



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:

**“INFLUENCIA CLIMATOLÓGICA EN LA ZONIFICACIÓN DEL GRADO DE
DESEMPEÑO PARA EL DISEÑO DE CEMENTOS ASFALTICOS PARA EL ESTADO
DE MICHOACÁN”**

TESIS

Autor:

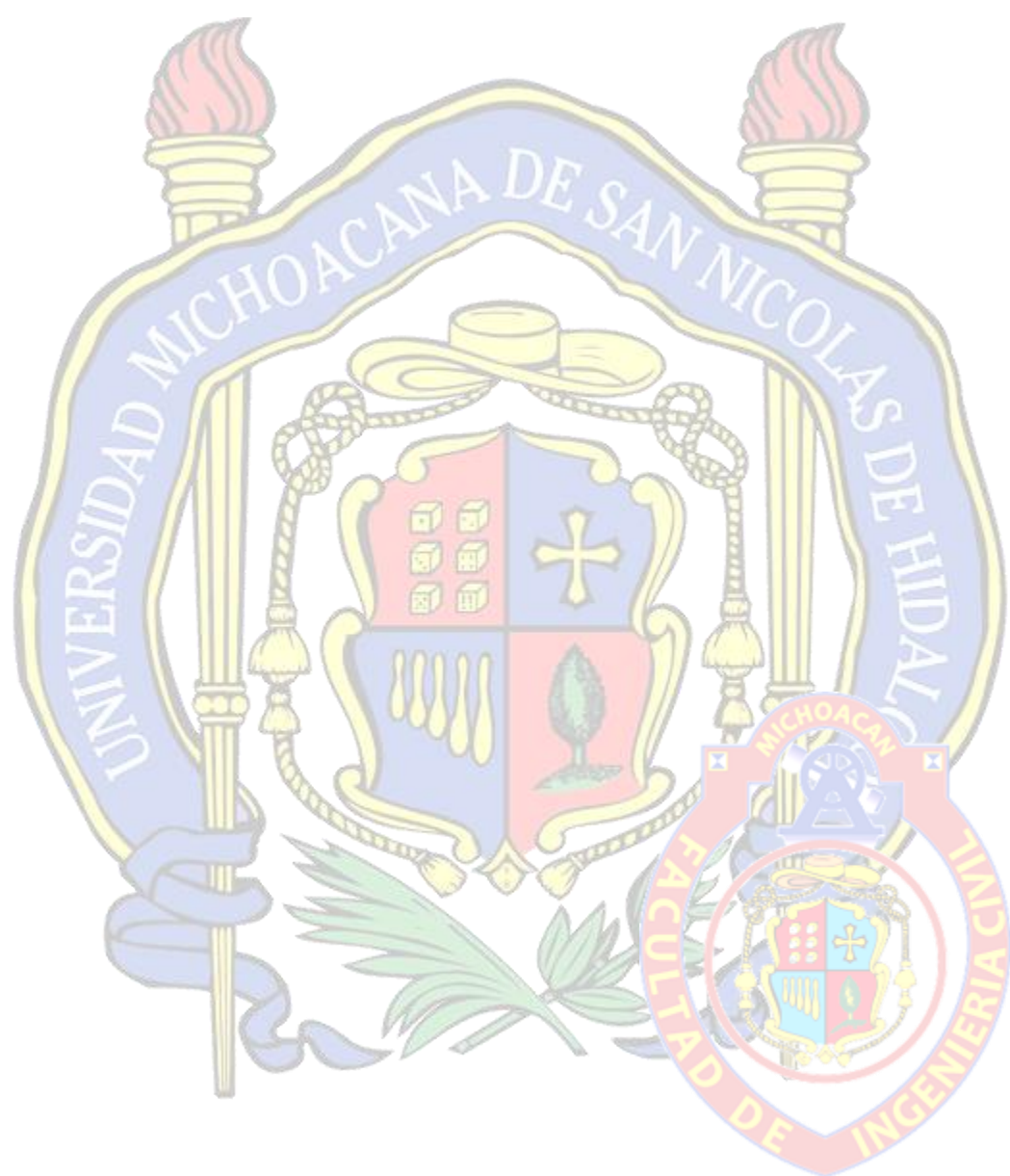
Gerardo Gutiérrez López

Para obtener grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Asesor:

Dr. Jorge Alarcón Ibarra
Doctor en Ingeniería Civil

Morelia, Michoacán
Agosto 2017



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Civil

Tesis:

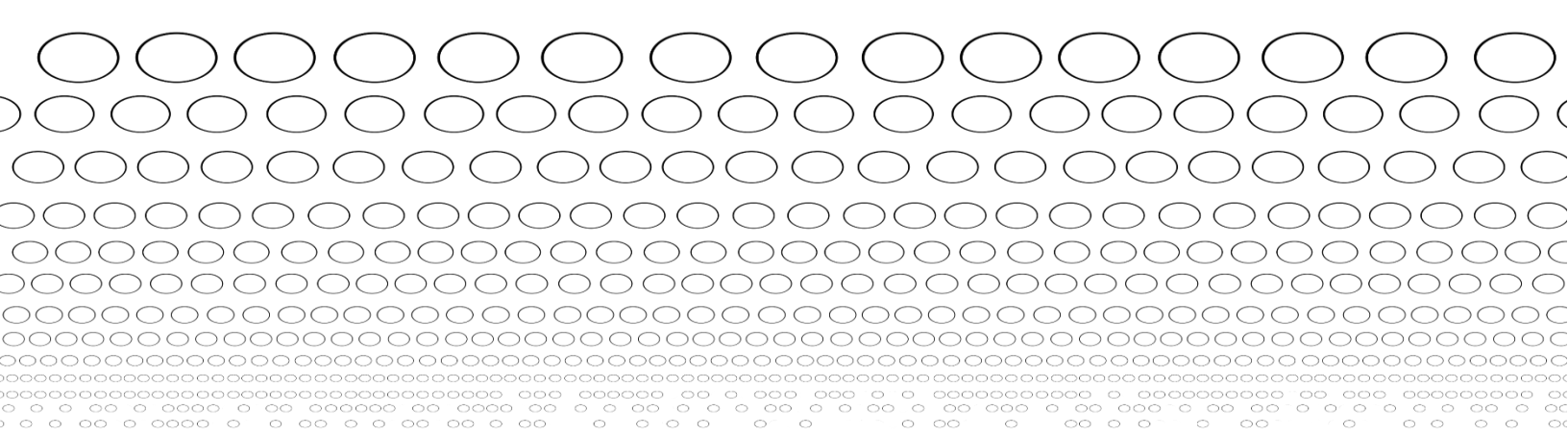
Influencia climatológica en la Zonificación del Grado de
Desempeño para la Selección de Cementos Asfálticos para
el Estado de Michoacán

Autor:

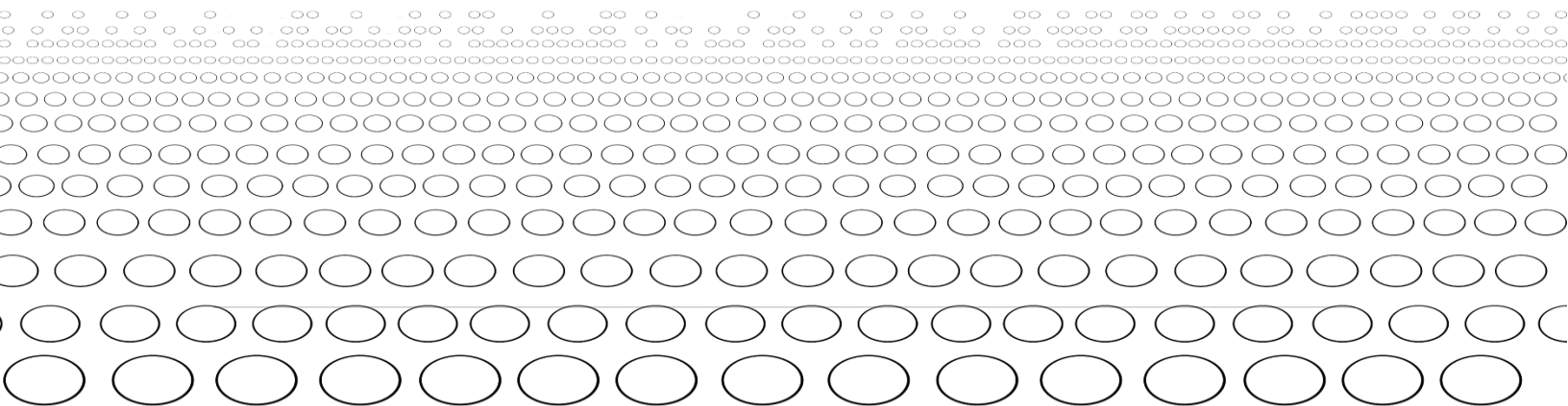
Gerardo Gutiérrez López

Asesor:

Dr. Jorge Alarcón Ibarra
Doctor en Ingeniería Civil



Influencia climatológica en la Zonificación del Grado de Desempeño para la
Selección de Cementos Asfálticos para el Estado de Michoacán



Índice

Contenido

I.- Abstract.....	I
II.- Resumen.....	II
III.- Introducción.....	III
Antecedentes.....	1
Justificación Socio - Económica.....	3
Problemática.....	6
Objetivo.....	10
Capítulo 1.- Marco Teórico.....	13
1.1- Vías Terrestres (Infraestructura Carretera).....	13
1.1.1.-Carreteras en Michoacán.....	14
1.2.- Pavimentos Flexibles.....	14
1.3- Mezcla Asfáltica.....	16
1.3.1- Clasificaciones de Mezclas Asfálticas.....	17
Mezclas Asfálticas en Caliente:.....	19
1.4-Asfalto y clasificaciones.....	19
1.4.a. - Cemento Asfálticos.....	20
1.4.b.- Emulsiones Asfálticas.....	22
1.4.c.- Asfaltos Rebajados.....	23
1.5.- Métodos de Diseño Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa.....	24
1.5.1. - Método Marshall.....	24
1.5.2- Protocolo AMAAC.....	24
Capítulo 2.- Método De Diseño Protocolo AMAAC.....	26
2.1.- Criterios de selección del nivel de evaluación requerido.....	27
2.2.- Selección Granulométrica.....	27
2.2.1.- Pruebas a los agregados pétreos (Gruesos y Finos).....	29
2.3.- Selección del asfalto.....	32
2.3.1- Pruebas a los Asfaltos.....	32
2.3.2.- Requisitos de Calidad para Cementos Asfálticos Grado PG.....	33
2.3.2.a. - Punto de Inflamación de Cleveland.....	34
2.3.2.b.- Viscosidad Dinámica.....	36
2.3.2.c.- Módulo Reológico de Corte Dinámico.....	36

2.3.2.d.- Residuo de la Película Delgada de Cementos Asfálticos	37
2.3.2.e.- Ensayo de Vasija de envejecimiento a presión (PAV).....	38
Capítulo 3.- Selección del cemento asfáltico según la clasificación de Grado de Desempeño (PG)	42
3.1-Grado PG.....	42
3.2.- SUPERPAVE (antecedencia en el modelaje para la selección del asfalto).....	47
3.3- Modelo LTPP.....	48
3.3.1- Modelo LTPP de temperatura de baja y alta del pavimento.....	48
3.4- PEMEX EKBÉ SUPERPAVE PG.....	53
Capítulo 4.- Zonificación del Grado de Desempeño para la Selección de Cementos Asfálticos para el Estado de Michoacán	55
4.1- Análisis de datos.....	64
4.2.- Implementación del Modelo LTPP.....	68
4.3.- Interpretación Geográfica.....	73
4.4- Interpretación Topografía/Temperatura.....	78
4.5.-Resultados.....	89
Conclusión.....	91
Bibliografía.....	92
Figuras.....	94
Tablas.....	96
Ecuaciones.....	97

I.- Abstract

In the present investigation, the direct influence of climatic variables in the selection of asphaltic cements within the State of Michoacán de Ocampo is analyzed. The fundamental action plays temperature in determining the level of performance (Grade PG) is described, necessary for a road project, which should ensure a considerable service life of flexible pavement, in any area of the federal entity in question.

According to the AMAAC Protocol (Mexican Association of Asphalt AC), "asphalt cement must be selected based on the maximum and minimum temperatures expected in the place of application, based on the Standard SCT N-CTM 4-05-004, Quality of grade PG asphalt materials ". In order to obtain these temperatures it was necessary to establish an analysis of data from meteorological stations that have a presence in the state. Knowledge was used in programming to simplify the discretization of the information collected, with the purpose of using this information in the AMAAC criteria.

Subsequent to the evaluation of the data, the zoning of the Degree of Performance in the State is illustrated, for which we assist in the use of a Geographic Information System (GIS) software, for a spatial interpretation.

Finally, in order to improve the methodological process, an interface, where, you can choose any location that is framed in the territory of the State of Michoacan took place, and where a suggestion Grade PG will be presented by interference temperature better Conform to the conditions of the region in which it is desired to apply asphalt concrete.

Keywords: Flexible Pavement, Asphalts, PG Degree, Climate, Evaluation, AMAAC Protocol, Zoning, Michoacán.

II.- Resumen

En la presente investigación se analiza la influencia directa de las variables climáticas en la selección de los cementos asfálticos dentro en el Estado de Michoacán de Ocampo. Se describe la acción fundamental que juega la temperatura en la determinación del Grado de Desempeño (Grado PG), necesario para el proyecto de una carretera, la cual debe garantizar una vida útil considerable del pavimento flexible, en cualquier zona de la entidad federativa en cuestión.

De acuerdo con el Protocolo AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto A.C.), "el cemento asfáltico debe seleccionarse en función de las temperaturas máximas y mínimas que se esperan en el lugar de la aplicación, en base a la Norma de la SCT N-CTM-4-05-004, *Calidad de los materiales asfálticos grado PG*". Para la obtención de dichas temperaturas fue necesario establecer un análisis de datos arrojados por las estaciones meteorológicas que tienen presencia en el estado. Se aprovechó el conocimiento en programación para simplificar la discretización de la información recaudada, con la finalidad, de emplear dicha información en los criterios de la AMAAC.

Posteriormente a la evaluación de los datos, se ilustra la zonificación del Grado de Desempeño en el Estado, para lo cual nos auxiliamos en el uso de un software de Sistema de Información Geográfica (GIS), para una interpretación espacial.

Finalmente, con el propósito de mejorar el proceso metodológico, se realizó una interfaz, en dónde, se podrá elegir cualquier ubicación que se encuadre en el territorio del Estado de Michoacán, y dónde se presentará una sugerencia del Grado PG por inferencia de temperatura que mejor se acomode a las condiciones de la región en el que se desea aplicar el concreto asfáltico.

Palabras Clave: Pavimento Flexible, Asfaltos, Grado PG, Clima, Evaluación, Protocolo AMAAC, Zonificación, Michoacán.



III.- Introducción

De acuerdo con el Fondo Monetario Internacional, y con el Foro Económico Mundial, México es una de las 20 economías más importantes e influyentes del planeta, 2° economía de América Latina, 5° del TPP y 15° del mundo (1.67% del PIB mundial).

También es igual de importante en el comercio internacional para otros países de Asia, Europa y América, esto gracias a su posición estratégica, geográficamente hablando, al estar entre dos océanos (Atlántico y Pacífico) y al ser un cruce y puente hacia el gigante consumidor Estados Unidos de América.

La factibilidad socioeconómica de un país puede medirse en la calidad de sus redes carreteras, es por esto, que la evolución en las metodologías de diseño de éstas precisa un nivel de seriedad civil y ética profesional, ya que de ello se deriva el desarrollo económico de una región.

Dentro de las Vías Terrestres, la infraestructura carretera, en México, sigue siendo el medio de transporte más usado para el traslado de materias primas, mercancías, productos terminados, e igual que el movimiento de pasajeros. La nación cuenta con una gran infraestructura carretera, este tipo de vías pueden subdividirse en diferentes y variadas categorías, pero existen 2 muy importantes; por su superficie de rodamiento: Concreto Hidráulico y Concreto Asfáltico. México, conforma su red carretera en su mayor parte con cintas asfálticas, y día a día se sigue ampliando, por todo el país. Debido a que México es un país petrolero, le es más plausible la implementación del asfalto como materia prima para el concreto de sus vialidades.

Otro punto importante es que, en el país se presentan un sinfín de condiciones topográficas y climáticas, debido a esto cobra relevancia el desarrollo de nuevos instrumentos que den mayor fiabilidad a cualquier diseño y desarrollo de este tipo de infraestructura.

Michoacán espera su auge en todos los ámbitos, al ser uno de los puntos de acceso desde el Pacífico, por mar, un gran productor de frutos, minerales, y gran prestador de servicios turísticos, lo cual lo convierte en un pilar económico para el país, y la comunicación forman parte esencial para el desarrollo de la región y el mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes.



Antecedentes

Mayo, 2017, En Baja California se desarrolla una investigación similar a esta, como parte de la elaboración del Catálogo de secciones estructurales de pavimentos flexibles para el Estado de Baja California.

Con el título, "Zonificación Para La Elaboración Del Catálogo De Secciones Estructurales Para Pavimentos Flexibles Del Estado De Baja California" y bajo la responsabilidad del Dr. Alejandro Mungaray Moctezuma, y con la finalidad de que dicha investigación funja como un Anexo de las "Normas Técnicas de Proyecto y Construcción para Obras de Vialidades del Estado de Baja California".

El objetivo de tal documento es establecer una guía de consulta para todos los involucrados en la realización de estudios y proyectos de pavimentos. Y para ello, se establecen los criterios básicos que deben ser considerados en el diseño de espesores de pavimentos flexibles para el estado, (Mungaray, 2017)

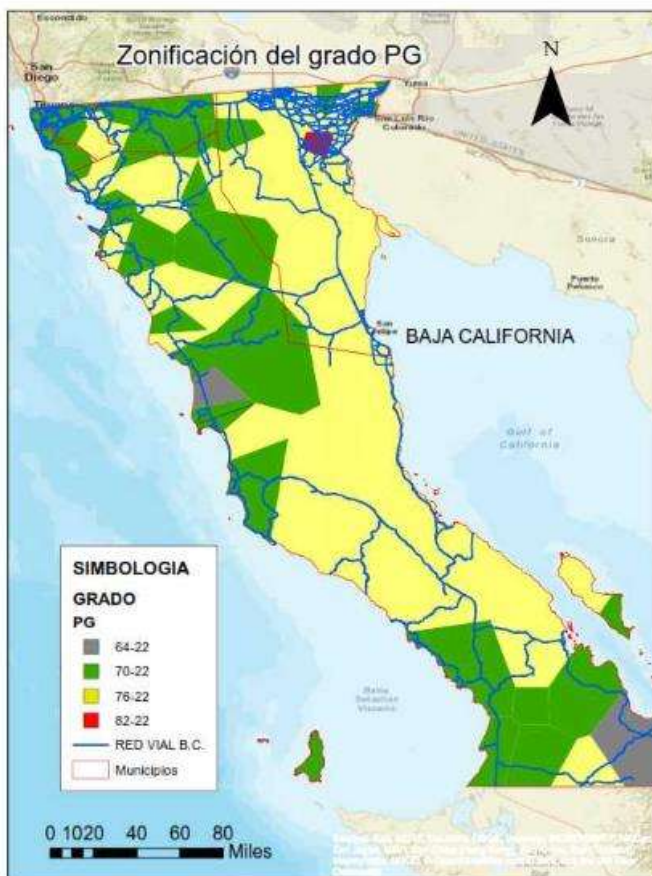


Figura 1- Mapa de Zonificación del Estado de Baja California del Grado PG. Fuente: Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano del Estado de Baja California.

Los grados PG pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperaturas que se registran en la región. Sin embargo, es necesario establecer rangos aplicables para cada zona analizada, por lo tanto, con el análisis de las condiciones climáticas obtenidas por estación, se ha elaborado el mapa de zonificación del estado de Baja California, en donde se indica el grado PG correspondiente a la zona del proyecto (Ver Figura 1).

Con la cual se pretende facilitar y simplificar la labor del Ingeniero Projectista, a través de dicho catálogo contrastadas por la experiencia y comprobadas

mediante criterios de diseño estructural en pavimentos flexibles, según las condiciones regionales y de tránsito de cada proyecto en particular. (Mungaray, 2017)

Al igual que en esta investigación "Influencia climatológica en la Zonificación del Grado de Desempeño para el diseño de Cementos Asfálticos para el Estado de Michoacán" se establece una zonificación del Grado PG en un mapa del Estado de Baja California, en el cual, se utilizaron algoritmos propuestos por la Federal Highway Administration (FHWA) obtenidos mediante el programa de investigación Long Term Paviment Performance (LTPP) (Desempeño del Pavimento a Largo Plazo), que también se manejan en el Anexo 2 del Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013³

Aunque dicha investigación resulta ser buena, en su representación de zonificación resulta poco clara y poco eficiente.

