203	205	3	QUERETARO
R266	SALTILLO - TORREON	246.00	0.650	160	162	3	COAHUILA
R161	LEON - AGUASCALIENTES	123.05	0.926	114	116	3	AGUASCALIENTES
R280	DURANGO - GOMEZ PALACIO (CUOTA)	245.00	0.249	61	63	3	DURANGO
R004	MERIDA - PUERTO JUAREZ	311.00	0.148	46	48	3	YUCATÁN
R298	CHIHUAHUA - OJINAGA	195.00	0.569	111	114	4	CHIHUAHUA
R316	MEXICALI - TIJUANA	157.00	0.503	79	81	3	BAJA CALIFORNIA
R326	LA PAZ - CD. INSURGENTES	209.00	0.981	205	207	3	BAJA CALIFORNIA SUR
R325	CABO SAN LUCAS - LA PAZ	185.00	0.373	69	71	3	BAJA CALIFORNIA SUR
R169	SAN JUAN DEL RIO - XILITLA	277.00	0.105	29	31	3	QUERETARO

R215	LAGOS DE MORENO-GUADALAJARA	186.17	0.279	52	54	3	JALISCO
R086	PUEBLA - TLAXCALA	33.30	0.781	26	28	3	TLAXCALA
R049	TUXTLA GUTIERREZ - CD. CUAUHTEMOC	256.00	0.660	169	171	3	CHIAPAS
R081	SAN HIPOLITO - XALAPA	54.00	0.907	49	51	3	PUEBLA
R129	SANTIAGO PINOTEPA NACIONAL - SALINA CRUZ	394.00	0.102	40	42	3	OAXACA
R226	TEPIC - MAZATLAN	292.00	0.476	139	141	3	NAYARIT
R191	MATEHUALA - ENT. PUERTO MEXICO	242.70	0.206	50	52	3	NUEVO LEON
R249	SOTO LA MARINA - LA COMA	232.50	0.082	19	21	3	TAMAULIPAS
R297	LA JUNTA - YECORA	344.00	0.924	318	321	4	CHIHUAHUA
R029	COATZACOALCOS - VILLAHERMOSA	166.00	0.855	142	144	3	TABASCO
R208	CD. GUZMAN - COLIMA	77.40	0.310	24	26	3	COLIMA
R090	CUERNAVACA - ACAPULCO (CUOTA)	218.00	0.468	102	104	3	MORELOS
R003	MUNA - FELIPE CARRILLO PUERTO	217.00	0.424	92	94	3	YUCATÁN
R313	CD. OBREGON - HERMOSILLO	251.00	0.845	212	214	3	SONORA
R299	JIMENEZ - CHIHUAHUA	209.00	0.890	186	189	4	CHIHUAHUA
R018	VILLAHERMOSA - FRANCISCO ESCARCEGA	297.00	0.710	211	213	3	CAMPECHE
R076	LA TINAJA - COSOLEACAQUE (CUOTA)	136.46	0.857	117	119	3	VERACRUZ

R196	PROVIDENCIA - LUIS MOYA	62.67	0.654	41	43	3	AGUASCALIENTES
R272	MAZATLAN - CULIACAN	215.30	0.929	200	202	3	SINALOA
R287	ZACATECAS - DURANGO	279.50	0.558	156	158	3	ZACATECAS
R322	LAZARO CARDENAS - PUNTA PRIETA	280.00	0.593	166	168	3	BAJA CALIFORNIA
R226D	ATLACOMULCO - ZAPOTLANEJO (CUOTA)	292.00	1.216	355	357	3	MICHOACÁN
R016	FRANCISCO ESCARCEGA - CHETUMAL	271.50	0.873	237	239	3	QUINTANA ROO
R025	REFORMA AGRARIA - PUERTO JUAREZ	339.90	0.791	269	271	3	QUINTANA ROO
R300	EL SUECO - CD. JUAREZ	349.00	0.785	274	277	4	CHIHUAHUA
R280	DURANGO - GOMEZ PALACIO (CUOTA)	245.00	0.771	189	191	3	DURANGO
R048	TAPANATEPEC - TUXTLA GUTIERREZ	159.00	0.484	77	79	3	CHIAPAS
R056	ALAZAN - CANOAS	173.00	0.197	34	36	3	VERACRUZ
R004	MERIDA - PUERTO JUAREZ	311.00	0.559	174	176	3	YUCATÁN
R271	SALTILLO - MONCLOVA	173.60	0.559	97	99	3	COAHUILA
R126	LA VENTOSA - TEPANATEPEC	91.80	0.926	85	87	3	OAXACA
R297	LA JUNTA - YECORA	344.00	0.058	20	23	4	CHIHUAHUA
R217	SAN LUIS POTOSÍ- LAGOS DE MORENO	152.60	0.747	114	116	3	JALISCO
R238	QUIROGA - TEPALCATEPEC	251.00	0.833	209	211	3	MICHOACÁN
R047	TAPANATEPEC - TALISMAN	310.70	0.335	104	106	3	CHIAPAS
R302	EL SUECO - JANOS	229.00	0.803	184	187	4	CHIHUAHUA