Justificación Socio - Económica

El estado de Michoacán es uno de los estados con mayor oportunidad en crecimiento de la República Mexicana, al ser poseedor de distintas zonas económicas y al tener una zona económica especial. Esto le da un "plus" y acometividad ante alguno de los estados mexicanos.

Los sectores estratégicos en la entidad son: servicios de información, agroindustrial, logística, turístico y minería. (SE-Secretaría de Economía, 2015)

En el rubro de infraestructura productiva, el estado cuenta con seis parques industriales y/o tecnológicos. (Ver Figura 2)

- Parque Industrial de Zitácuaro
- Parque Industrial Contepec
- Ciudad Industrial de Morelia
- Parque Industrial Zacapu
- Parque Industrial Región Zamora
- Parque de la Pequeña y Mediana Industria de Cd. Lázaro Cárdenas



Figura 2- Logística en ubicación de Parques Industriales. Fuente: Secretaría de Economía

Los distintos parques industriales están ubicados de manera estratégica a lo largo y ancho de la entidad para la correcta operación logística (Figura 3), asimismo, cuentan con espacios disponibles suficientes para la instalación de nuevas empresas manufactureras o de desarrollo agroindustrial.

Según el informe Doing Business 2014, publicado por el Banco Mundial (BM) y la Corporación Financiera Internacional (CFI), que clasifica a las economías por su

facilidad para hacer negocios, la ciudad de Morelia, Michoacán, ocupa el 12° lugar en México.

Asimismo, al desagregar este indicador, se observa que Michoacán ocupa el 13° lugar para apertura de un negocio, el 23° respecto al manejo de permisos de construcción, el 5° en registro de propiedades, y el 16° en cumplimiento de contratos. (DoingBusiness, 2014)

Michoacán es tierra fértil para invertir, cuenta con la infraestructura portuaria de Lázaro Cárdenas (que es una Zona Económica Especial de México) (Ver Figura 3), ferroviaria, aeroportuaria y carretera idónea para la generación y desarrollo de empresas que busquen una posición estratégica, tanto para la producción como para el manejo logístico de mercancías en operaciones de comercio internacional o transportación nacional. (SEE - Secretaría.de.Economía.del.Estado.deMichoacán, 2016)



Figura 3.- Puerto Lázaro Cárdena en una de las zonas económicas especiales de México en el Estado de Michoacán. Fuente: Secretaría de Economía.



Figura 4.- Aguacate, representativo en la actividad agrícola del estado de Michoacán.

La industria del aguacate (Ver Figura 4) es sin duda uno de los puntos más importantes cuando hablamos de economía, puesto que mientras el comercio exterior del petróleo y sus derivados le dejó a México en 2016 un déficit de 13 mil 163 millones de dólares, el 'oro verde' reportó un superávit de dos mil 220 millones de dólares, según datos del Sistema de Información Arancelaria Vía Internet (SIAVI) de la Secretaría de Economía.

Uno de los sectores más fuertes de Michoacán es el turismo, con su amplio repertorio de sitios, Michoacán es un destino lleno de bellezas naturales, culturales, arquitectónicas, gastronómicas, de recreación y esparcimiento. Pueden encontrarse desde Pueblos Mágicos como Janitzio (Ver Figura 5), hasta ciudades, y playas.



Figura 5 - Isla de Janitzio, en Pátzcuaro, Michoacán. Fuente: Miranda Hurtado

Con un perfil altamente logístico, Michoacán es considerado una de las regiones más productivas del país por sus condiciones naturales y su conectividad. (FIPAİM, 2017)

Las líneas de comunicación carretera, como la autopista Siglo XXI (Ver Figura 6), son factores de gran significado para el Estado, ya que son estas las que ayudan al traslado de gran cantidad de productos y pasajeros a través del todo el territorio.



Figura 6.- Autopista Siglo XXI. Fuente: Noventa Grados

Problemática

Como ya se ha mencionado, en Michoacán, gran parte del presupuesto para infraestructura carretera es utilizado en la conservación y rehabilitación. En lugar de emplearse un mayor presupuesto para la creación de nuevas vialidades con mayor calidad. Es elemental la evolución de nuevos instrumentos para el desarrollo en el diseño de nuevas vialidades, sea cual sea su uso.

Un gran problema en Michoacán es que para diseñar una nueva vialidad de pavimento asfáltico de Mezcla Asfáltica de Alto Desempeño se debe seguir la Norma Mexicana N-CMT-405.004/05 para seleccionar el tipo de Grado PG que se más se adecua al Estado. Dicha Norma nos muestra una zonificación ambigua del Grado PG, y en las se presume la localización de 2 zonas de clasificación del PG (Ver Figura 7).

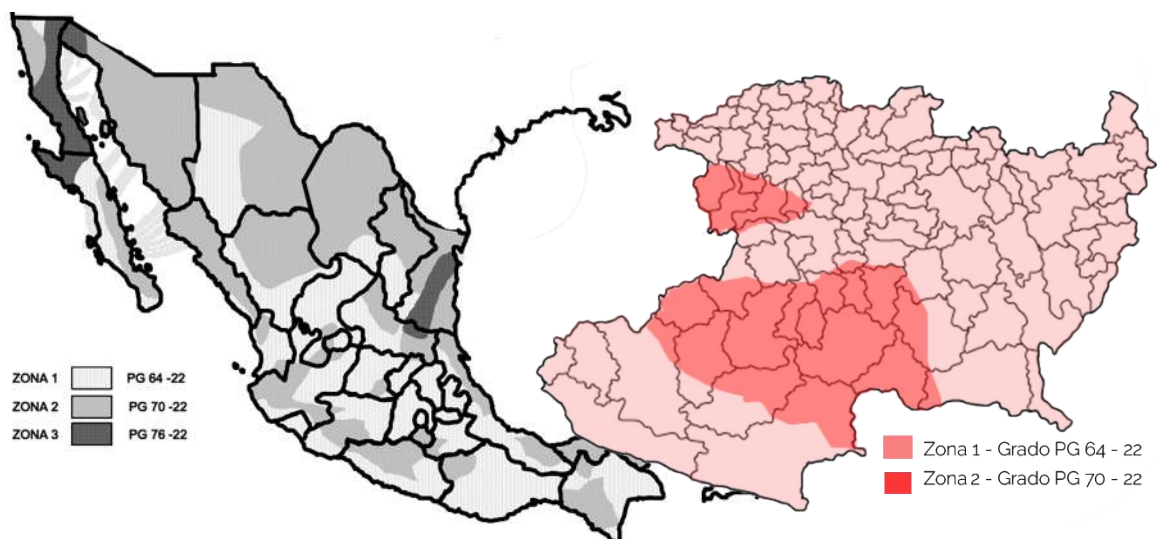


Figura 7.- Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos Grado PG en el Estado de Michoacán. Fuente: N-CMT-405.004/05 SCT.

En la Figura 7 se muestran las regiones geográficas en las que se recomienda el uso de cementos asfálticos Grado PG, en una selección intuitiva lo cual es poco eficiente, ya que no ofrece una interfaz interactiva con el Ingeniero Proyectista. Es probable que se haga una mala elección del tipo de Cemento Asfáltico Grado PG, lo que puede provocar un bajo rendimiento en la servicialidad de una vialidad, y por consiguiente, la superficie de rodamiento puede llegar a presentar fallas prematuras (Ver Figura 8).

A continuación, se muestra algunos tipos de fallas prematuras que puede llegar a presentar un pavimento flexible al no ser diseñado correctamente:



Figura 8.- Posibles fallas que puede presentar un Pavimento Flexible mal diseñado. Fuente: fallasenpavimentoflexible.blogspot.

- Grietas de Contracción o de Bloque

Son grietas interconectadas que dividen el pavimento en pedazos aproximadamente rectangulares, su tamaño puede variar de .30 m x .30 m a 3.0 m x 3.0 m; principalmente se originan por la contracción del concreto asfáltico y los ciclos de temperatura diarios; este tipo de falla no está asociada a cargas, lo que indican es que el asfalto se ha endurecido significativamente. (fallasenpavimentoflexible.blogspot, 2017)

- Desprendimientos superficiales

Descomposición o desintegración total de la superficie del pavimento y su remoción en una cierta extensión, usualmente menor de 0.9m de diámetro, formando un hoyo o cavidad redondeada, de bordes desiguales y lados verticales en su parte superior. Constituyen daños estructurales que interrumpen la continuidad del pavimento; su presencia es indicativa de insuficiente mantenimiento. (fallasenpavimentoflexible.blogspot, 2017)

- Deformaciones permanentes

El ahuellamiento se deriva de una deformación permanente en cualquiera de las capas del pavimento o la sub-rasante, usualmente producida por consolidación o movimiento lateral de los materiales debidos a la carga del tránsito. (fallasenpavimentoflexible.blogspot, 2017)

Tales fallas afectan directamente al usuario al elevar los costos de operación de las vías carreteras. Baja servicialidad se traduce en que los usuarios paguen de sus

bolsillos, al igual que la administración gubernamental correspondiente destine más presupuesto a corregir, lo que en gran parte se puede evitar, antes de la realización de tales vías.

Gran parte del problema es por omisión consiente de los ingenieros que realizan la obra, ya que la filosofía general es la idea de que el costo mínimo de construcción (la inversión inicial) es una meta ideal de todo proyecto.

El criterio del ingeniero no puede desarrollarse, obviamente, sin una consideración de los factores económicos involucrados, pero éstos resultan siempre de una amplitud y balance que trasciende enormemente la consideración única o preponderante del costo inicial de la misma construcción. Así, un análisis tan incompleto de los factores económicos puede y suele producir serios inconvenientes en los resultados finales de los esfuerzos de la Nación.

Parece incontrovertible que la Nación debe gastar lo preciso para un funcionamiento adecuado y un crecimiento armónico

Si la construcción de una carretera en México vale 1, la conservación, en su sentido correcto, puede costar 10 ó 12, considerando un periodo de utilización de 40 ó 50 años (y se está viendo que las carreteras duran mucho más), pero la operación, es decir, los costos vehiculares directos en que incurre el transporte de carga y mercancías que circulan sobre los pavimentos, puede representar en el mismo periodo algo comprendido entre 200, 400 o aún más, según el nivel de ocupación.

Esta enorme desproporción entre los costos (y los beneficios) de operar la infraestructura nacional, en comparación con los costos de construirla, hacen muy peligroso el criterio de que sea el costo de construcción mínimo el paradigma de un proyecto carretero. Hacen ver también el papel importante que un pavimento en buen estado juega en los ahorros posibles.

Todo lo anterior debe llevar al ánimo de los ingenieros responsables de la construcción y mantenimiento de los pavimentos de las carreteras mexicanas, lo importante que resulta lograr una buena calidad de rodamiento y una buena previsión de la conservación por venir. (IMT-ISSN-188-7297, 1998)

OBJETIVO

Objetivo

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un programa ejecutable, en que se puedan ingresar coordenadas de cualquier punto de la geografía del Estado de Michoacán y devuelva una sugerencia del tipo de asfalto clasificado por Grado de Desempeño (PG) por temperatura que más se adecuen a la región seleccionada. El cual sería un apoyo más interactivo para el usuario, dada su interfaz. (Ver Figura 9)

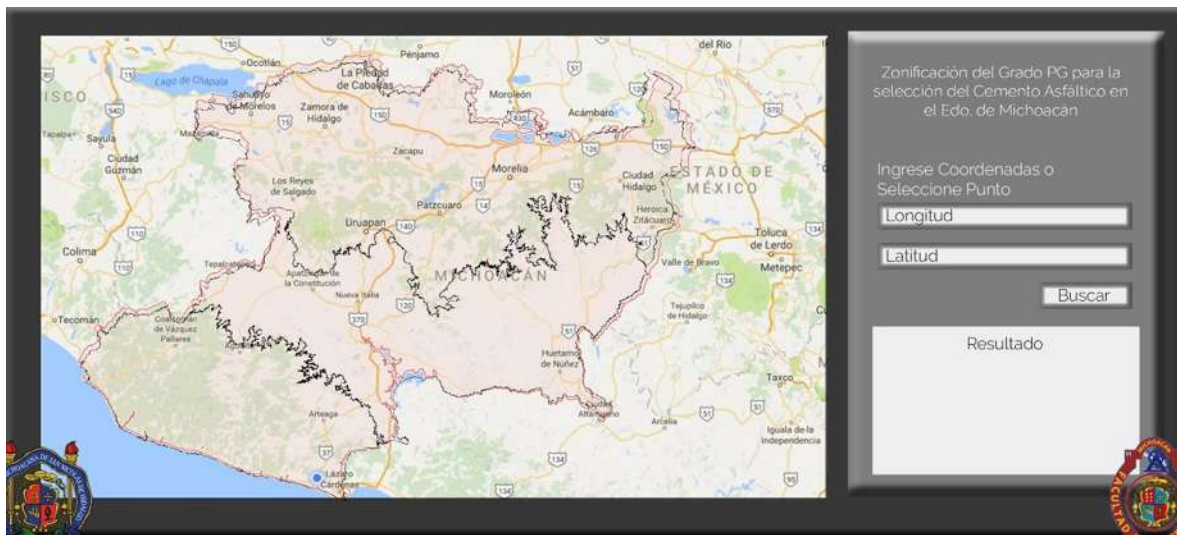


Figura 9.- Prototipo visual del Programa PG Zonificado de Michoacán. Fuente: Propia

Para lograr el objetivo general, se requiere cumplir también con los siguientes objetivos específicos:

Analizar las bases de datos climáticas disponibles para el estado de Michoacán, seleccionando aquellas estaciones más confiables y con mayor número de datos.

Obtener los datos de temperatura necesarios para cumplir con los criterios del modelo de la FHWA (LTPP) empleado en el Anexo 2 del Protocolo AMACC.

Realizar el ajuste de la temperatura para la selección del Grado PG en el cemento asfáltico para cada una de las estaciones climáticas seleccionadas.

Desarrollar la zonificación del tipo de asfalto necesario utilizando diversas técnicas como Polígonos de Thiessen, Interpolación por ponderación y envolventes topográficas.

Este trabajo también se pretende llegue a convertirse en una guía para futuros usuarios que deseen implementar cemento asfáltico para una obra vial en alguna región del Edo. De Michoacán. Y dar mayor certidumbre al proyectista y al licitador de la obra.

Al igual, este trabajo puede ser complementado con la implementación de mayor cantidad de datos sobre temperatura, al igual que, puede añadirse los demás criterios de ajuste para la selección de Grado PG, tales como, información sobre los materiales pétreos, e intensidad de tránsito.

MARCO TEÓRICO

Capítulo 1.- Marco Teórico

1.1- Vías Terrestres (Infraestructura Carretera)

La red carretera nacional, que se ha desarrollado de manera gradual a lo largo de varias décadas, comunica a casi todas las regiones y comunidades del país a través de más de 377.6 mil kilómetros de caminos de todos tipos al año 2012. Por su importancia y características, la red carretera mexicana se clasifica en: red federal, redes estatales, caminos rurales y brechas mejoradas. La red federal de carreteras es atendida en su totalidad por el gobierno federal. (Ver Figura 10)



Figura 10.- Posición de México en el Mundo en cuestión de Infraestructura Carretera. Fuente: Indexmundi

Ella registra la mayor parte de los desplazamientos de pasajeros y carga entre ciudades y canaliza los recorridos de largo itinerario, los relacionados con el comercio exterior y los producidos por los sectores más dinámicos de la economía nacional. Las redes estatales cumplen una función de gran relevancia para la comunicación regional, para enlazar las zonas de producción agrícola y ganadera y para asegurar la integración de extensas áreas en diversas regiones del país. Por su parte, los caminos rurales y las brechas mejoradas son vías modestas y en general no pavimentadas; su valor es más social que económico, pues proporcionan acceso a comunidades pequeñas que de otra manera estarían aisladas. Sin embargo, su efecto en las actividades y la calidad de vida de esas mismas comunidades es de gran trascendencia.

Si bien la red carretera posee una importancia de primer orden para nuestro país, que se destaca en el mundo por su vocación caminera, tanto la vastedad del territorio nacional como las crónicas limitaciones presupuestales que ha padecido y otros factores inciden en una u otra medida en el hecho de que México posea una densidad carretera (Ver Tabla 1) (es decir, la longitud de carreteras por kilómetro cuadrado de territorio) relativamente baja. (SCT S. d., Informe de Infraestructura 2016, 2016)

Tabla 1- Posición de México en el Mundo en Densidad de Infraestructura Carretera. Fuente: The World Competitiveness Yearbook 2000.

Densidad de Infraestructura Carretera							
(km de carretera por km ² de territorio)							
Canada	México	USA	Italia	Reino Unido	Francia	Alemania	Japón
0.1	0.14	0.64	1.04	1.61	1.62	1.77	3.04

A pesar de que México no cuenta con una alta densidad de infraestructura carretera, es ésta, vital y de gran importancia para el transporte de pasajeros y cargas por todo el país.

Del total de kilómetros en servicio, aproximadamente, 156,797 están pavimentados, 152,879 corresponden a carreteras revestidas, 11,231 son de terracerías y 69,394 son brechas. 40.2%, 39.2%, 17.8% y 2.9% respectivamente.

De las carreteras pavimentadas se derivan 2 importantes categorías: Las carreteras construidas a base de concreto hidráulico y las construidas a base de concretos asfálticos, también conocidos como pavimentos flexibles.

1.1.1.-Carreteras en Michoacán



Figura 11.- Ilustración de la red carretera del Estado de Michoacán. Fuente: www.sct.gob.mx.

Michoacán cuenta con un aproximado de 2,180.42 km de red carretera, 228.95 km son corredores troncales, 1,149.00 km de red básica estatal y 802.47 km de red secundaria (Ver Figura 11), con base en información de la Dirección General de Conservación de Carreteras. (SCT S. d., Informe de Infraestructura 2016, 2016)

1.2.- Pavimentos Flexibles

Debe reconocerse que los pavimentos que México necesita en sus carreteras no son hoy los mismos que fueron en otras épocas. Circunscribiendo las ideas a la red nacional pavimentada, tal como es el objetivo del presente trabajo, debe aceptarse un muy importante cambio de circunstancias entre el momento actual y las épocas en que las carreteras mexicanas empezaron a ser construidas y que en buena parte se desarrollaron, de acuerdo con el tomo del Protocolo AMAAC PA-MA 2016 (AMAAC-PA-MA, 2016)

Solo como mención, los Pavimentos Rígidos (Pavimento con superficie de rodamiento de concreto hidráulico), se integran por una capa (losa) de concreto de cemento portland que se apoya en una capa de base, constituida por grava; esta capa descansa en una capa de suelo compactado, llamada subrasante. (Ver Figura 12)

La resistencia estructural depende principalmente de la losa de concreto. (CANACEM, 2014)

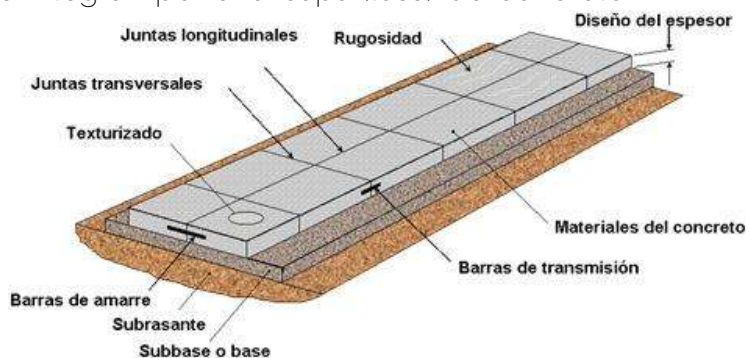


Figura 12.- Vialidad de superficie de rodamiento de Concreto Hidráulico. Fuente: www.PECASMAYO.com

Se denominan "pavimentos flexibles" a aquellos cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. El uso de pavimentos flexibles se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como pueden ser vías, aceras o estacionamientos.

La "construcción" de pavimentos flexibles se realiza a base de varias capas de material. Cada una de las capas recibe cargas por encima de la capa. Cuando se supera la carga que puede sustentar, traslada la carga restante a la capa inferior. De ese modo lo que se pretende es que pueda soportar la carga total en el conjunto de capas.

Las capas de un pavimento flexible se colocan en orden descendente en cuanto a capacidad de carga (Ver Figura 13). La capa superior es la que mayor capacidad de soportar cargas tiene de todas las que se disponen. Por lo tanto, la capa que menos carga puede soportar es la que se encuentra en la parte inferior. La durabilidad de un pavimento flexible se diseña para un periodo de entre 15 y 20 años. (CanaldelaConstrucción, 2017)

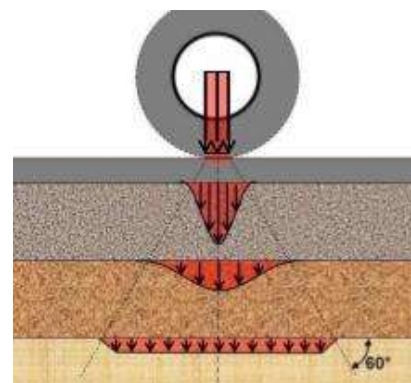
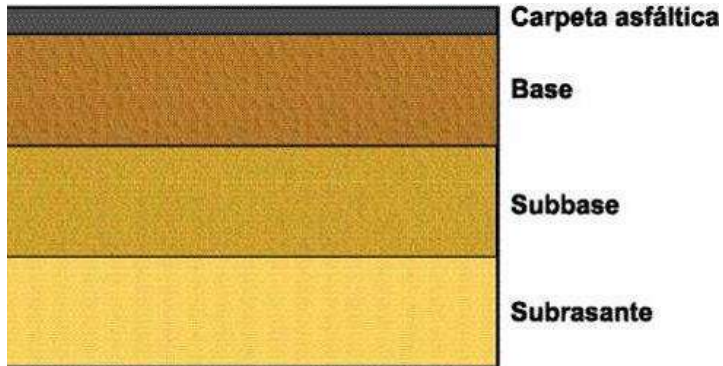


Figura 13.- Distribución de cargas en capas de un pavimento flexible. Fuente: www.PECASMAYO.com

Las capas de un pavimento flexible suelen ser: capa superficial o capa superior que es la que se encuentra en contacto con el tráfico rodado y que normalmente ha sido elaborada con varias capas asfálticas. La capa de base es la capa que está debajo de la capa superficial y está, normalmente, construida a base de agregados



y puede estar estabilizada o sin estabilizar. La capa sub – base es la capa o capas que se encuentra inmediatamente debajo de la capa de base. En muchas ocasiones se prescinde de la capa de sub – base (Ver Figura 14). (Silva, 2016)

Figura 14.- Capas de un pavimento flexible.
Fuente: Canal Construcción

1.3.- Mezcla Asfáltica

Una mezcla asfáltica es una mezcla elaborada con agregados pétreos y un material asfáltico, eventualmente con aditivos, cuyas propiedades mecánicas dependen de las propiedades de cada uno de los componentes de su proporción relativa en mezcla. Puede elaborarse en frío o en caliente, en planta o en el lugar de la aplicación.

Para fines de diseño, se considera la mezcla asfáltica como un sistema trifásico compuesto por una fase sólida, constituida por el agregado pétreo, una fase líquida, dada por el cemento asfáltico y una fase gaseosa, que constituye el aire (Ver Figura 15 y 16).

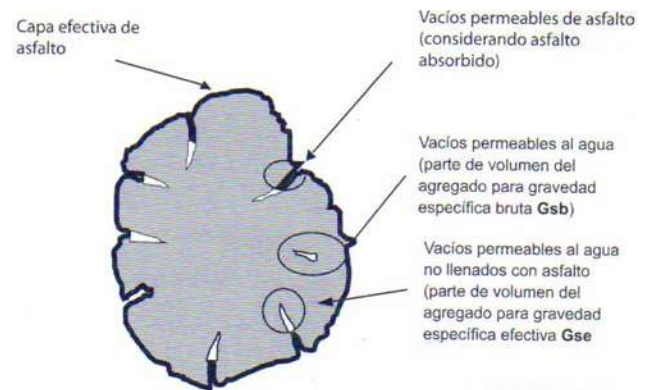
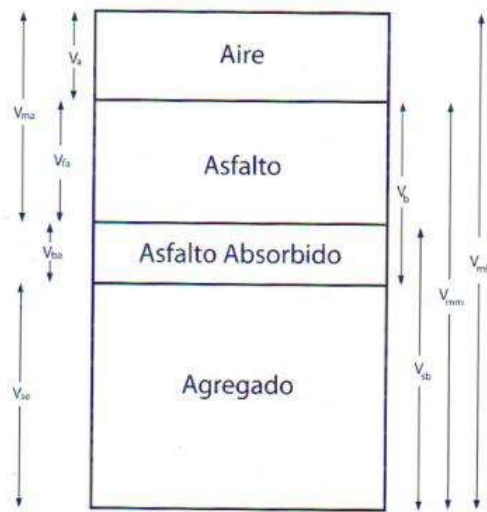


Figura 15.- Esquema representativo de una mezcla asfáltica a nivel agregado pétreo. Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013³



Mezcla asfáltica de alto desempeño, se refiere a la mezcla asfáltica elaborada en caliente resistente a las deformaciones plásticas, al fenómeno de fatiga y al daño por humedad, cuyo comportamiento es superior al de las mezclas asfálticas convencionales. (AMAAC-PA-MA, 2016)

Figura 16- Diagrama de las fases de una mezcla asfáltica. Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013³

1.3.1.- Clasificaciones de Mezclas Asfálticas

A continuación, se presenta las clasificaciones que en las que se puede englobar a las Mezclas Asfálticas según el portal Construpedia: (ConstruPedia, 2017)

a) Por Fracciones del Agregado Pétreo en la Mezcla

- Masilla Asfáltica: Polvo mineral más el ligante.
- Mortero Asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto Asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam Asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

b) Proporción de Vacíos en la Mezcla Asfáltica

Este aspecto es de importancia fundamental para que no aparezcan deformaciones plásticas con el paso de las cargas y por las variaciones térmicas.

- Mezclas Cerradas o Densas: Con una proporción de vacíos no mayor al 6 %.

- Mezclas Semi-Cerradas o Semi-Densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas Abiertas: Con una proporción de vacíos mayor de 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: Con una proporción de vacíos superior al 20 %.

c) Por el Tamaño Máximo del Agregado Pétreo

- Mezclas Gruesas: el tamaño máximo del árido es mayor a 10 mm.
- Mezclas Finas: son micro-aglomerados ó morteros asfálticos; éstas son mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que se extiende la mezcla (del doble al triple del tamaño máximo).

d) Por la Estructura del Agregado Pétreo

- Mezclas con Esqueleto Mineral: Provistas de un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos se debe a la masilla.
- Mezclas sin Esqueleto Mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

e) Por Granulometría

- Mezclas Continuas: Una cantidad bien distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

f) Temperatura de la Mezcla en la Puesta en Obra

- Mezclas Asfálticas en Frío: El ligante es una emulsión asfáltica (aunque en algunos lugares se usan los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente

- Mezclas Asfálticas en Caliente: Fabricadas con asfaltos a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, de acuerdo con la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la del ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente. (ConstruPedia, 2017)

Las mezclas asfálticas en caliente son aquellas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos y cemento asfáltico que han sido dosificados en forma precisa y mezclados a alta temperatura en planta (habitualmente entre 150° y 180°C, dependiendo de la viscosidad del asfalto a emplear), para así lograr las propiedades requeridas en el concreto asfáltico según su función dentro de la estructura del pavimento.

Generalmente, cuando son de un espesor mayor o igual que cuatro (4) cuando son de un espesor mayor o igual que cuatro (4) centímetros, las mezclas de granulometría densa tienen, además, la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento. (SCT, 2006)

1.4.-Asfalto y clasificaciones

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida.

Los materiales asfálticos se emplean en la elaboración de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones, ya sea para aglutinar los materiales pétreos utilizados, para ligar o unir diferentes capas del pavimento; o bien para estabilizar bases o subbases. También se pueden usar para construir, fabricar o impermeabilizar otras estructuras, tales como algunas obras complementarias de drenaje, entre otras.

Los materiales asfálticos se clasifican (Ver Tabla 2) en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación. (SCT S. d., Características de los Materiales para Pavimientos, 2006)



Figura 17.- Clasificación de los materiales asfálticos. Fuente: Noticias + verdes

Tabla 2.- Clasificación de los materiales asfálticos. Fuente: N·CMT-4-05-001/06 SCT

Material Asfáltico	Vehículo para su aplicación	Usos más comunes
Cemento Asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados.
Emulsión Asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones.
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de subbases y bases hidráulicas.

1.4.a. - Cemento Asfáltico

Los cementos asfálticos son asfaltos obtenidos del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.

Según su viscosidad dinámica a sesenta (60) grados Celsius, los cementos asfálticos se clasifican como se indica en la Tabla 3 de la Norma (N·CMT-4-05-001/06

SCT), donde se señalan los usos más comunes de cada uno. (SCT S. d., Características de los Materiales para Pavimentos, 2006)

Tabla 3.- Clasificación de los cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60°C. Fuente: N-CMT-4-05-001/06 SCT

Clasificación	Viscosidad a 60°C Pa·s (P ₁₀)	Usos más comunes
AC-5	50 ± 10 (500 ± 100)	• En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Figura 6.0. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen para riegos de impregnación, de liga y poreo con arena, así como en estabilizaciones.
AC-10	100 ± 20 (1 000 ± 200)	• En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 6.0. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Figura 6.
AC-20	200 ± 40 (2 000 ± 400)	• En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 3 en la Figura 6.0. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 6.0.
AC-30	300 ± 60 (3 000 ± 600)	• En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 4 en la Figura 6.0. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zonas 3 y 4 en la Figura 6.0. • En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como en riegos de impregnación.

[1] Poises

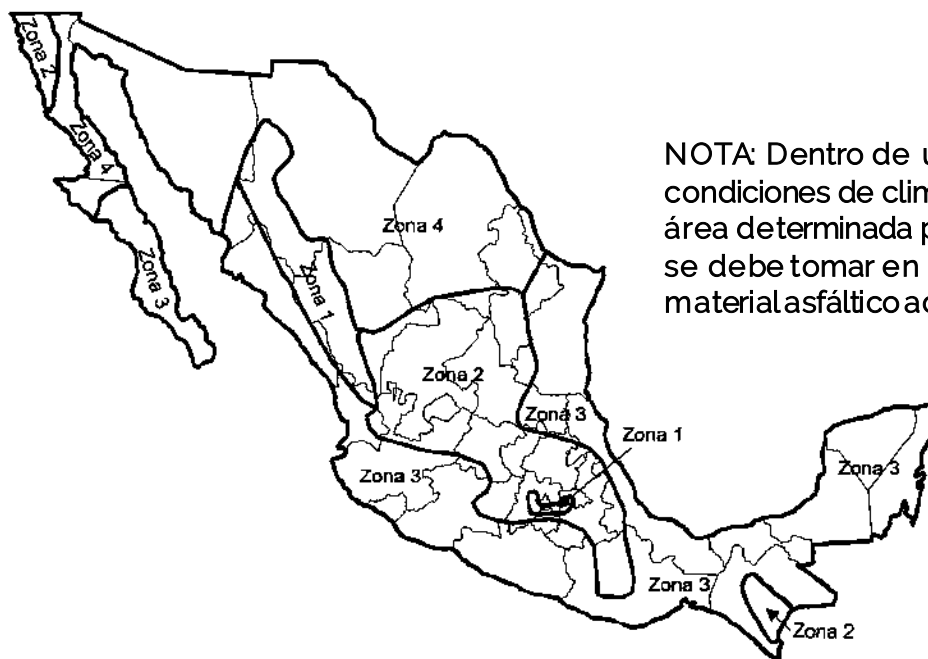


Figura 18.- Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60°C. Fuente: N-CMT-4-05-001/06 SCT

1.4.b.- Emulsiones Asfálticas

Las emulsiones asfálticas son los materiales asfálticos líquidos estables, constituidos por dos fases no miscibles, en los que la fase continua de la emulsión está formada por agua y la fase discontinua por pequeños glóbulos de cemento asfáltico. Se denominan emulsiones asfálticas aniónicas cuando el agente emulsificante confiere polaridad electronegativa a los glóbulos y emulsiones asfálticas catiónicas, cuando les confiere polaridad electropositiva.

Las emulsiones asfálticas pueden ser de los siguientes tipos:

- De rompimiento rápido, que generalmente se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos, a excepción de la emulsión ECR-60, que no se debe utilizar en la elaboración de éstas últimas.
- De rompimiento medio, que normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos en la mezcla es igual que dos (2) por ciento o menor, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas. (SCT S. d., Características de los Materiales para Pavimientos, 2006)
- De rompimiento lento, que comúnmente se utilizan para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas.
- Para impregnación, que particularmente se utilizan para impregnaciones de subbases y/o bases hidráulicas.
- Superestables, que principalmente se emplean en estabilizaciones de materiales y en trabajos de recuperación de pavimentos.

Según su contenido de cemento asfáltico en masa, su tipo y polaridad, las emulsiones asfálticas se clasifican como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4 - Clasificación de las emulsiones asfálticas. Fuente: NCMT-405001/06 SCT

Clasificación	Contenido de cemento en masa (%)	Tipo	Polaridad
EAR-55	55	Rompimiento Rapido	Aniónica
EAR-60	60		
EAM-60	60	Rompimiento Medio	
EAM-65	65		
EAL-55	55	Rompimiento Lento	
EAL-60	60		
EAI-60	60	Para Impregnación	
ECR-60	60	Rompimiento Rapido	Catiónica
ECR-65	65		
ECR-70	70		
ECM-65	65	Rompimiento Medio	
ECL-65	65	Rompimiento Lento	
ECI-60	60	Para Impregnación	
ECS-60	60	Sobrestabilidad	

1.4.c.- Asfaltos Rebajados

Los asfaltos rebajados, que regularmente se utilizan para la elaboración de carpetas de mezcla en frío, así como en impregnaciones de bases y subbases hidráulicas, son los materiales asfálticos líquidos compuestos por cemento asfáltico y un solvente, clasificados según su velocidad de fraguado como se indica en la siguiente Tabla (Ver Tabla 5). (SCT S. d., Características de los Materiales para Pavimentos, 2006)

Tabla 5 - Clasificación de los asfaltos rebajados. Fuente: NCMT-405001/06 SCT

Clasificación	Velocidad de Fraguado	Tipo de Solvente
FR-3	Rápida	Nafta, Gasolina
FM-1	Media	Queroseno

1.5.- Métodos de Diseño de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa.

En México los métodos de diseño más comunes para mezclas asfálticas en caliente son 2; El Método de Diseño Marshall y el Protocolo AMAAC

1.5.1. - Método Marshall

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

El método Marshall, sólo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación que usan cemento asfáltico clasificado con viscosidad o penetración y que contienen agregados con tamaños máximos de 25.0 mm o menos. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación.

El método Marshall usa muestras normalizadas de pruebas (probetas) de 64mm (2.5in) de espesor por 103mm (4in) de diámetro. Una serie de probetas, cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferentes tipos de asfaltos, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas asfálticas de agregado. Los dos datos más importantes del diseño de mezclas del Método Marshall son: un análisis de la relación de vacíos - densidad, y una prueba de estabilidad-flujo de las muestras compactadas. (Carbajal, 2016)

1.5.2.- Protocolo AMAAC.

El Protocolo AMAAC es la nueva propuesta para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño en México. Surge con la necesidad de desplazar al método Marshall y para colocarse dentro de la normativa nacional, como un sucesor del SUPERPAVE que se desarrolló en Estados Unidos, pero adaptado para las características particulares de nuestro país.

DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa DE ALTO DESEMPEÑO POR PROTOCOLO AMAAC

Capítulo 2.- Método De Diseño Protocolo AMAAC

La principal diferencia entre el método Marshall y el Protocolo AMAAC es que este último representa de mejor manera las condiciones a las que estará sometida la mezcla en el pavimento, tanto en el procedimiento constructivo como a lo largo de su vida útil; además de contemplar diferentes niveles de diseño según el número de ejes equivalentes esperados, también se obtienen los módulos que servirán para el diseño del pavimento en conjunto y la determinación de la resistencia a la fatiga de la mezcla.

En 2008, la Asociación Mexicana del Asfalto desarrolló una metodología de diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño, a la cual se nombró: Protocolo AMAAC PA-MA-01/2008, éste tiene como fundamento el Sistema de Diseño de Mezclas Asfálticas de SUPERPAVE utilizando tanto los equipos como los procedimientos propuestos por él. La última actualización de esta metodología es la versión publicada en 2011.

Este protocolo contiene la metodología necesaria para diseñar una mezcla asfáltica que se utilice en la construcción de pavimentos para carreteras en donde se desee obtener altos niveles de desempeño.

De acuerdo con el Protocolo AMAAC PA-MA, el diseño de una mezcla asfáltica de alto desempeño busca obtener una mezcla asfáltica que posea las propiedades volumétricas y de resistencia a las deformaciones permanentes, al fenómeno de fatiga y al daño por humedad cuyo comportamiento sea superior al de las mezclas convencionales.

Los pavimentos, cualquiera que sea su tipo, tienen la función primordial de brindar una superficie de rodamiento segura, cómoda y lo más durable posible bajo las cambiantes condiciones climáticas y de tránsito.

En los pavimentos flexibles para carreteras de altas prestaciones, éstos están constituidos por una o varias capas de mezcla asfáltica y la seguridad y comodidad recaen en su superficie de rodamiento, formada habitualmente por una capa de concreto asfáltico elaborado y colocado en caliente. (AMAAC-PA-MA, 2016)

2.1. - Criterios de selección del nivel de evaluación requerido

Tabla 6.- Niveles de diseño en función de los ejes equivalentes de 8.2 t y el tipo de carretera. Fuente: TECA

Designación del nivel de tránsito	Número de ejes equivalentes	Tipo de carreteras usuales	Ensayes
Nivel I Tránsito bajo	Menor a 1 000 000	•Carreteras federales tipo D •Carreteras alimentadoras •Carreteras estatales y municipales •Calles urbanas	•Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad
Nivel II Tránsito medio	De 1 000 000 a 10 000 000	•Carreteras estatales •Carreteras federales tipo B y C •Vialidades urbanas	•Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad •Susceptibilidad a la deformación permanente
Nivel III Tránsito alto	De 10 000 000 a 30 000 000	•Carreteras federales tipo A •Autopistas de cuota - Autopistas de cuota	•Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad •Susceptibilidad a la deformación permanente •Módulo dinámico
Nivel IV Tránsito muy alto	Más de 30 000 000	•Carreteras federales troncales •Autopistas de cuota importantes •Vialidades suburbanas en ciudades muy grandes	•Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad •Susceptibilidad a la deformación permanente •Módulo dinámico •Fatiga

El método de diseño propuesto por AMAAC, establece diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función de la importancia de la carretera determinada por el nivel de tránsito o el desempeño deseado para la infraestructura que se requiere (Ver Tabla 6).

En la tabla anterior se presenta la recomendación para la selección del nivel de diseño de las mezclas asfálticas de granulometría densa en función del tránsito vehicular. (AMAAC-PA-MA, 2016)

2.2.- Selección Granulométrica

La granulometría por utilizar en una mezcla asfáltica se debe seleccionar de acuerdo con la función requerida para la capa asfáltica en la estructura de un pavimento. Con base en las necesidades del proyecto se podrán fabricar cinco tipos de mezcla cuya designación se muestra en la siguiente tabla (Tabla 7).

Tabla 7.- Definición del tipo de mezcla en función del tamaño nominal Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013³

Granulometría por tipo de mezcla		
Designación de la mezcla mm	Tamaño nominal mm	Tamaño máxima mm
37.5	37.5	50
25	25	37.5
19	19	25
12.5	12.5	19
9.5	9.5	12.5

Durante el proceso de diseño se debe verificar que el espesor de la capa asfáltica donde se va a colocar la mezcla se encuentre dentro del rango establecido en la siguiente figura (Ver Figura 19).