R259	MONTERREY - NUEVO LAREDO	214.00	0.313	67	69	3	NUEVO LEON
R022	HALTUNCHEN - SAN ANTONIO CAYAL	74.70	0.107	8	10	3	CAMPECHE
R256	LAS URRACAS - T. C. (MATAMOROS - REYNOSA)	110.00	0.227	25	27	3	TAMAULIPAS
R031	VILLAHERMOSA - ESCOPETAZO	61.55	3.396	209	211	3	CHIAPAS
R068	XALAPA - VERACRUZ	105.80	0.189	20	22	3	VERACRUZ
R191	MATEHUALA - ENT. PUERTO MEXICO	242.70	0.721	175	177	3	NUEVO LEON
R268	MONCLOVA - SAN PEDRO DE LAS COLONIAS	265.00	0.721	191	193	3	COAHUILA
R184	SAN LUIS POTOSI - MATEHUALA	187.00	0.053	10	12	3	SAN LUIS POTOSI
R187	CD. VALLES - SAN LUIS POTOSI	262.00	0.622	163	165	3	SAN LUIS POTOSI
R214	ENT. SANTA CRUZ - MELAQUE	257.40	0.478	123	125	3	JALISCO
R199	ENT. TESISTAN - ENT. MALPASO	288.00	0.354	102	104	3	ZACATECAS
R139	TOLUCA - CD. ALTAMIRANO	148.00	0.189	28	30	3	EDO. DE MEXICO
R128	TEOTITLAN DE FLORES MAGON - TUXTEPEC	131.00	0.611	80	82	3	OAXACA
R147	IRAPUATO - LEON	170.00	0.818	139	141	3	GUANAJUATO
R123	HUAJUAPAN DE LEON - OAXACA	181.00	0.624	113	115	3	OAXACA
R306	SANTA ANA - SONOITA	252.00	0.079	20	22	3	SONORA

ANEXO F. MODULO RESILIENTE DE CADA TRAMO CARRETERO.

Código de la Ruta	Tramo	Estado	Km Inicial	Km Final	M_R (MPa)
R003	MUNA - FELIPE CARRILLO PUERTO	QUINTANA ROO	192	194	<u>2845</u>
R003	MUNA - FELIPE CARRILLO PUERTO	YUCATÁN	92	94	<u>2584</u>
R004	MERIDA - PUERTO JUAREZ	QUINTANA ROO	304	306	<u>3004</u>
R004	MERIDA - PUERTO JUAREZ	YUCATÁN	46	48	<u>2344</u>
R004	MERIDA - PUERTO JUAREZ	YUCATÁN	174	176	<u>2805</u>
R016	FRANCISCO ESCARCEGA - CHETUMAL	CAMPECHE	12	14	<u>3175</u>
R016	FRANCISCO ESCARCEGA - CHETUMAL	CAMPECHE	165	167	<u>2358</u>
R016	FRANCISCO ESCARCEGA - CHETUMAL	QUINTANA ROO	237	239	<u>2306</u>
R018	VILLAHERMOSA - FRANCISCO ESCARCEGA	CAMPECHE	211	213	<u>2339</u>
R022	HALTUNCHEN - SAN ANTONIO CAYAL	CAMPECHE	8	10	<u>2560</u>
R025	REFORMA AGRARIA - PUERTO JUAREZ	QUINTANA ROO	269	271	<u>2095</u>
R029	COATZACOALCOS - VILLAHERMOSA	TABASCO	142	144	<u>3442</u>
R031	VILLAHERMOSA - ESCOPETAZO	CHIAPAS	209	211	<u>3111</u>
R036	BENEMERITO DE LAS AMERICAS - PALENQUE	CHIAPAS	14	16	<u>3034</u>
R047	TAPANATEPEC - TALISMAN	CHIAPAS	104	106	<u>4176</u>
R048	TAPANATEPEC - TUXTLA GUTIERREZ	CHIAPAS	77	79	<u>1548</u>
R049	TUXTLA GUTIERREZ - CD. CUAUHTEMOC	CHIAPAS	169	171	<u>2301</u>
R056	ALAZAN - CANOAS	VERACRUZ	122	124	<u>1811</u>