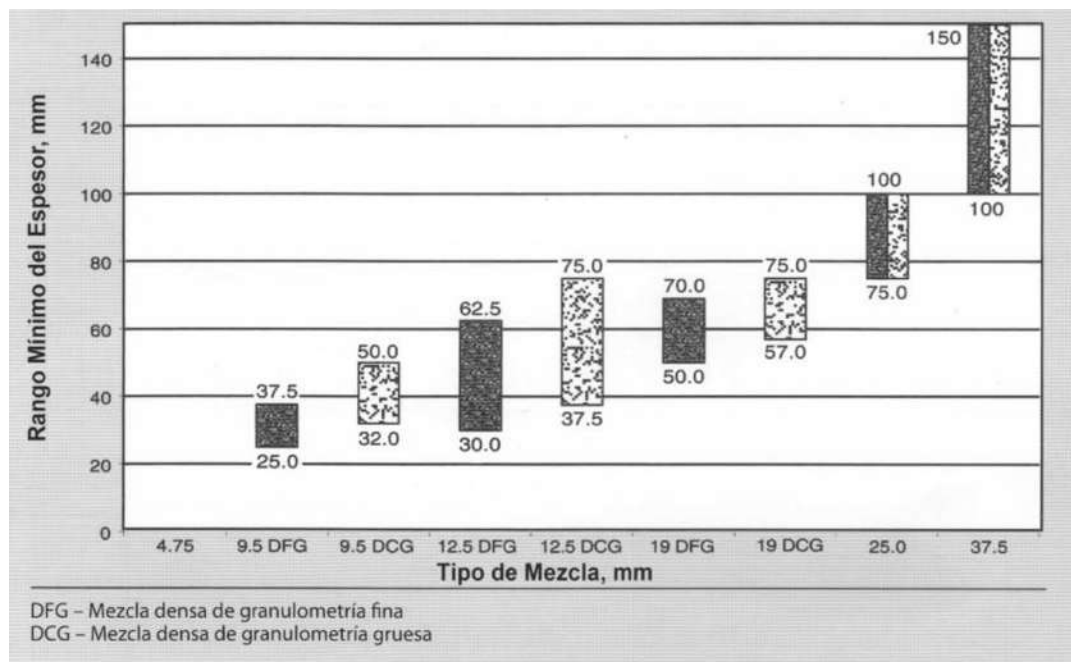


Figura 19.- Recomendaciones mínimas para el rango de granulometrías densas. Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013³

2.2.1.- Pruebas a los agregados pétreos (Gruesos y Finos).

Las características físicas básicas que deben cumplir las fracciones gruesa y fina del agregado pétreo seleccionado son las que se indican en las Tablas 8 y 9, respectivamente. (AMAAC-PA-MA, 2016)

Tabla 8.- Requisitos de calidad de la fracción gruesa del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa. Fuente: TECA

Característica	Norma	Especificación
Desgaste de los Ángeles; %	ASTM C131-06	30 máx. (capas estructurales) 25 máx. (capas de rodadura)
Desgaste Microdeval, %	AASHTO T 327-99/ ASTM D6928-10	18 máx. (capas estructurales) 15 máx. (capas de rodadura)
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T 104-99	15 máx. para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Caras fracturadas % (2 caras o Caras fracturadas), % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Partículas alargadas, %	ASTM D 4791	Relación 5 a 1, 10 % máx.
Partículas lajeadas, %	ASTM D 4791	Relación 5 a 1, 10 % máx.
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	Recomendación AMAAC RA-08/21010	90 mín.

- Desgaste de los Ángeles; %, ASTM C131-06. El objetivo de esta prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas.
- Desgaste Microdeval, %, AASHTO T 327-99/ ASTM D6928-10. El objetivo de esta prueba es determinar la resistencia al desgaste de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas en mezclas asfálticas.
- Intemperismo acelerado, %, AASHTO T 104-99. El objetivo de la prueba es determinar la degradación esperada por intemperismo de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas.

- Caras fracturadas, % (2 caras o más), ASTM D 5821. El objetivo de esta prueba es la determinación del porcentaje de partículas fracturadas, en masa o en número, de una muestra de agregado grueso.
- Partículas alargadas y lajeadas, % ASTM D 4791. Esta prueba permite determinar el contenido de partículas de formas alargadas y lajeadas presentes en los materiales pétreos empleados en las mezclas asfálticas.
- Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento, Recomendación AMAAC RA- 08/2010. El objetivo de esta prueba es determinar la pérdida de la película asfáltica en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas.

Tabla 9.- Requisitos de calidad de la fracción fina del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa. Fuente: TECA

Característica	Norma	Especificación
Equivalente de Arena	ASTMD 2419	50 mín. (capas estructurales) 55 mín. (capas de rodadura)
Angularidad, %	AASHTO T 304	40 mín.
Azul de metileno, ml /g	Recomendación AMAA RA-05/2010	15 máx. (capas estructurales) 12 máx. (capas de rodadura)

- Equivalente de Arena, ASTM D 2419. Esta prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas.
- Angularidad, AASHTO T 304. Consiste en obtener la relación de vacíos de la parte fina de un agregado en el estado más suelto.
- Azul de Metileno, ml/g, Recomendación AMAAC RA-05/2010. El objetivo de la prueba es determinar los grados de reactividad de los finos, que son los utilizados para la fabricación de mezclas asfálticas, el cual puede tener una influencia nociva en su desempeño, usando como material de medición el azul de metileno.

CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE
GRADO DE DESEMPEÑO (PG)

2.3.- Selección del asfalto

Si el cemento asfáltico seleccionado no contiene agentes modificadores (asfalto original), se le determinará su carta de viscosidad usando un viscosímetro rotacional de acuerdo con la Norma ASTM D-4402. De esta carta se obtendrán las temperaturas de mezclado y compactación adecuada que correspondan a los valores de viscosidad que se presentan en la siguiente tabla. Para asfaltos modificados las temperaturas deben ser proporcionadas por el proveedor (Ver Tabla 10).

Tabla 10.- Rangos de viscosidad para seleccionar las temperaturas de mezclado y compactación entre el agregado pétreo y el cemento asfáltico. Fuente: Protocolo AMAAC PA – MA 01/2013³

Características	Rango de viscosidad, Pa.s
Temperatura de mezclado	0.15 - 0.19
Temperatura de compactación	0.25 - 0.31

2.3.1.- Pruebas a los Asfaltos

Las propiedades relacionadas al desempeño de un pavimento están basadas en la reología que es la ciencia de estudio del flujo y la deformación de los materiales que son capaces de fluir. (AMAAC-PA-MA, 2016)

Las pruebas para cementos asfálticos miden propiedades físicas que pueden estar directamente relacionadas con el desempeño en campo a través de principios ingenieriles. También son llevadas a temperaturas a las que se encuentran los pavimentos en servicio.

El tema central de las especificaciones es la confianza sobre las pruebas del cemento asfáltico en condiciones que simulan las tres etapas críticas durante la vida del asfalto. (AMAAC-PA-MA, 2016)

2.3.2.- Requisitos de Calidad para Cementos Asfálticos Grado PG

- I. Los cementos asfálticos Grado PG, antes y después de envejecidos en el laboratorio para simular las condiciones del envejecimiento que se espera tengan durante su vida útil en la obra, cumplirán con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 11:

Tabla 11.- Requisitos de calidad para cementos Grado PG. Fuente: N-CMT-4-05/001/08 SCT

Grado de comportamiento	PG 64				PG 70				PG 76			PG 82			PG 88		
	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-22	-28	-34	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días), °C	64				70				76			82			88		
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34
Asfalto original																	
Punto de inflamación Cleveland [1]; °C, mín.	230																
Viscosidad dinámica a 135°C [1] ; Pa·s (P), máximo [2]	3																
Módulo reológico de cortedínámico (G'/sen δ) [1] [3]; kPa, mínimo • Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	1																
	64				70				76			82			88		
Después de prueba de película delgada y aire de horno																	
Pérdida por calentamiento; %, máximo	1																
Módulo reológico de corte dinámico (G'/senδ) [1]; kPa, mínimo • Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	2,2																
	64				70				76			82			88		
Después de envejecimiento en vasija de presión temperatura y aire																	
Temperatura de envejecimiento PAV; °C • En climas normales • En climas desérticos																	
	100				100				100			100			100		
	100				110				110			110			110		
Índice de endurecimiento físico [4], máximo	Reportar																
Rigidización (G'·sen δ) ; kPa, máximo • Temperatura de prueba@ 10 rad/s; °C	5000																
	25	22	19	16	28	25	22	19	31	28	25	34	31	28	34	31	28
Rigidez de Flexión S(t) [1][5]; MPa, máximo (m=0,3min) • Temperatura de prueba @ 60 s, °C	300																
	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-12	-18	-24	-12	-18	-24

[1] Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

[2] Poises

[3] Para control de calidad de producción de asfaltos normales sin modificar, cuando sean líquido newtoniano, la viscosidad dinámica del cemento asfáltico original puede sustituir al módulo de corte dinámico $G^*/\sin \delta$, a las temperaturas de prueba.

[4] El endurecimiento físico del asfalto es desarrollado de acuerdo con el número de muestras de viga, conforme a la determinación de la rigidez de flexión, mediante el Reómetro de flexión de viga BBR, excepto que las condiciones de tiempo se extiendan a 24 h y el valor m sea reportado únicamente para propósitos de información.

[5] Si la rigidez de flexión es menor de 300 MPa, no es necesario la prueba de tensión directa. Si la rigidez de flexión resulta entre 300 y 600 MPa, se requiere que la deformación a la ruptura en la prueba de tensión directa cumpla también con lo indicado en esta Tabla. El valor m requerido será satisfactorio en ambos casos.

- Punto de Inflamación Cleveland, Esta prueba permite determinar la temperatura mínima a la que el asfalto produce flamas instantáneas al estar en contacto con el fuego directo, así como aquella en que inicia su combustión. La prueba consiste en colocar una muestra de asfalto en una copa abierta de Cleveland, en donde se incrementa paulatinamente su temperatura hasta lograr que al pasar una flama por la superficie de la muestra se produzcan en ella flamas instantáneas, la temperatura correspondiente se denomina punto de inflamación. Si se continúa elevando la temperatura de la muestra se llega al punto en que se inicia la combustión del material, la temperatura correspondiente se denomina punto de combustión (Ver Figura 20 y 21). (SCT-M-MMP-4-05-007/00, 2007)

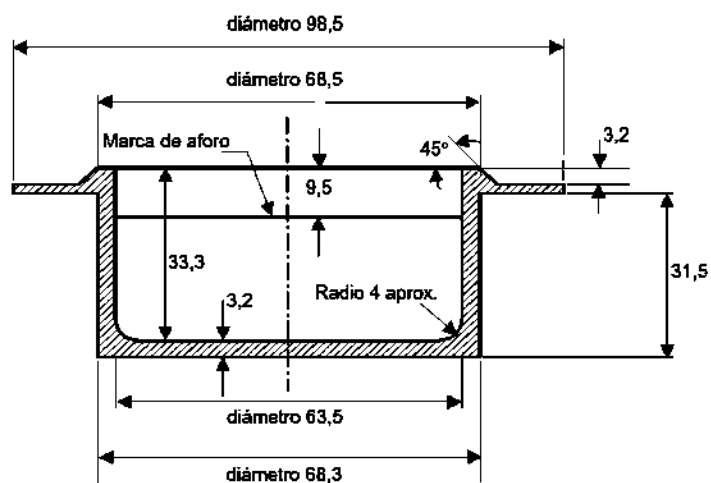


Figura 20.- Copa abierta de Cleveland. Fuente: Norma MMMP4:05:007/00

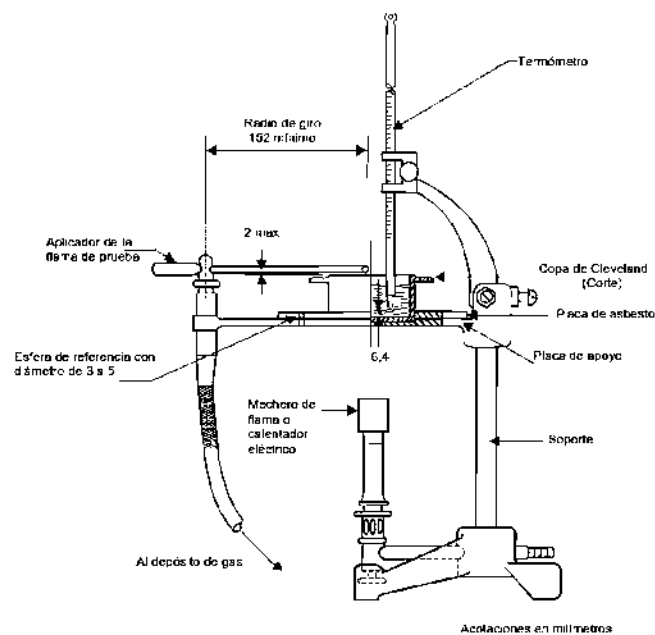


Figura 21.- Montaje del equipo. Fuente: Norma MMMP4:05:007/00

- por probar a través de un tubo capilar al vacío, bajo condiciones de presión y temperatura preestablecidas, corregido por el factor de calibración del viscosímetro (Ver Figura 22). (SCT-M-MMP-4-05-002/02, 2002)

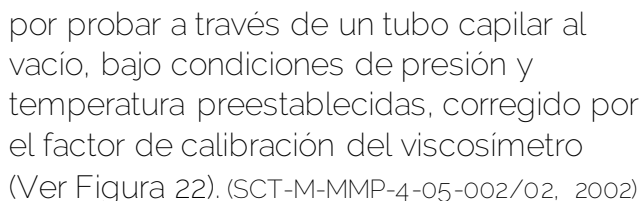


Figura 22.- Viscosímetro capilar de vacío del Instituto del Asfalto (IIVV)

- Módulo Reológico de Corte Dinámico, Esta prueba permite determinar el módulo reológico de corte dinámico y el ángulo fase, como propiedades viscoelásticas lineales de un cemento asfáltico, sometiendo una muestra a esfuerzos de torsión utilizando un reómetro dinámico de corte. Es aplicable a cementos asfálticos con módulos complejos en el rango de 0,1 a 1 000 kPa, los que se obtienen en forma típica entre 5 y 85°C (Ver Figura 23). (SCT-M-MMP-4-05-025/02, 2002)

$$\text{Módulo Reológico de Corte Dinámico} = \frac{G^*}{\sin \delta}$$

Ecuación 1.- Determinación del DSR

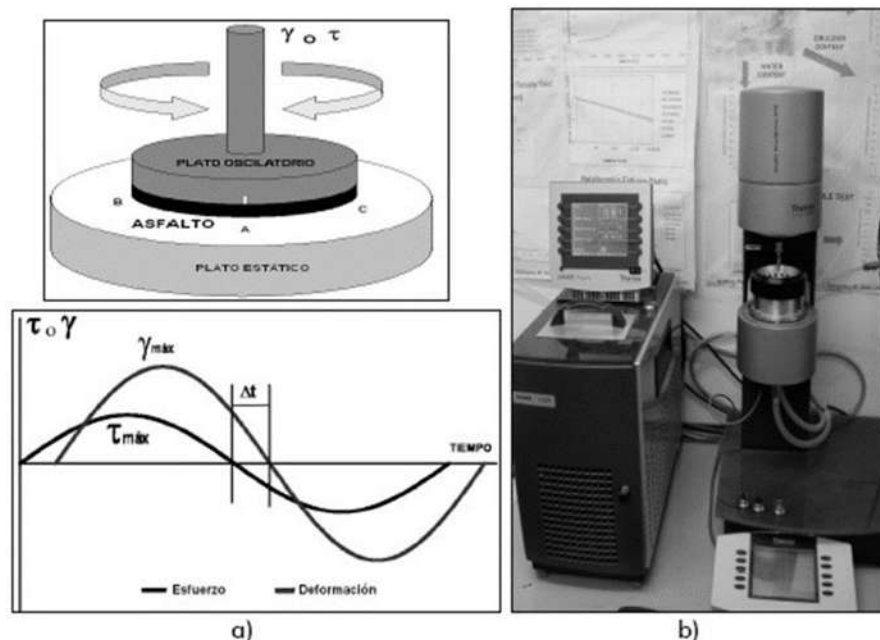


Figura 23.- Reómetro de corte dinámico (DSR). a) Muestra del procedimiento del ensayo DSR. b) Equipo DSR. Fuente: SciELO

- Residuo de la Película Delgada de Cementos Asfálticos, Esta prueba permite estimar el endurecimiento que sufren los cementos asfálticos que en películas de pequeño espesor se someten a los efectos del calor y el aire. La prueba consiste en someter una muestra de cemento asfáltico a un proceso de calentamiento para producir un residuo al cual, dependiendo del tipo de cemento asfáltico que se esté probando, se le realizan diversas pruebas.

En el caso de cementos asfálticos normales, al residuo se le efectúan pruebas para determinar la pérdida de masa que experimentó, su viscosidad dinámica, la penetración que conserva respecto a la del cemento asfáltico original, así como su ductilidad; si se trata de cementos asfálticos modificados, al residuo se le efectúan pruebas para determinar la pérdida de masa que experimentó, la penetración del residuo y la penetración que conserva respecto a la del cemento asfáltico modificado original, su ductilidad,



Figura 24.- Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO). Fuente: Proetisa

recuperación elástica en ductilómetro, incremento en temperatura anillo y esfera (punto de reblandecimiento), módulo reológico de corte dinámico, así como su ángulo de fase (Ver Figura 24). (SCT-M-MMP-4-05-010/02, 2002)

- Ensayo de Vasija de envejecimiento a presión (PAV)



La vasija de envejecimiento a presión (PAV), mediante la exposición de muestras de asfalto a calor y presión, representa el envejecimiento del pavimento a lo largo de los años de servicio (Ver Figura 25). (SCT-NCMT-4-05-001, 2002)

Figura 25.- Vasija de envejecimiento a presión (PAV). Fuente: Proetisa

- Viscosímetro rotacional (RV), La prueba se utiliza para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en el laboratorio. Se determinan las viscosidades a distintas temperaturas, y se construye una carta de viscosidad en donde se seleccionan las temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a los rangos de viscosidades de 0.17 ± 0.02 y 0.28 ± 0.03 Pa respectivamente.



Figura 26.- Viscosímetro rotacional (RV). Fuente: Elcometer

- Reómetro en Viga de Flexión (BBR), Mide Rigidez (S) y pendiente de la curva $\log(S)$ v/s $\log(t)$, valor "m", se mide en estado después de RTFOT y PAV (Ver Figura 27).



Figura 27.- Reómetro en viga de Flexión (BBR). Fuente: Metrología Adatec

Las pruebas anteriormente explicadas sirven para simular las condiciones a las que el asfalto estaría sujeto desde la entrega del proveedor, la etapa de mezclado, traslado a obra y tendido, y la etapa de servicio, en la Tabla 12, se expone que etapas simula cada prueba.

Tabla 12.- Ensayes de acuerdo la etapa de vida de un asfalto. Fuente: TECA.

Equipo	Proposito
Horno rotatorio de película delgada (RTFO) Vasija de envejecimiento a presión (PAV)	Simula las características del envejecimiento del asfalto
Reómetro de corte dinámico (DSR)	Mide las propiedades del asfalto a temperaturas altas e intermedias
Viscosímetro rotacional (RV)	Mide las propiedades del asfalto a altas temperaturas
Reómetro de viga en flexión (BBR)	Mide las propiedades del asfalto a bajas temperaturas

En la Figura 28 se expone visualmente las pruebas en cada etapa de vida del pavimento, al igual que todos los parámetros requeridos para cada calificar en algún Grado PG.

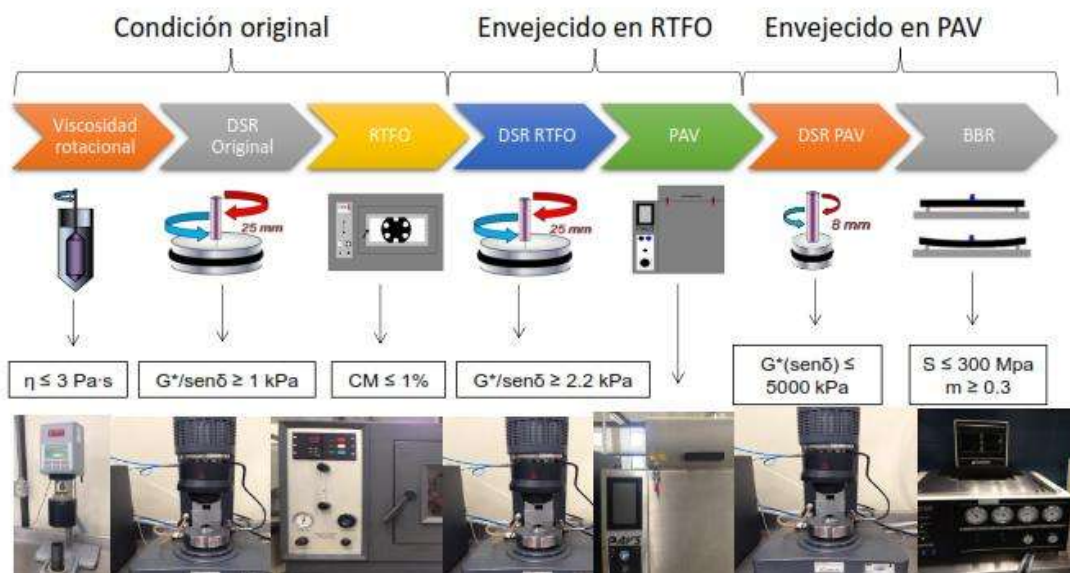


Figura 28.- Ensayes de Simulación de Etapas de Vida de un Asfalto. Fuente: Dr. Delgado

- II. Cuando un cemento asfáltico Grado PG se utilice para producir una emulsión asfáltica convencional que se empleará para la construcción de una carpeta estructural o de una carpeta delgada de rodamiento, además de satisfacer lo establecido en la Fracción anterior, la emulsión asfáltica, según su tipo, cumplirá con los requisitos de calidad indicados en la Norma N·CMT·4·05·001, Calidad de Materiales Asfálticos, antes de la prueba de película delgada.
- III. Cuando un cemento asfáltico Grado PG se utilice para producir un material asfáltico modificado, además de satisfacer lo establecido en la Fracción (a). de esta Norma, el material asfáltico modificado, según su tipo y el modificador utilizado, cumplirá con los requisitos de calidad indicados en la Norma N·CMT·4·05·002, Calidad de Materiales Asfálticos Modificados.

SELECCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN LA
CLASIFICACIÓN DE GRADO DE DESEMPEÑO (PG)

Capítulo 3.- Selección del cemento asfáltico según la clasificación de Grado de Desempeño (PG)

Un cemento asfáltico con clasificación PG, se debe seleccionar en función de la temperatura máxima y mínima en el lugar de la aplicación, de acuerdo con la Norma de la SCT N-CMT-4-05-004, Calidad de los materiales asfálticos grado PG.

En ocasiones no nos es posible tomar la temperatura directamente en el pavimento, por lo cual se han realizado estudios para determinar la temperatura a 2 centímetros de profundidad con respecto a la superficie de la carpeta. Para ello, se ha relacionado la temperatura registrada en la zona de estudio y la latitud de dicho lugar.

Se debe revisar la estadística de los días más calurosos, durante varios años, para establecer el promedio estadístico de los 7 días más calurosos reportados en donde se construirá la carretera. (AMAAC-PA-MA, 2016)

El cemento asfáltico clasificado por Grado PG surge de la implantación de estas temperaturas en el Modelo LTPP de la FHWA. Pero antes de ahondar más en el tema de las temperaturas, comprendamos lo que es el Grado de Desempeño en los cementos asfálticos.

3.1.-Grado PG

Los cementos asfálticos Grado PG son aquellos cuyo comportamiento en los pavimentos está definido por las temperaturas máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación, dentro de las cuales se asegura un desempeño (performance) adecuado para resistir deformaciones o agrietamientos por temperaturas bajas o por fatiga, en condiciones de trabajo que se han correlacionado con los ensayos especiales y simulaciones de envejecimiento a corto y a largo plazo mencionados anteriormente. Estos ensayos miden propiedades físicas que pueden ser directamente relacionadas, mediante principios de ingeniería, con el comportamiento en obra, y forman parte de los productos del Programa de Investigación de Carreteras desarrollado por la Unión Americana, conocida como la Tecnología SHRP (SCT-N-CTM-4-05-004/08, 2008).

El grado de desempeño o Grado PG es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El Grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una

determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a que estará sujeta durante su vida útil.

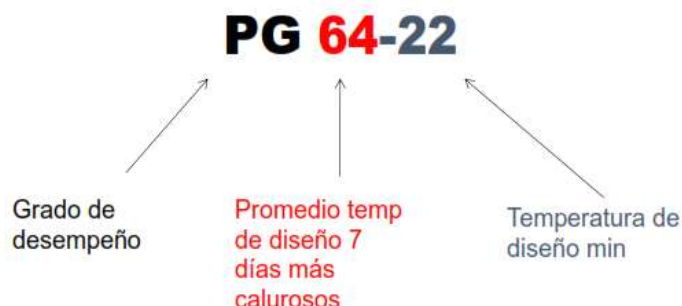


Figura 29.- Sistema de clasificación basado en clima. Especificación del cemento asfáltico SUPERPAVE.
Fuente: Asociación Mexicana del Asfalto, A. C.

Un cemento asfáltico clasificado como PG 64-22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como sesenta y cuatro (64) grados Celsius y tan bajas como menos veintidós (-22) grados Celsius (Ver Figura 29). Las temperaturas máximas y mínimas se extienden tanto como sea necesario con incrementos estandarizados de seis (6) grados. Sin embargo, generalmente las temperaturas máximas se consideran de sesenta y cuatro (64) a ochenta y ocho (88) grados Celsius y las mínimas, de menos cuarenta (-40) a menos veintidós (-22) grados Celsius (Ver Figura 30 y 31). (SCT-N-CTM-4-05-004/08, 2008)

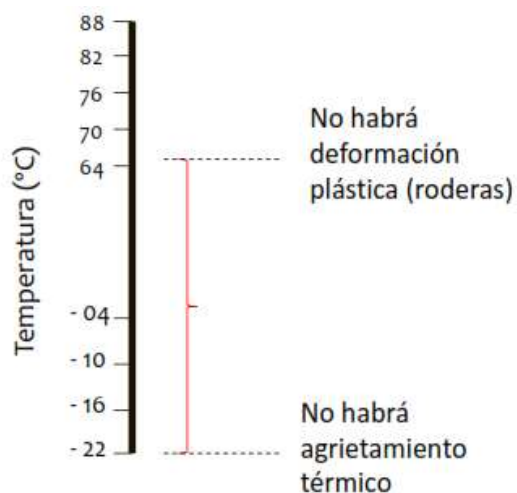


Figura 30.-Nomenclatura de gradiente de temperatura alta y baja. Fuente: Asociación Mexicana del Asfalto, A. C.

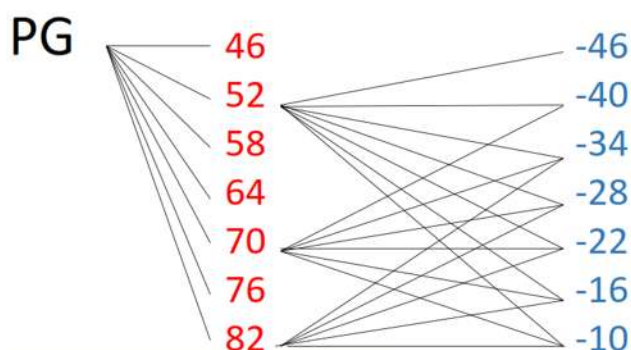


Figura 31.-Incremento del grado en 6 °C para temperaturas altas y bajas. Fuente: Asociación Mexicana del Asfalto, A. C.

Los grados PG pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperaturas que se registran en el país, sin embargo, para fines prácticos, la Norma de la SCT N-CMT-4-05-001/08 SCT recomienda al usuario seleccionar un cemento asfáltico que corresponda a uno de los tres (3) grados PG que se indican en el mapa de la Figura 32, de acuerdo con el clima de la zona geográfica donde se le pretenda utilizar, de entre las zonas en que se ha dividido la República Mexicana, pero considerando que dentro de una misma zona, las condiciones del clima en un área determinada pueden variar, lo que se debe tomar en cuenta para elegir el Grado PG adecuado. Dicho mapa resulta ser ambiguo y demasiado general, ya que no es posible visualizar las fronteras precisas entre zonas en la que cambia de Grado PG, (SCT-N-CTM-4-05-004/08, 2008)

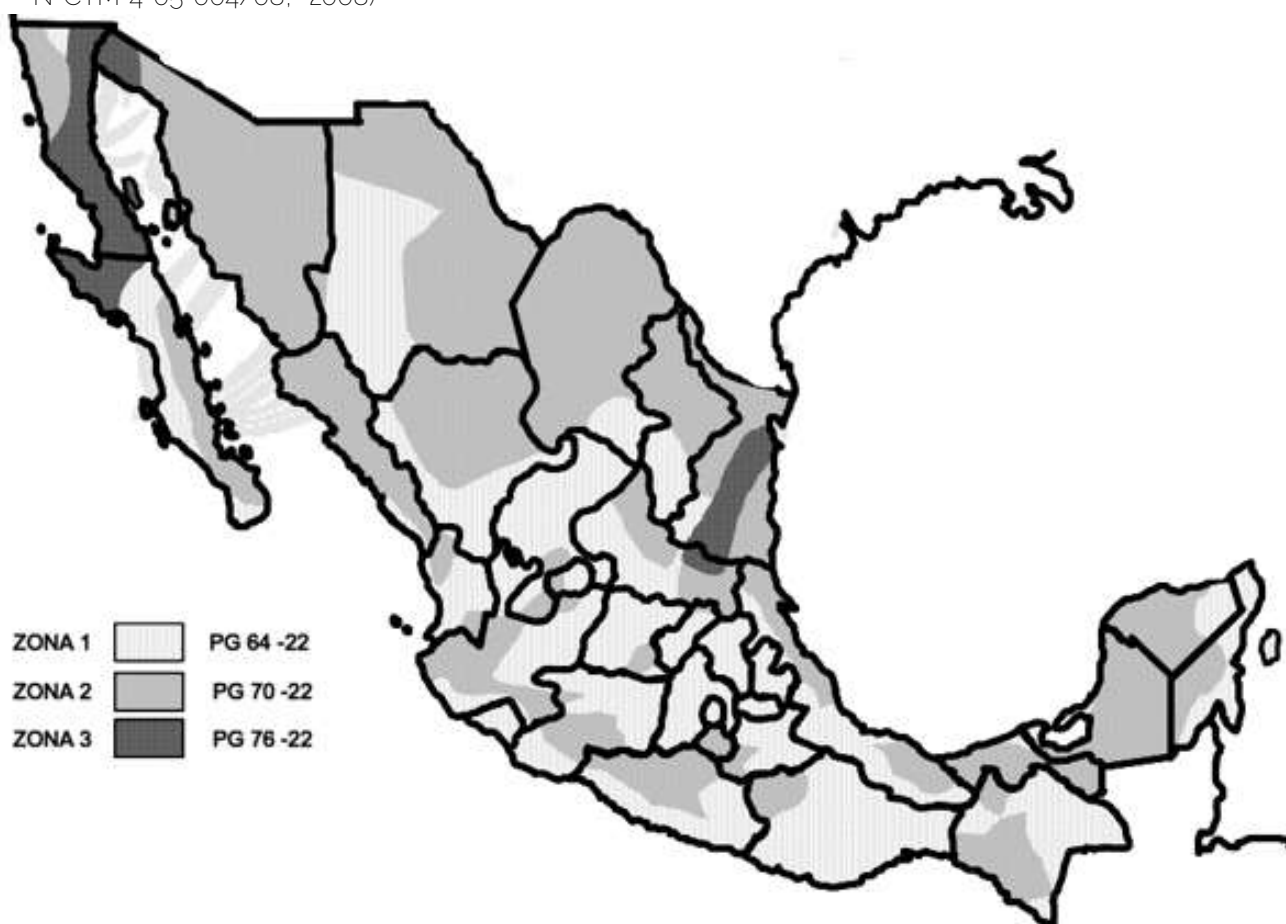


Figura 32.-Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos Grado PG. Fuente: N-CMT-4-05-001/08 SCT

La temperatura máxima del Grado PG seleccionado según el clima, se ajusta de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas, acumulados durante un periodo de

servicio del pavimento de diez (10) años (ΣL_{10}) y de acuerdo con la velocidad de operación, como se indica en la Tabla 13. (SCT-N-CTM-4-05-004/08, 2008)

Tabla 13.- Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada y con la velocidad de operación. Fuente: N-CMT-4-05-001/08 SCT

Intensidad del tránsito (ΣL_{10})	Intensidad del tránsito (ΣL_{10})	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta Entre 10 y 30 km/h)	Ajuste por tránsito detenido (Cruceros)
$\Sigma L_{10} < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 74
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq \Sigma L_{10} \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\Sigma L_{10} > 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

ΣL_{10} = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante un periodo de servicio del pavimento de 10 años.

Las Normas de la SCT no especifican cuando es necesario diseñar con cemento asfáltico bajo criterios de Viscosidad o por Grado PG. El Protocolo AMAAC si especifica que en su metodología de diseño los criterios de selección de cemento asfáltico sean por Grado PG. La selección del Grado PG que requiere el Protocolo AMAAC, en México, se basa el manual estadounidense de la Federal Highway Administration, SUPERPAVE.

SUPERPAVE

3.2.- SUPERPAVE

De acuerdo con la Administración Federal de Carreteras (FHWA) el procedimiento de selección del asfalto SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) se basa en las temperaturas más bajas y más altas que se esperan en el lugar de la aplicación. Se usan dos modelos para estimar las temperaturas altas y bajas del pavimento con relación a la temperatura del aire. Las temperaturas estimadas del pavimento se usan entonces para determinar las calificaciones de desempeño del asfalto de alta y baja temperatura para cualquier ubicación dentro de los Estados Unidos y Canadá. (FHWA-SUPERPAVE, 1998)

El procedimiento de selección del asfalto SHRP calcula la temperatura alta del pavimento a partir de la temperatura promedio más alta del aire de 7 días durante el año. Se utiliza un modelo teórico para estimar la alta temperatura del pavimento a partir de la temperatura del aire y la ubicación geográfica. Este modelo fue desarrollado sobre la base de los resultados del modelado de transferencia de calor y análisis de regresión,

El procedimiento de selección del asfalto SHRP también calcula la temperatura baja del pavimento de acuerdo con la temperatura más baja del aire durante el año. Supone que la temperatura baja del pavimento de diseño es igual a la temperatura del aire más baja. El SHRP canadiense (C-SHRP), por otra parte, utiliza un modelo para estimar la temperatura baja del pavimento a una profundidad por debajo de la superficie de la capa de concreto asfáltico (AC) a partir de la baja temperatura del aire

El Programa de Monitoreo de Estaciones (Season Monitoring Programme - SMP) recopiló los datos de temperatura alta y baja del aire y del pavimento y resumieron en dos bases de datos que incluyen datos diarios de alta y baja temperatura para diferentes profundidades de pavimento. Estas bases de datos se utilizaron para desarrollar el LTPP (Long Term Pavement Performance) Seasonal AC Pavement Temperature Models.

Los datos de SMP también se utilizaron en una serie de comparaciones de datos y modelos a lo largo del estudio. Estas comparaciones se realizaron para validar el modelo LTPP, cuantificar las diferencias con los modelos existentes SHRP, y comparar los grados de desempeño determinado a partir de los modelos. Para las comparaciones de grado de desempeño, también se utilizaron datos (temperaturas promedio alta y baja del aire de 7.801 estaciones meteorológicas de los Estados Unidos y Canadá) del programa SHRPBIND

Se pueden considerar dos tipos diferentes de variables cuando se determinan las temperaturas de pavimento del diseño: la temperatura media del aire y la temperatura estimada del pavimento. La desviación estándar de la temperatura media del aire (alta y baja) se utiliza para la variabilidad de la temperatura del aire, y el error cuadrático medio del modelo se considera para la variabilidad del modelo de temperatura del pavimento (alta y baja). (FHWA-SIPERPAVE, 1998)

3.3.- Modelo LTPP

El Programa de Desempeño del Pavimento a Largo Plazo (Long-Term Pavement Performance - LTPP) fue establecido para recolectar datos de desempeño del pavimento como una de las principales áreas de investigación del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP). Los primeros cinco años del programa LTPP se completaron bajo la financiación y dirección de SHRP. Desde 1991, la FHWA ha continuado la gestión y financiación del programa. Los datos recogidos incluyen información sobre siete módulos: Inventario, Mantenimiento, Seguimiento (Deflexión, Estrés y Perfil), Rehabilitación, Pruebas de Materiales, Tráfico y Clima. (FHWA-SIPERPAVE, 1998)

3.3.1.- Modelo LTPP de temperatura de alta y baja del pavimento

Se realizó una serie de análisis estadísticos sobre los datos de la base de datos mensual de temperatura estacional alta y baja del pavimento de concreto asfáltico para desarrollar un modelo y así estimar las temperaturas altas y bajas del pavimento a varias profundidades por debajo de la capa superficial.

La base de datos mensual de alta y baja temperatura se verificaron minuciosamente para detectar valores atípicos. Se previeron problemas de datos debido al mal funcionamiento del sensor u otros problemas durante la recopilación de datos. Para minimizar los errores de datos, se desarrollaron una serie de gráficos y se inspeccionaron visualmente para detectar puntos de datos que parecían sospechosos.

Se realizó un análisis de correlación con la base de datos mensual de temperatura alta y baja del SAPT para encontrar las variables potenciales que se deben considerar para el modelo. Las variables que se consideraron en el análisis de correlación fueron temperatura del aire (T_{air}), latitud (Lat), elevación ($Elev$), temperatura del pavimento (T_{pav}) y profundidad en la capa CA (H). También se consideraron las transformaciones no lineales de algunas de las variables.

Del análisis de la correlación, apareció que T_{air} , Lat , y H podrían ser factores principales en el modelo. Para encontrar el tipo de correlación entre estas variables (variables independientes) y la variable dependiente (T_{pav}), la variable dependiente se representó gráficamente en función de las variables independientes (T_{air} , Lat y H). La Figura 33 muestra la relación entre T_{pav} y T_{air} como lineal. La Figura 34, por otra parte, muestra que la relación entre T_{pav} y Lat no es lineal. Como muestra la Figura 35, la relación entre T_{pav} y H es también algo no lineal.

A continuación, y solo como ilustración se muestran las figuras que representan las relaciones la T_{pav} con T_{air} , Latitud y Profundidad (H) del modelaje de temperaturas bajas, las cuales siguen el mismo comportamiento que las temperaturas altas.