R056	ALAZAN - CANOAS	VERACRUZ	34	36	<u>2924</u>
R068	XALAPA - VERACRUZ	VERACRUZ	20	22	<u>1959</u>
R076	LA TINAJA - COSOLEACAQUE (CUOTA)	VERACRUZ	117	119	<u>1402</u>
R081	SAN HIPOLITO - XALAPA	PUEBLA	49	51	<u>1072</u>
R086	PUEBLA - TLAXCALA	TLAXCALA	26	28	<u>1269</u>
R090	CUERNAVACA - ACAPULCO (CUOTA)	MORELOS	102	104	<u>1788</u>
R099	CHILPANCINGO - JILOTEPEC	GUERRERO	31	33	<u>1476</u>
R101	CD. ALTAMIRANO - T. C. (ZIHUATANEJO - LA MIRA)	GUERRERO	173	175	<u>1932</u>
R123	HUAJUAPAN DE LEON - OAXACA	OAXACA	113	115	<u>2565</u>
R125	OAXACA - TEHUANTEPEC	OAXACA	177	179	<u>2408</u>
R126	LA VENTOSA - TEPANATEPEC	OAXACA	85	87	<u>2191</u>
R128	TEOTITLAN DE FLORES MAGON - TUXTEPEC	OAXACA	80	82	<u>1756</u>
R129	SANTIAGO PINOTEPA NACIONAL - SALINA CRUZ	OAXACA	40	42	<u>1952</u>
R139	TOLUCA - CD. ALTAMIRANO	EDO. DE MEXICO	28	30	<u>1441</u>
R143	CELAYA - DOLORES HIDALGO	GUANAJUATO	71	73	<u>3155</u>
R147	IRAPUATO - LEON	GUANAJUATO	139	141	<u>1889</u>
R148	IRAPUATO - ZAPOTLANEJO	GUANAJUATO	18	20	<u>2576</u>
R161	LEON - AGUASCALIENTES	AGUASCALIENTES	114	116	<u>1966</u>
R169	SAN JUAN DEL RIO - XILITLA	QUERETARO	29	31	<u>2191</u>
R169	SAN JUAN DEL RIO - XILITLA	QUERETARO	203	205	<u>3110</u>
R175	ENT. COLONIA -	HIDALGO	58	60	<u>2339</u>

	PORTEZUELO				
R184	SAN LUIS POTOSI - MATEHUALA	SAN LUIS POTOSI	10	12	<u>2437</u>
R185	ENT. AHUALULCO - ENT. LA BONITA	SAN LUIS POTOSI	75	77	<u>2136</u>
R187	CD. VALLES - SAN LUIS POTOSI	SAN LUIS POTOSI	163	165	<u>2291</u>
R191	MATEHUALA - ENT. PUERTO MEXICO	NUEVO LEON	175	177	<u>3455</u>
R191	MATEHUALA - ENT. PUERTO MEXICO	NUEVO LEON	50	52	<u>2035</u>
R196	PROVIDENCIA - LUIS MOYA	AGUASCALIENTES	41	43	<u>2990</u>
R199	ENT. TESISTAN - ENT. MALPASO	ZACATECAS	102	104	<u>1492</u>
R208	CD. GUZMAN - COLIMA	COLIMA	24	26	<u>3705</u>
R214	ENT. SANTA CRUZ - MELAQUE	JALISCO	123	125	<u>2957</u>
R215	LAGOS DE MORENO - GUADALAJARA	JALISCO	52	54	<u>2934</u>
R217	SAN LUIS POTOSÍ - LAGOS DE MORENO	JALISCO	114	116	<u>3052</u>
R226	TEPIC - MAZATLAN	NAYARIT	139	141	<u>2208</u>
R226D	ATLACOMULCO - ZAPOTLANEJO (CUOTA)	MICHOACÁN	355	357	<u>2284</u>
R226D	ATLACOMULCO - ZAPOTLANEJO (CUOTA)	MICHOACÁN	199	201	<u>2066</u>
R238	QUIROGA - TEPALCATEPEC	MICHOACÁN	209	211	<u>3109</u>
R249	SOTO LA MARINA - LA COMA	TAMAULIPAS	19	21	<u>2896</u>
R249	SOTO LA MARINA - LA COMA	TAMAULIPAS	153	155	<u>2917</u>
R250	ENT. TULA - CD. VICTORIA	TAMAULIPAS	80	82	<u>1935</u>
R256	LAS URRACAS - T. C. (MATAMOROS - REYNOSA)	TAMAULIPAS	25	27	<u>2522</u>
R259	MONTERREY - NUEVO LAREDO	NUEVO LEON	67	69	<u>3062</u>