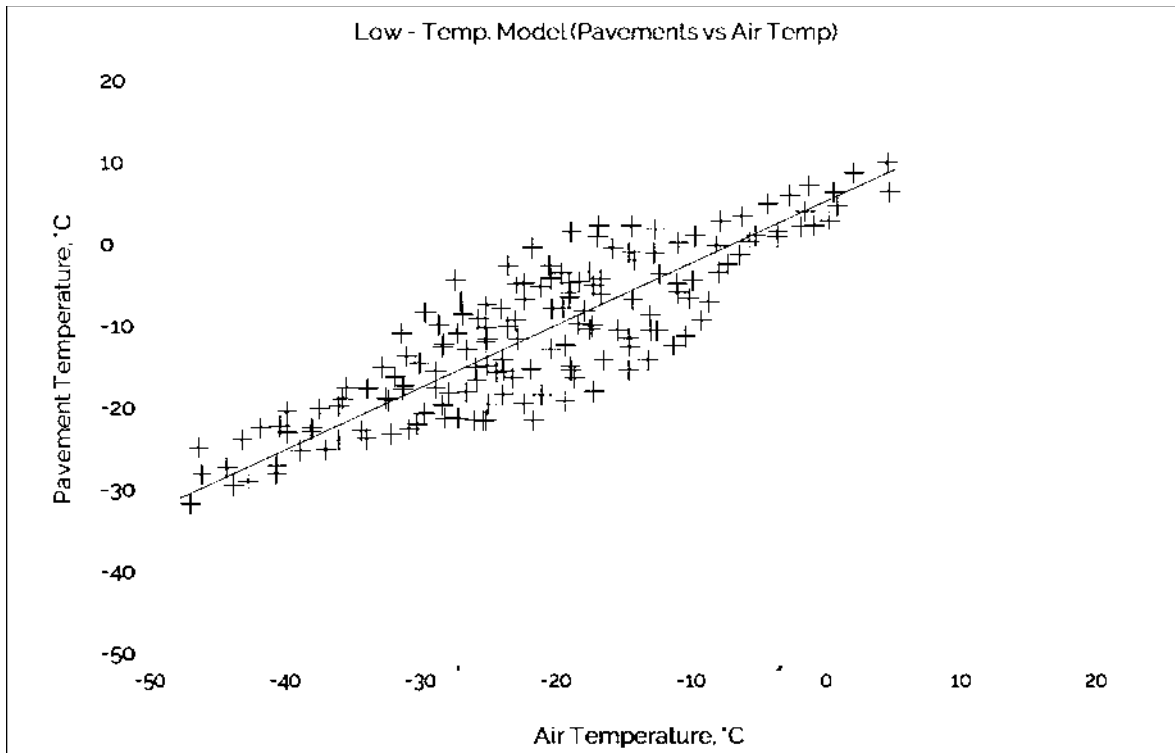


Figura 33.-Temperatura Baja del Pavimento vs Temperatura del Aire. Fuente: FHWA - RD

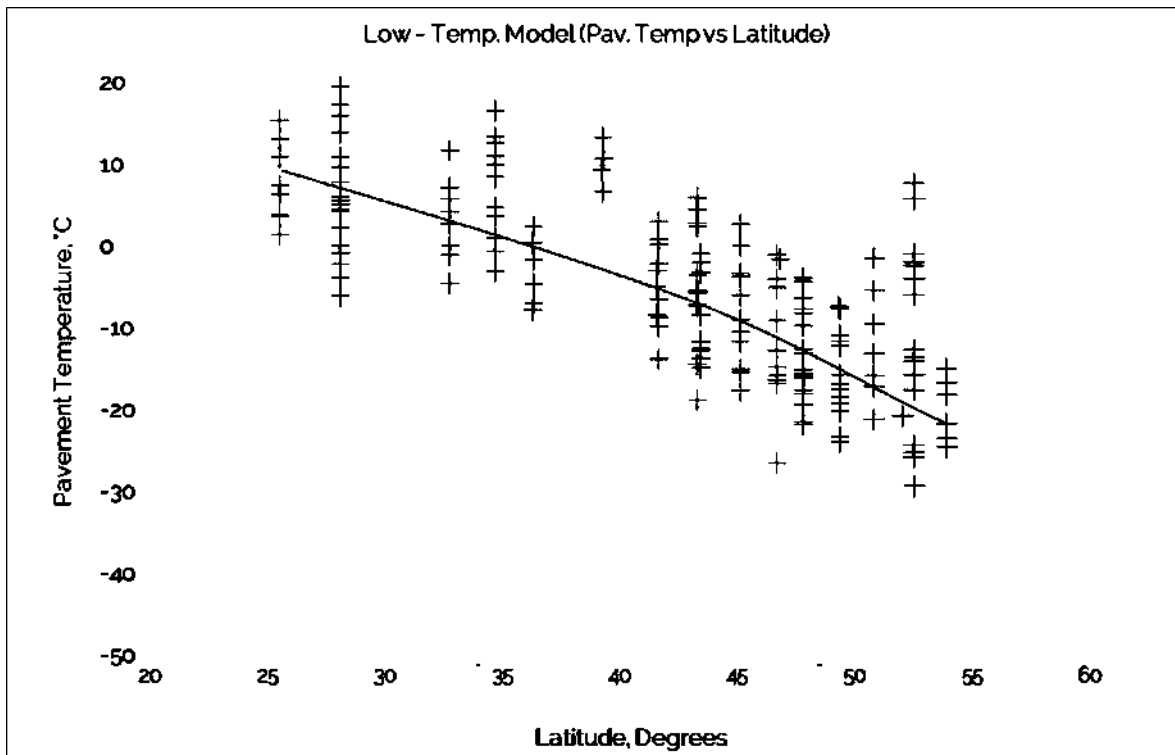


Figura 34.- Temperatura Baja del Pavimento vs Latitud. Fuente: FHWA - RD

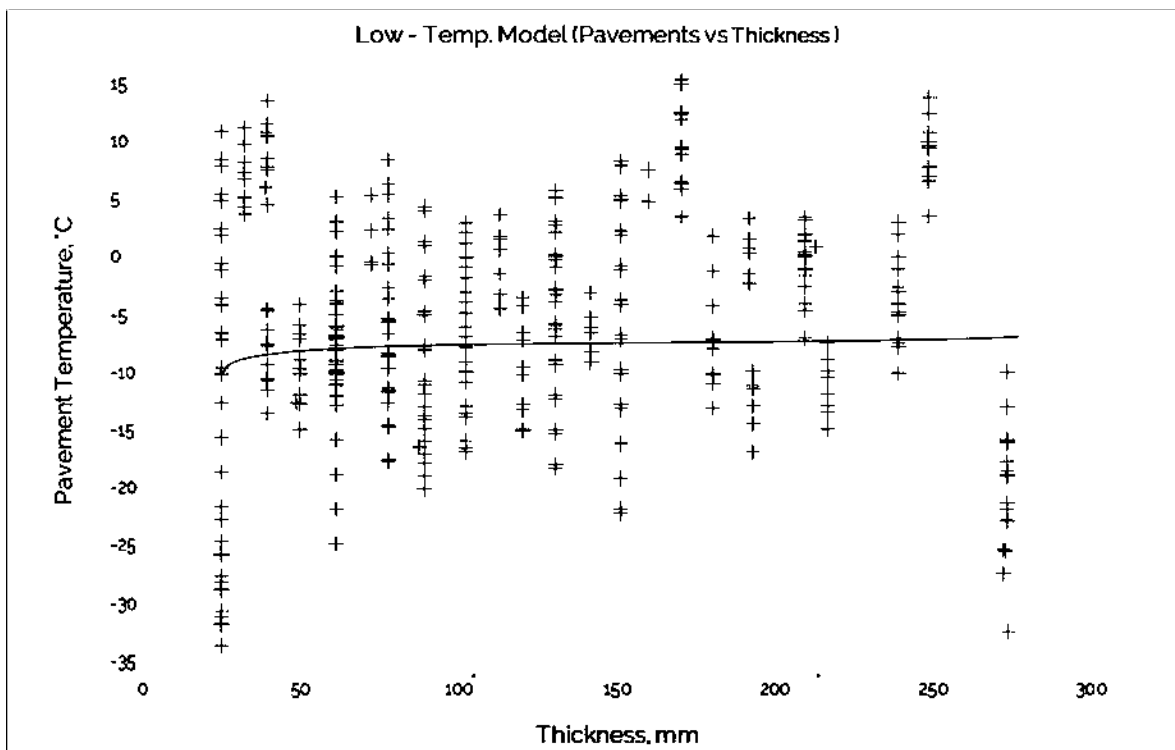


Figura 35.- Temperatura Baja del Pavimento vs Profundidad. Fuente: FHWA - RD.

El modelo de baja y alta temperatura LTPP se puede usar para calcular temperaturas bajas y altas de pavimento a niveles de confiabilidad del 50 por ciento. Sin embargo, a niveles de confiabilidad superiores al 50 por ciento, se debe utilizar una ecuación más rigurosa. La ecuación siguiente incluye el término de fiabilidad y debe utilizarse para calcular las bajas temperaturas del pavimento a un nivel deseado de fiabilidad. Los modelos SHRP y LTPP estiman temperaturas en diferentes niveles de fiabilidad (Ver Figura 36).

$$T_{pav} = -1.56 + 0.72T_{air} - 0.004Lat^2 + 6.26\log_{10}(H + 25) - z(4.4 + 0.52(\sigma_{air})^2)^{1/2}$$

Ecuación 2 - Temperatura baja del pavimento por el Modelo LTPP con confiabilidad. Fuente: FHWA-RD

Dónde:

T_{pav} = Temperatura baja del pavimento asfáltico bajo la superficie. °C.

T_{air} = Temperatura media más baja anual del ambiente. °C.

Lat = Latitud de la sección, grados.

H = Profundidad, mm.

σ_{air} = Desviación Estándar de la temperatura media más baja del ambiente, °C.

z = Distribución Normal, $z = 2.055$ para una confiabilidad del 98%.

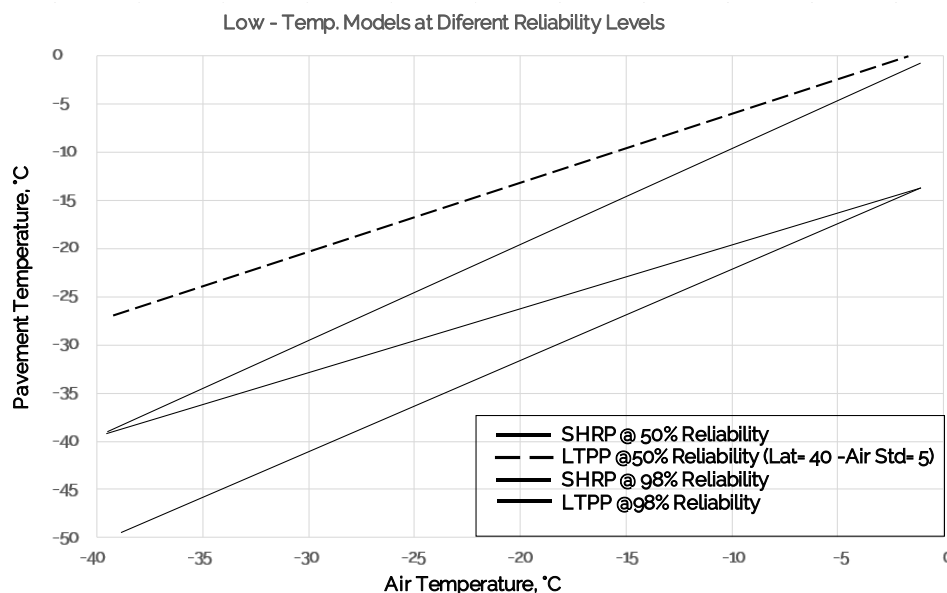


Figura 36 - Comportamiento de los Modelos SHRP y LTPP con diferentes niveles de confiabilidad. Fuente: FHWA-RD

El último término de la ecuación 2 es el término de error, que está relacionado con la incertidumbre en la estimación de la temperatura correcta del pavimento. El término de error se restó de la ecuación de baja temperatura del pavimento para proporcionar una mayor fiabilidad. Dos variabilidades diferentes la temperatura media del aire y el modelo causan la incertidumbre. Estas variabilidades se designan por la desviación estándar de la temperatura media del aire (σ_{air}) y el error estándar estimado del modelo (σ'_{model}).

La Figura 36 muestra que la temperatura estimada del SHRP a una fiabilidad del 98 por ciento (para condiciones de superficie a una latitud de 40 grados) podría ser hasta 10 grados menor que el LTPP estimado a un nivel similar de responsabilidad.

La ecuación 3 se utilizó para calcular la alta temperatura del pavimento a niveles de confiabilidad superiores al 50 por ciento. Para altas temperaturas, las temperaturas del pavimento se incrementaron para mayor confiabilidad.

$$T_{pav} = 54.32 + 0.78T_{air} - 0.0025Lat^2 - 15.14\log_{10}(H + 25) + z(9 + 0.61(\sigma_{air})^2)^{1/2}$$

Ecuación 3.- Temperatura alta del pavimento por el Modelo LTPP con confiabilidad. Fuente: FHWA-RD

Dónde:

T_{pav} = Temperatura alta del pavimento asfáltico bajo la superficie. °C.

T_{air} = Temperatura alta del ambiente. °C.

Lat = Latitud de la sección, grados.

H = Profundidad, mm.

σ_{air} = Desviación Estándar de los 7 días más calurosos, °C.

z = Distribución Normal, $z = 2.055$ para una confiabilidad del 98%.

El último término de la ecuación 3 (el término de error) está relacionado con la fiabilidad de la temperatura del pavimento y se calcula de forma similar al modelo de baja temperatura.

La Figura 37 muestra que la temperatura estimada de SHRP a una fiabilidad del 50 por ciento (para una profundidad de 20 mm y una latitud de 40 grados) puede ser hasta 4 grados mayor que la estimación de LTPP a un nivel similar de responsabilidad. Sin embargo, con una fiabilidad de 98 por ciento, la estimación de LTPP fue más alta que la de SHRP. Esto se debe a que la variabilidad del modelo de temperatura del pavimento no se consideró en el modelo SHRP. (FHWA-SIPERPAVE, 1998)

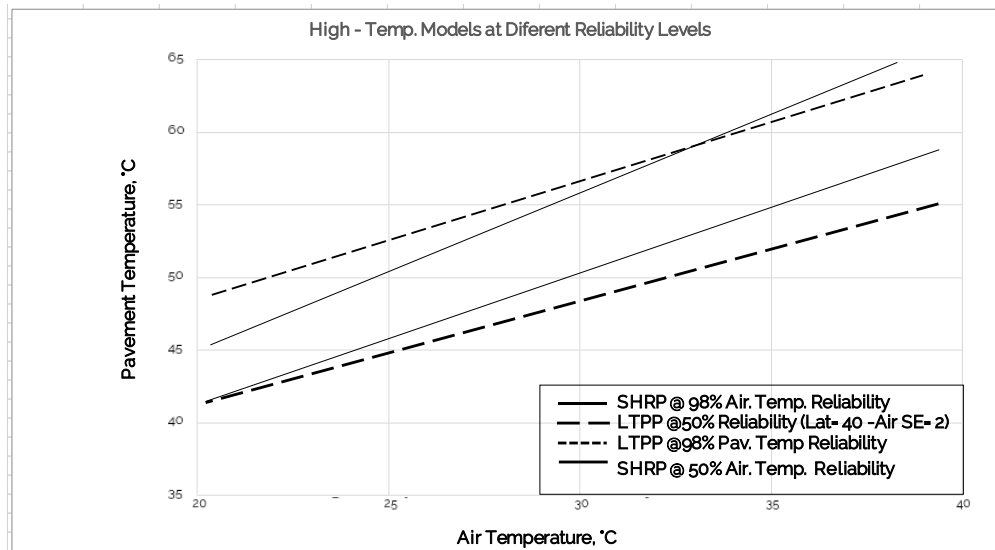


Figura 37.- Comportamiento de los Modelos SHRP y LTPP con diferentes niveles de confiabilidad (Profundidad 20 mm). Fuente: FHWA-RD

3.4.- PEMEX EKBÉ SUPERPAVE PG

Como parte de los compromisos de Petróleos Mexicanos PEMEX en materia de producción, comercialización y promoción del asfalto, Pemex Refinación lanza al mercado el Asfalto denominado PEMEX EKBÉ SUPERPAVE PG 64-22, mismo que sustituye al Asfalto AC-20.

El PEMEX EKBÉ SUPERPAVE PG 64-22 es un producto enriquecido que se caracteriza por una mayor durabilidad, flexibilidad y resistencia a temperaturas extremas diseñado para todo tipo de tráfico, cuyos métodos y procedimientos de aplicación son los mismos que los requeridos para el Asfalto AC-20. Así mismo, este producto cumple con la normatividad establecida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (N-CMT-4-05-004/08), produciendo el cemento asfáltico más adecuado para cada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a la que el producto estará sujeto durante su vida útil.

EKBÉ SUPERPAVE PG (la Estrella del Camino) es el asfalto cuyo comportamiento se define por preservar sus características en el rango de temperaturas máxima y mínima que se espera en el lugar de su aplicación, dentro de las cuales se asegura un desempeño (performance) adecuado para resistir deformaciones o agrietamientos y fatiga por tránsito. (PEMEX-EKBÉ-SUPERPAVE-PG, 2014)

ZONIFICACIÓN DEL GRADO DE DESEMPEÑO PARA LA SELECCIÓN
DE CEMENTOS ASFÁLTICOS PARA EL ESTADO DE MICHOACÁN

Capítulo 4.- Zonificación del Grado de Desempeño para la Selección de Cementos ASFálticos para el Estado de Michoacán

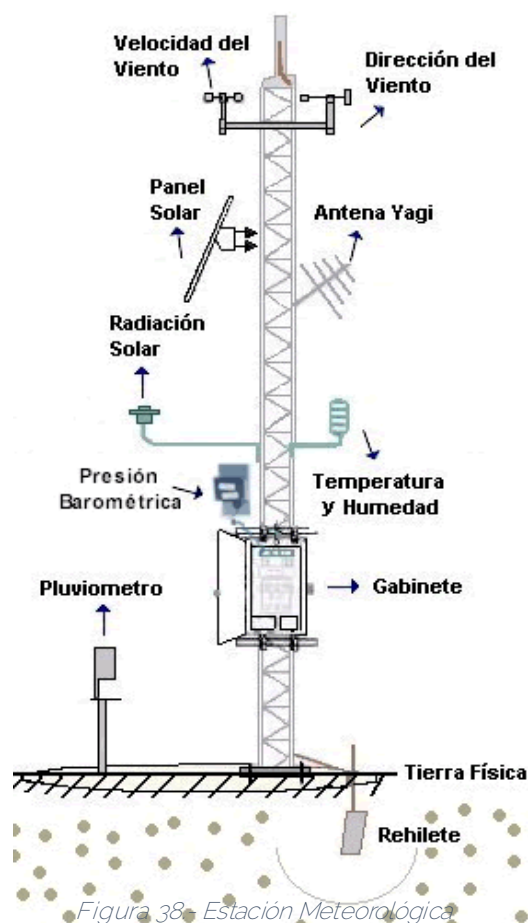
Los modelos del LTPP de la FHWA para temperatura alta y baja establecen la relación que existe entre la temperatura del pavimento y las temperatura baja y alta censada del aire, al igual existe relación con la Latitud y la profundidad debajo de la capa del pavimento (H).

Para la obtención de las temperaturas bajas y altas del aire se recopilaron datos de bases de datos públicas diferentes, tales como las de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Centro Michoacán, y a través del Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (INAI) y la Base de Datos del CLICÓM. Dicha información es recolectada de Estaciones Meteorológicas, cuya función es censar diferentes parámetros climáticos, como: Velocidad - dirección del viento, Radiación solar, Precipitación pluvial, Presión barométrica y Temperatura Baja (TMIN) y Alta (TMAX).

Una Estación Meteorología es un conjunto de dispositivos eléctricos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de forma automática (sobre todo en forma numérica) (Referencia OMM 182) (SMN-EMAS, 2017).

Una Estación Meteorológica Automática (Ver Figura 38), está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas Variables Meteorológicas para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas por estación. (SMN-EMAS, 2017)

Nota: La hora que se utiliza para registrar los datos es el horario TUC ó UTC (Tiempo Universal Coordinado) por esta razón deberá tener en consideración este factor para la correcta interpretación de los datos desplegados en esta página. El área representativa de las estaciones es de 5 km de radio aproximadamente, en terreno plano, excepto en terreno montañoso.



Cabe aclarar que no todas las estaciones son de este tipo, algunas zonas aún no cuentan con estos dispositivos automáticos, y los datos monitorizados no se envían de forma digital a ninguna base de datos de forma automática, en su lugar, los datos censados son recolectados por personal de CONAGUA o algún habitante autorizado de la localidad cercana a la estación meteorológica, al igual, dependiendo de la estación, los datos se generan de forma digital, y solo son guardados en un pendrive para su posterior envío, pero, regularmente en otras estaciones aún más antiguas, los datos se debían registrar por un personal de forma escrita en papeletas, las cuales no siempre se registran de forma diaria, ya sea inasistencia del personal que las colecta o por mal funcionamiento de los instrumentos. Esto complica la obtención para cualquier usuario de información precisa, continua y real.

Para crear nuestra propia base de datos, solicitamos de forma personal y vía correo electrónico a CONAGUA, organismo que se encargar de regular algunas bases de datos de algunas estaciones, CLICÓM, otra base de datos, e INAI, organismo que coordina varias bases de datos y dependencias. Lo que obtuvimos fueron un total de 232 Estaciones Meteorológicas.

Con tres variables:

- Temperatura Máxima Media Diaria (Ver Tabla 14)
- Temperatura Mínima Media Diaria (Ver Tabla 15)
- Precipitación Media Diaria (Ver Tabla 16)

Tabla 14.- Ejemplo de acomodo de los datos de una estación meteorológica – Estación 16009 Arteaga. Arteaga (Temp. Máx. Diaria) Fuente: CONAGUA

N° ESTACIÓN	NOMBRE DE ESTACIÓN	ELEMENTO	AÑO-MES	DÍAS																									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...	31									
16009		002 Temp, daily max																											
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-02	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	27	28	27	27	...	33								
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-03	31.5	31	29.5	23.3	32.2	31	31	31.2	32	32	32.2	32.3	32.5	32	33.2	...	X									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-04	30	29	32	35	32.5	31	30	32	32.5	33.5	34.5	X	X	X	X	...	30.8									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-05	32.5	34.8	35.5	34.8	32.5	31.2	31.2	30.5	31	30.5	31.5	32.6	33.8	33.5	34.5	...	X									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-06	33.4	32.8	33.8	33.2	35.2	32.8	34.8	34.5	35.5	35.5	35.2	33.4	32.8	29.8	29.6	...	33.6									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-07	29.6	30.2	30.4	31.4	28.9	32.4	33.6	27.8	32.1	27.3	25.7	28.7	25.7	27.5	32.5	...	25.9									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-08	31.8	31.5	29.9	25.7	26.5	29.5	31.3	31.1	33.4	32.8	32.9	31.2	30.4	30.4	30.2	...	X									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-09	30.6	30.1	29.6	29.6	30.1	30.5	26.4	30.7	31.6	29.1	27.5	29.6	22.7	30.5	31.9	...	26.5									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-10	29.6	31.4	31.1	31.5	31.5	28.6	23.2	27.9	30.9	31.1	29.5	28.6	31.4	29.6	31.9	...	X									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-11	28.5	31.6	34.2	31.1	34.2	34.3	34.6	33.3	34.5	34.7	34.5	34.3	33.1	33.2	33.2	...	31.1									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-12	32.7	33.4	33.1	33.4	32.5	34.3	33.9	32.8	32.1	31.7	31.1	30.6	31.6	30.5	31.1	...	36.1									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-01	31.2	31.9	31.9	31.1	30.9	32.7	32.6	33	32.5	34.9	33.8	33.9	31.8	34.5	36.1	...	X									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-02	32.3	33.6	32.5	31.5	32.5	31.3	28.6	30.9	31.5	31.6	31.1	32.5	32.1	31.3	32.8	...	32.1									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-03	32.5	31.6	32.6	33.1	34.6	32.1	31.4	32.1	32.8	32.1	31.6	33.6	32.6	31.5	31.6	...	X									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-04	32.6	32.7	31.5	33.4	29.1	29.6	32.2	32.2	32.5	32.4	32.5	33.6	34.2	33.5	32.4	...	32.7									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-05	33.4	34.5	33.9	32.2	31.6	31.6	30.9	31.7	31.9	33.5	34.6	33.7	33.4	22.2	33.6	...	32.5									
	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...									