R266	SALTILLO - TORREON	COAHUILA	160	162	<u>2220</u>
R267	MONCLOVA - PIEDRAS NEGRAS	COAHUILA	82	84	<u>3034</u>
R268	MONCLOVA - SAN PEDRO DE LAS COLONIAS	COAHUILA	191	193	<u>3732</u>
R270	ENT. MORELOS - SALTILLO	ZACATECAS	121	123	<u>2701</u>
R271	SALTILLO - MONCLOVA	COAHUILA	97	99	<u>3651</u>
R272	MAZATLAN - CULIACAN	SINALOA	200	202	<u>1868</u>
R277	ENT. LA ZARCA - HIDALGO DEL PARRAL	DURANGO	314	316	<u>2465</u>
R280	DURANGO - GOMEZ PALACIO (CUOTA)	DURANGO	61	63	<u>1957</u>
R280	DURANGO - GOMEZ PALACIO (CUOTA)	DURANGO	189	191	<u>2326</u>
R287	ZACATECAS - DURANGO	ZACATECAS	43	45	<u>2634</u>
R287	ZACATECAS - DURANGO	ZACATECAS	156	158	<u>1704</u>
R297	LA JUNTA - YECORA	CHIHUAHUA	318	321	<u>1823</u>
R297	LA JUNTA - YECORA	CHIHUAHUA	20	23	<u>2242</u>
R298	CHIHUAHUA - OJINAGA	CHIHUAHUA	111	114	<u>1812</u>
R299	JIMENEZ - CHIHUAHUA	CHIHUAHUA	186	189	<u>2112</u>
R299	JIMENEZ - CHIHUAHUA	CHIHUAHUA	12	15	<u>1637</u>
R300	EL SUECO - CD. JUAREZ	CHIHUAHUA	274	277	<u>2386</u>
R302	EL SUECO - JANOS	CHIHUAHUA	184	187	<u>2447</u>
R306	SANTA ANA - SONOITA	SONORA	20	22	<u>3357</u>
R306	SANTA ANA - SONOITA	SONORA	183	185	<u>2435</u>
R311	MOCTEZUMA - AGUA PRIETA	SONORA	145	147	<u>1980</u>
R313	CD. OBREGON - HERMOSILLO	SONORA	38	40	<u>2616</u>

R313	CD. OBREGON - HERMOSILLO	SONORA	212	214	<u>2320</u>
R316	MEXICALI - TIJUANA	BAJA CALIFORNIA	79	81	<u>2453</u>
R322	LAZARO CARDENAS - PUNTA PRIETA	BAJA CALIFORNIA	166	168	<u>3893</u>
R323	ENSENADA - LAZARO CARDENAS	BAJA CALIFORNIA	81	83	<u>2457</u>
R325	CABO SAN LUCAS - LA PAZ	BAJA CALIFORNIA SUR	69	71	<u>2809</u>
R326	LA PAZ - CD. INSURGENTES	BAJA CALIFORNIA SUR	205	207	<u>2029</u>
R329	SANTA ROSALIA - GUERRERO NEGRO	BAJA CALIFORNIA SUR	117	119	<u>2665</u>