Tabla 15.- Ejemplo de acomodo de los datos de una estación meteorológica – Estación 16009 Arteaga, Arteaga (Temp. Min. Diaria) Fuente: CONAGUA.

N° ESTACIÓN	NOMBRE DE ESTACIÓN	ELEMENTO	AÑOS- MES	DÍAS																										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...	31										
16009		003 Temp, daily min																												
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-02	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7	11	10	...	15									
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-03	12	11	15	16.5	15	16.5	13	10	11.5	10	10	9.2	9	10.5	10	...	14.2										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-04	15	14.5	12.5	13.2	17	15	12.5	13.5	14.2	15	17.2	20	X	X	X	...	X										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-05	13.5	14.2	12.5	12.5	13.5	15.2	10.5	17.5	14.3	17.5	16.5	17.2	16.4	14.4	12.5	...	18.6										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-06	14.6	16.8	16.2	16.5	16.8	18.4	19.2	20.5	20.8	20.4	20.2	20.5	21.4	19.8	20.5	...	20.6										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-07	20.4	18.5	18.3	20.2	19.9	18.7	20.7	21.9	19.6	18.9	19.7	19.5	19.9	19.4	19.9	...	19.3										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-08	21.7	20.3	20.2	19.6	18.3	17.6	17.9	19.7	17.2	18.3	18.7	20.6	20.9	19.9	18.3	...	19.6										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-09	16.5	15.5	16.9	18.1	18.1	19.5	18.7	16.6	18.5	19.1	19.8	19.6	19.8	16.5	17.9	...	18.7										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-10	16.1	18.9	19.2	19.4	19.4	19.8	20.3	19.6	18.4	18.4	20.4	15.9	17.4	19.5	17.2	...	19.8										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-11	16.7	18.9	19.4	18.6	17.2	16.6	16.6	17.4	16.4	16.6	16.5	16.7	17.4	17.2	16.1	...	15.5										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-12	15.2	13.8	14.3	12.5	14.5	12.7	13.2	14.3	12.4	14.9	19.1	15.2	14.7	13.2	14.6	...	14.8										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-01	14.6	13.2	14.4	12.4	13.6	14.4	12.4	15.1	12.1	13.3	13.7	12.3	12.1	12.4	13.4	...	13.5										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-02	13.2	15.1	15.8	15.7	15.6	14.4	15.3	14.7	12.5	16.5	14.7	13.3	12.7	11.8	11.6	...	12.8										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-03	13.8	13.4	16.5	17.7	16.7	14.5	16.6	16.6	13.4	10.3	13.6	12.1	11.5	13.5	11	...	10.1										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-04	15.5	14.7	15.5	15.8	14.6	10.8	9.2	12.1	10.7	11.4	12.4	13.7	13.4	12.6	12.4	...	13.2										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-05	13.1	13.6	14.2	10.8	16.5	14.6	15.8	16.2	12.5	16.8	14.7	13.5	17.8	16.7	17.1	...	17.7										

Tabla 16.- Ejemplo de acomodo de los datos de una estación meteorológica – Estación 16009 Arteaga, Arteaga (Precipitación Diaria) Fuente: CONAGUA

N° ESTACIÓN	NOMBRE DE ESTACIÓN	ELEMENTO	AÑO-MES	DÍAS																											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...	31											
16009		005 Precip, daily																													
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0										
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-06	0	0	0	0	0	0	0	10.1	0	4.5	0	0	0	5.1	0	...	0											
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-07	11.2	0	0	6.2	0	0	0	5.2	0	2.1	7.4	2.7	27.2	19.4	88.1	...	13.9											
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-08	0	3.3	0	23.7	5.4	4.5	0	0	0	0	3.6	0	0	0	0	...	0											
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-09	6.5	0	0	6.7	5.1	0	13.7	0	63.4	3.2	4.7	73.4	10.3	15.4	0	...	7.1											
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-10	0	5.3	0	0	0	11.5	6.2	6.4	0	0	0	0	0	0	0	...	0											
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-11	0	5.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.9	...	0											
	ARTEAGA, ARTEAGA		1936-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13.7	...	0											
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0											
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-02	0	0	14.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0											
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0											
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0											
	ARTEAGA, ARTEAGA		1937-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0											
	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

A partir de este punto, llamaremos a las bases de datos de TMAX y TMIN de cada estación meteorológica simplemente como "estaciones" para fines prácticos.

Adentrándonos más en el mar de datos de lo que nos ofrece las 232 estaciones, nos muestran los datos con los que cuenta cada una desde su instalación, con fechas que pueden variar desde los años 20's a los años 80's para diferentes estaciones. Y con fechas de terminación que van desde los años 60's a la actualidad. Es preciso indicar que la mayoría de los casos las estaciones cuentan con huecos de información que pueden abarcar años bajando la fiabilidad de

estas. En las Tablas 14, 15 y 16 se muestra el acomodo en que son entregados los datos de cada estación, contando con columnas que contienen: el código único de cada estación (etiqueta identificadora), Nombre de la localidad en la que se encuentra, la variable (TMAX, TMIN y PREC), Año – Mes, y consiguientemente los datos de cada día, del 1ro. de cada mes al final de cada uno, tomando en cuenta que no todos los meses terminan en 30 o que febrero termina en 28 y si fuese año bisiesto termina en 29.

Adicionalmente nos fue proporcionado un listado que cuenta con el código de la estación, Nombre de la localidad, Ubicación (Latitud, Longitud y Altitud) (Ver Tabla 17).

Tabla 17.- Descripción por Estación, Código, Nombre, Ubicación (Coordenadas). Fuente: CONAGUA

ESTACIÓN	NOMBRE	MUNICIPIO	Latitud			Longitud			ALTITUD	COORD. UTM		ZONA
			G	M	S	G	M	S		X	Y	
16001	ACUITZIO DEL CANJE	ACUITZIO	19	29	56	101	20	41	2,200.00	253909.26	2157711.32	14
16002	AGOSTITLAN (CFE)	HIDALGO	19	32	13	100	37	6	2,520.00	2161042.96	330206.72	14
16003	AGUILILLA	AGUILILLA	18	44	0	102	45	0	933	737235.66	2072818.36	13
16006	ANTUNEZ	PARACUARO	19	0	45	102	12	0	360	794770.75	2104558.30	13
16007	APATZINGAN (SMN)	APATZINGAN	19	5	19	102	21	3	320	778755.20	2112740.68	13
16008	AQUILA	AQUILA	18	35	57	103	30	15	180	2057134.27	657823.81	13
16009	ARTEAGA	ARTEAGA	18	21	0	102	17	0	860	787107.60	2031052.88	13
16010	BARTOLINAS (CFE)	TACAMBARO	19	12	0	101	26	0	1,400.00	244138.77	2124744.80	14
16011	BUENAVISTA I	BUENAVISTA	19	12	32	102	35	11	450	753772.85	2125700.17	13
16012	CAJONES	GABRIEL ZAMORA	19	12	36	101	54	42	480	193829.93	2126625.01	14
16013	CALETA DE CAMPOS	LAZARO CARDENAS	18	5	0	102	45	0	116	738128.51	2000857.11	14
16014	CAMECUARO	TANGANCICUARO	19	55	0	102	12	45	1,708.00	791829.22	2204679.28	13
16015	CARAPAN	CHILCHOTA	19	51	37	102	2	14	1,940.00	810301.68	2198747.07	13
16016	CARRILLO PUERTO	ALVARO OBREGON	19	53	50	101	2	17	1,840.00	286635.90	2201399.85	14
16017	CASA BLANCA	JOSE SIXTO VERDUZCO	20	19	10	101	27	33	1,694.00	243220.98	2248746.05	14
16018	CASA FUERTE	SAHUAYO	20	4	0	102	41	0	1,523.00	742284.08	2220539.95	13
16019	CERRITO PELON	JIQUILPAN	19	58	0	102	42	0	1,754.00	740692.53	2209442.93	13
16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	HIDALGO	19	41	30	100	33	13	2,060.00	337154.54	2178105.80	14
16021	COALCOMAN (CFE)	COALCOMAN DE VAZQUE	18	47	0	103	10	0	1,020.00	693232.82	2077849.72	13
16022	COINTZIO	MORELIA	19	37	30	101	16	52	2,096.00	260774.61	2171584.69	14
16023	COPANDARO DE GALEANA	COPANDARO	19	53	32	101	12	49	1,840.00	268242.91	2201078.51	14

Por nuestra parte, se hizo la labor de transformar las coordenadas geográficas que ofrece CONAGUA al Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) mediante el servidor TRANINV del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para mayor practicidad.

Transformación de coordenadas TRANINV (Ver Link):

<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/traninv.aspx>

El mapa de la Figura 39, muestra el total de estaciones presentes en el Edo de Michoacán, se aprecia la carga de estaciones hacia el norte del estado y la baja presencia en el centro y sur del mismo. De acuerdo con los criterios anteriormente mencionados, se revisaron minuciosamente cada uno de los datos que contienen las estaciones.

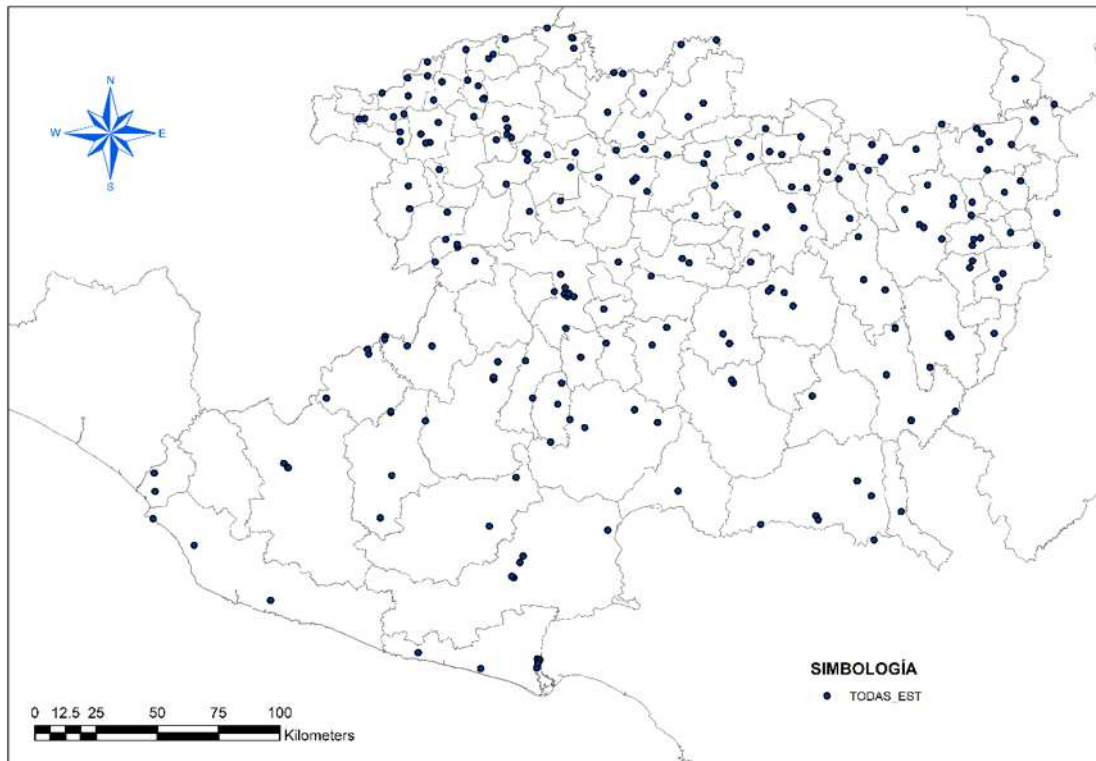


Figura 39.- Las 232 estaciones meteorológicas presentes en el Edo. de Michoacán

La Figura 40 muestra el comportamiento de las variables TMÁX (Temperatura Máxima Diaria) y TMÍN (Temperatura Mínima Diaria) a través del tiempo en que se registró. Por ejemplo, los datos de la Estación 16109, ubicada en San Diego Curupatzco, Madero, comienzan en enero de 1922 y terminan en Octubre del 2015, comprendiendo un rango de 93.8 años de servicio, y con 97.1% de años efectivos. Dicha estación, es la estación con mayor número de años en servicio y con el menor porcentaje de vacíos, también sus datos son relativamente actuales, lo que la convierte en la estación ideal.

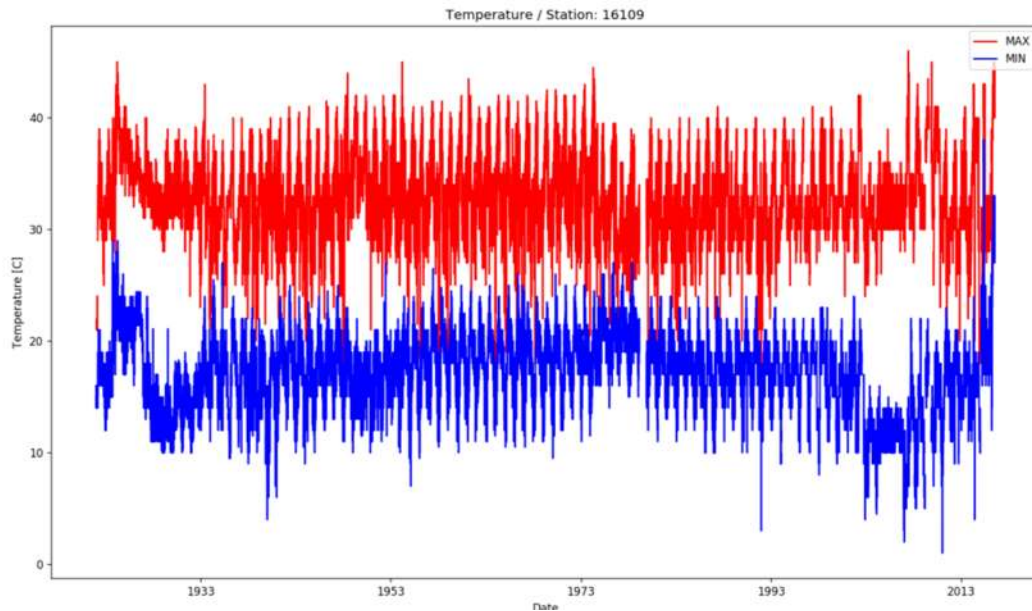


Figura 40.- Comportamiento de TMAX(rojo) y TMIN (azul) en el tiempo. Est. 16109. Fuente: Propia

Por otro lado, nos podemos encontrar con estaciones como la 16003, ubicada en Aguililla, Aguililla, Figura 41, que cuenta con 72.7 años de "vida" pero con enormes huecos que solo dejan a la estación con el 49% de años con datos. Tales condiciones hacen a estaciones como esta sean merecedoras de una discriminación al momento de realizar análisis de búsqueda de datos de interés que se mencionan en la Sección 3.3.1. La estación queda descartada.

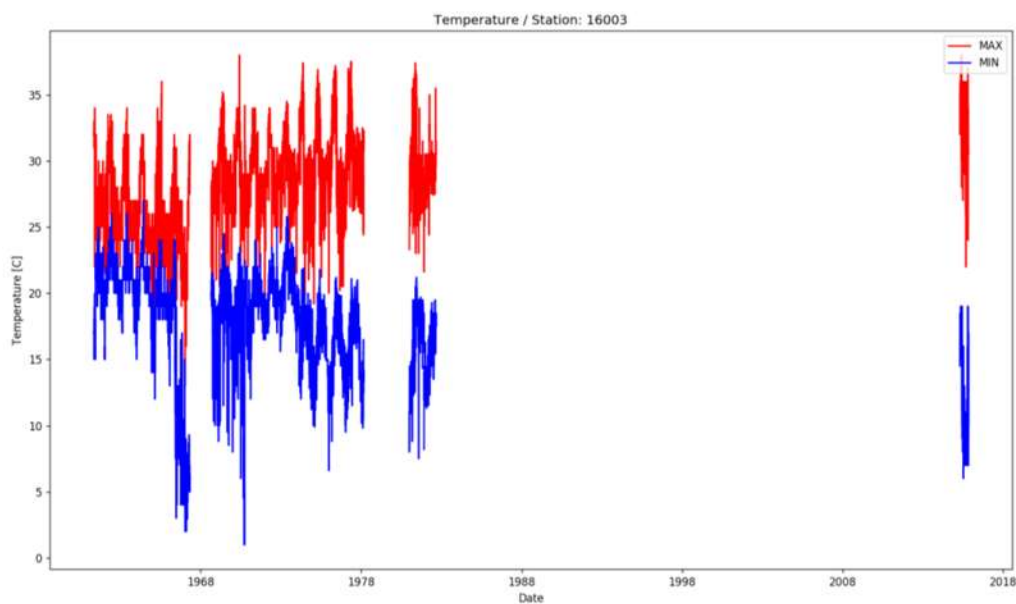


Figura 41.- Comportamiento de TMAX(rojo) y TMIN (azul) en el tiempo. Est. 16003. Fuente: Propia

Como ya mencionamos el hecho de contar con un porcentaje de vacíos bajo, no significa que la estación pueda ser utilizada, también debe cumplir los demás requisitos para considerarse como "buena". Tal como sucede con la base de datos de la estación 16032, ubicada en Charapan, Charapan (Figura 42), que cuenta con 21.2 años de "vida", 83% de datos, pero con un periodo de vida antiguo (08-1952 a 10-1973) lo que la descarta automáticamente.

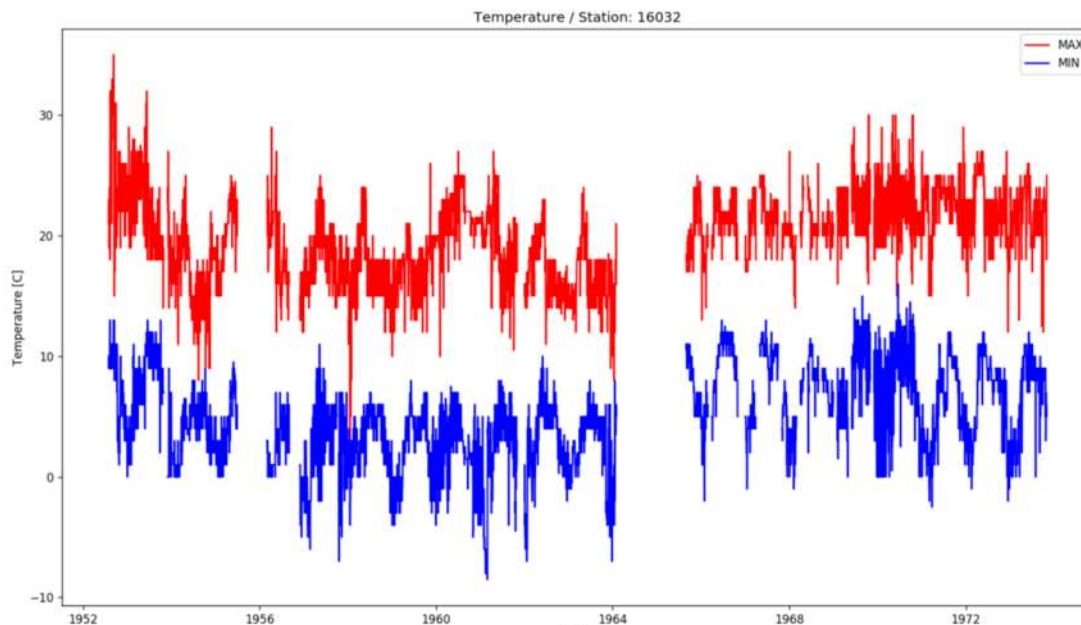


Figura 42.- Comportamiento de TMAX (rojo) y TMIN (azul) en el tiempo. Est. 16032. Fuente: Propia

Si recordamos, en las anteriores Tablas 14, 15 y 16 se puede observar que existen huecos (representados con X), que en algunos casos llegan a ser de años completos que son faltantes de información. Estos huecos, como ya se mencionó, reducen la confianza que se pueda tener en cualquiera de estas estaciones, provocando que se descarten del análisis. Para justificar el descarte de ciertas estaciones se fijaron pasos en los que se aplicaron los criterios que a continuación se enuncian:

Paso 1.- Selección de estaciones por calidad de datos, es decir, que contengan un porcentaje de vacíos bajo y con años de datos recientes

- Datos recientes (1980 – 2016)

Paso 2.- Selección del rango de años de datos.

- Datos de 5 años consecutivos más actuales



Figura 43- Total de 81 Estaciones Aprobadas por Paso 1 y 2. Fuente: Propia

De los resultados de los pasos 1 y 2, se obtuvo el mapa de la Figura 43, observamos enormes áreas geográficas en las que no se encuentran puntos de estaciones, ello puede deberse simplemente a que no existe estación alguna en el área. Esto se puede observar en la zona conocida como "Tierra Caliente", que comprende los municipios de Arteaga, Ario, Agüilla, Coalcomán Huetamo y Tumbiscatio. Al igual que en la zona de la Meseta Purépecha conformada por, Charapan, Nuevo Parangaricutiro, Peribán, Salvador Escalante, Uruapan, Tancitaro, Taretan, y Ziracuaretiro. También nos percatamos que en la zona de la costa existen pocas estaciones. (Ver Figura 44)

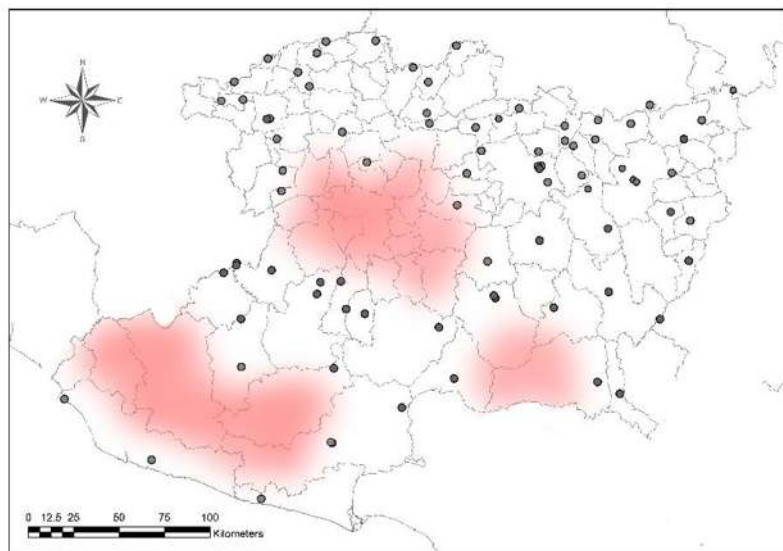


Figura 44 - Zona con vicios geográficos por estaciones aprobadas en Michoacán (Área Color Rojo). Fuente: Propia

Para dar solución a los huecos geográficos, se flexibilizaron los criterios de selección, pero solo en estas áreas. Buscando manualmente las estaciones existentes que no pasaron la aprobación del primer y segundo paso en estas zonas, criterio de rango de 1980 a 2016 y de 5 años consecutivos.

El criterio de selección fue, que se encontrara dentro de los huecos geográficos del Edo. y tuviesen 5 años sin vacíos.

Asimismo, se eligieron manualmente estaciones fuera del Estado, pero cercanas, a la frontera, en los estados de Colima, Guerrero, Guanajuato, Jalisco, Edo. de México y Querétaro. Recabando 37 estaciones de apoyo, fuera y dentro de Michoacán, dando un total de 118 estaciones "Aprobadas".

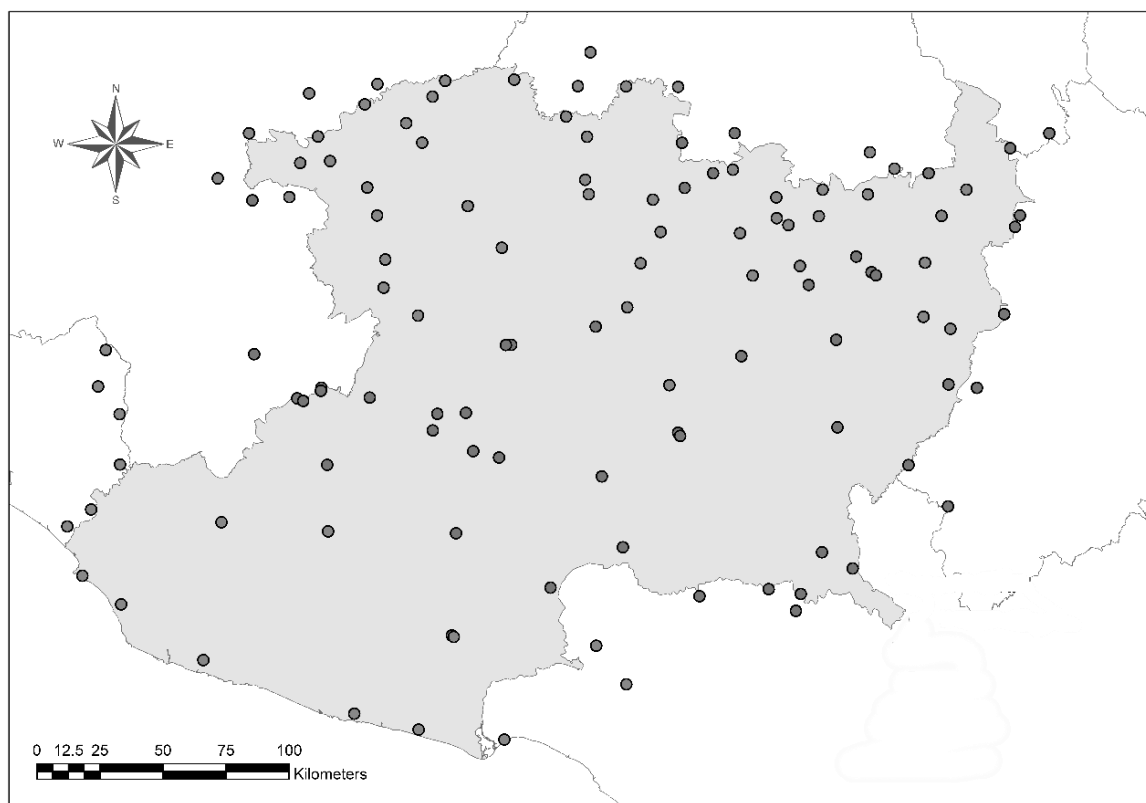


Figura 45- Estaciones Aprobadas más estaciones de apoyo. Fuente: Propia.

4.1.- Análisis de datos

Los datos proporcionados por CONAGUA por si mismos nos da un ligero panorama de la realidad de cada base de datos con la que cuenta cada una de las estaciones meteorológicas. Recordemos que las estaciones contienen los datos diarios de 2 variables (TMAX y TMIN) a través de los años de "vida" de ella, que en ocasiones pueden ser hasta de 80 años, un mar de datos, un promedio de 40 mil datos por cada base de datos por variable por cada estación.

La información "en bruto" se debe ordenar, sintetizar y analizar, solo así se convierte en información útil para poder ser interpretada, es decir, darle explicación y un verdadero significado.

El propósito del análisis es aplicar un conjunto de estrategias y técnicas estadísticas que nos permitan obtener los datos de interés buscados en la Sección 3.3.1, a partir del adecuado tratamiento de los datos originales.

Hoy en día el uso de herramientas como Python, hace la tarea de discretizar la gran cantidad de datos, que, de hacerse manualmente, consumiría demasiado tiempo de análisis, y los resultados no serían del todo fiables. Python es un lenguaje de scripting independiente de plataforma, preparado para realizar cualquier tipo de programa, desde aplicaciones Windows a servidores de red o incluso, páginas web. Es un lenguaje interpretado, lo que significa que no se necesita compilar el código fuente para poder ejecutarlo, lo que ofrece ventajas como la rapidez de desarrollo e inconvenientes como una menor velocidad. (Alvarez, 2017)

Para comenzar el análisis de datos, fue necesario el desarrollo de un script en Python que analizara e interpretara las bases de datos de cada una de las 118 Estaciones Meteorológicas aprobadas, en sus 2 variables de interés (TMAX y TMIN).

En la Figura 46 se presenta la interfaz del software Python, en ella se ha escrito un script (Script 01) que hace la conversión de las Bases de Datos, que se encuentran en un acomodo tipo calendario y el cual dificulta su análisis, a Bases de Datos en series de tiempo.

```

1 # advanced numerical operations
2 #IMPORT ***
3
4 # build current station numbers list from storage directory (select precipitation folder)
5 # a list of full filenames in a given directory
6 filenames = listdir('data/PRC')
7 # remove 'PREC.csv' suffix from filenames, get station number strings
8 station_numbers = [x[1:9] for x in filenames]
9 # change to integer for program compliance
10 station_numbers = [int(x) for x in station_numbers]
11
12 # this program was already executed for the following station numbers (there is a pickle file in dataframes folder)
13 filenames = listdir('dataframes')
14 old_station_numbers = [x[1:9] for x in filenames]
15 old_station_numbers = [int(x) for x in old_station_numbers]
16
17 # so now is executed for new data
18 new_station_numbers = [x for x in station_numbers if x not in old_station_numbers]
19
20 # a list of variables to work on
21 variables = ['PRC', 'TMAX', 'TMIN']
22
23 # for station po in new_station_numbers:
24 # a dictionary to temporary store buffer dataframes per variable
25 station_dict = {}
26
27 for variable in variables:
28 # a NumPy array from 1 to 31
29 days = np.arange(31) + 1
30 # NumPy array to list
31 days = np.ndarray.tolist(days)
32 # list of integers to list of chars for column names
33 names = ['{var}/{month}']

```

Figura 46.- Python (PyCharm Interprete), Script 01 Conversión de datos (tipo calendario) a Datos en series de tiempo. Fuente: Propia

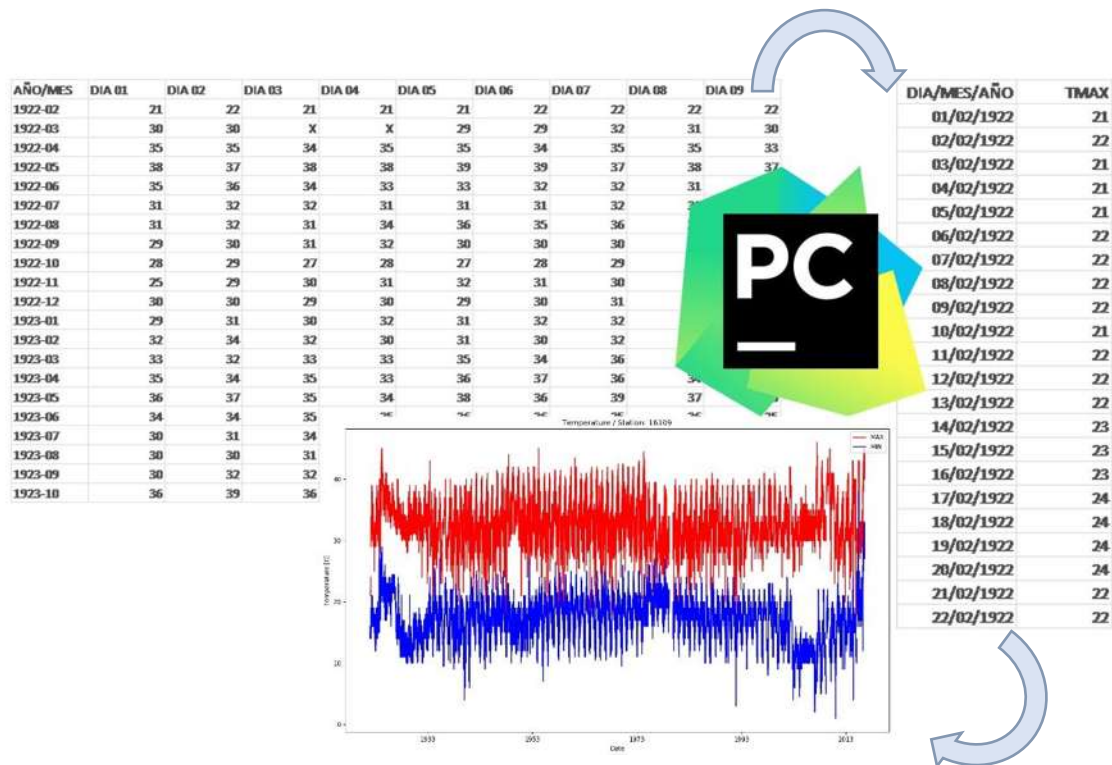


Figura 47.- Proceso visual del Script 01 de Python. Fuente: Propia.

Este mismo script realiza simultáneamente la eliminación de los Outliers, que son datos atípicos que generan una inconsistencia en el data frame lo que se traduce como error, en la Figura 48 vemos un ejemplo de un Outlier, correspondiente a la estación 16136, en su variable de temperatura máxima.

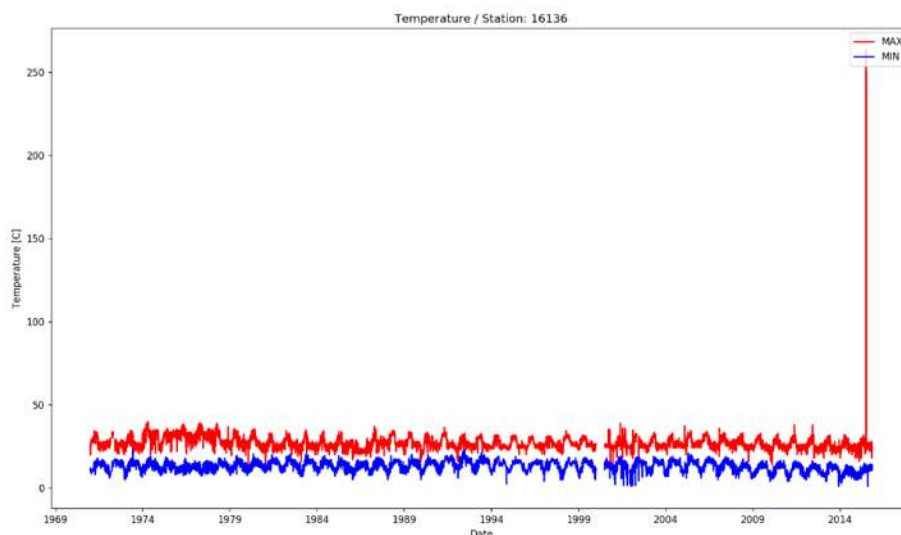


Figura 48.- Outlier en data frame para la variable TMAX en la estación 16136. Fuente: Propia

Posteriormente a la revisión y análisis del script 01, se obtuvieron un total de 118 estaciones convertidas en series de tiempo. A las cuales se les hizo una segunda revisión manual y nuevamente con el script, para verificar que efectivamente se hayan transformado correctamente. Luego de ello, se hizo correr un segundo script, script 06, el cual hace uso de varias técnicas de estadística para encontrar los siguientes parámetros, que serán de utilidad en la implementación del Modelo LTPP de determinación de la Temperatura del pavimento (T_{pav}), para Grado PG por temperatura, como en la Sección 3.3.1:

- Temperatura Media Máxima de los 7 días consecutivos con temperaturas altas del rango de tiempo seleccionado. (T_{air} , °C)
- Desviación Estándar de los 7 días consecutivos con temperaturas altas del rango de tiempo seleccionado. (σ_{air})
- Temperatura Mínima del rango de tiempo seleccionado. (T_{air} , °C)

Nota: El rango de tiempo seleccionado es el intervalo en que se cumple el criterio de 5 años recientes sin vacíos de cada base de datos de cada estación.

En la siguiente Figura, se muestra el script 06, que realiza la estadística en las bases de datos de cada estación.

```

18
19
20
21 for station_no in [16103]:
22     # load pickle
23     filename = 'dataframes/' + str(station_no) + '.pkl'
24     station = pd.read_pickle(filename)
25
26     # date interval selection for this station
27     # https://stackoverflow.com/questions/29370067/select-dataframe-rows-between-two-dates
28     start_date = '19220101'
29     end_date = '20191031'
30
31     # a logical mask for date interval
32     mask = (station.index > start_date) & (station.index <= end_date)
33
34     # get new dataframe from original dataframe and mask
35     station_interval = station.loc[mask]
36
37
38     # homework project assignment statistics
39     # how many days in dataframe
40     total_days = station_interval.shape[0]
41     print('REPORT FOR STATION NUMBER', station_no)
42     print('Number of day indexes in dataframe', total_days)
43
44     # how many missing data in TMAX column
45     missing_tmax = pd.isnull(station_interval.TMAX)
46     no_missing_tmax = np.sum(missing_tmax)
47     print('Number of missing values for TMAX', no_missing_tmax)
48     # what dates show missing values for TMAX?
49     missing_tmax_dates = missing_tmax[np.where(missing_tmax == True)[0]].index
50
51     # how many missing data in TMIN column
52     missing_tmin = pd.isnull(station_interval.TMIN)
53     no_missing_tmin = np.sum(missing_tmin)
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

```

Figura 49.- Python (PyCharm Interpreter), Script 06. Análisis Estadístico. Fuente: Propia

Tabla 18.- Estaciones Aprobadas más estaciones de apoyo. Fuente: Propia.

ESTACIÓN	NOMBRE	MUNICIPIO	X	Y	Z	ZONA	AÑOS COMPLETOS	LATITUD	TMAX AMB	σ (St.Dev)	TMIN AMB
16003	AGUILILLA	AGUILILLA	737235.66	2072818.36	933.00	13	1973(03) - 1978(02)	18.73333333	36.743	0.27180	6.60
16006	ANTUNEZ	PARACUARO	794770.75	2104558.30	360.00	13	2011-2015	19.01250000	40.143	0.58029	13.00
16007	APATZINGAN (C	APATZINGAN	778755.20	2112740.68	320.00	13	2011-2015	19.08861111	40.571	1.56800	10.50
16009	ARTEAGA	ARTEAGA	787107.6	2031052.88	860	13	1983(09)-1988(08)	18.35000000	34.714	1.16050	6.00
16026	CUATRO CAMI	MUGICA	805027.99	2102016.37	672.00	13	2009-2013	18.98805556	42.500	0.53452	13.00
16030	CUIMATO	BRISÉÑAS	751800.56	2241842.19	1520.00	13	2011 - 2015	20.25777778	36.129	0.73623	1.00
16039	PIEDRAS BLAN	BUENAVISTA	734551.55	2129657.78	419.00	13	2012-2016	19.24694444	42.500	0.70711	10.50
16063	LA PALMA	VENUSTIANO C	733274.39	2229123.05	1520.00	13	1983(03)-1988(02)	20.14527778	33.500	1.10190	-1.00
16065	LA PIEDAD DE	LA PIEDAD	811016.39	2251610.47	1684.00	13	2010(05) - 2015(04)	20.33722222	35.286	0.69985	3.00
16068	LAS FUENTES	SAHUAYO	726205.33	2218663.07	2200.00	13	2010(09) - 2015(05)	20.05166667	34.571	0.49487	0.00
16073	LOS LIMONES	LOS REYES	759285.28	2169279.96	1175.00	13	1993-1997	19.60166667	33.786	0.92029	1.50
16085	PARACUARO	PARACUARO	791895.92	2119744.86	597.00	13	2011(07) - 2016(07)	19.15000000	39	0.92582	8.00
16094	PRESA GUARAI	VILLAMAR	752800.45	2208936.31	1580.00	13	2010(11) - 2015(11)	19.96055556	37.500	0.75593	-2.00
16095	PRESA JARIPO	VILLAMAR	751175.26	2208666.86	1587.00	13	2010(11)-2015(10)	19.95833333	30.714	0.88063	-2.00
16106	SAN ANGEL	TINGUINDIN	756714.69	2197855.50	1840.00	13	1986(10)-1991(09)	19.86000000	34.143	0.34990	-4.50
16108	SAN CRISTOBAL	IXTLAN	768234.81	2234396.88	1530.00	13	2012-2016	20.18833333	33.643	1.48111	-5.00
16112	SAN JUAN DE /	AQUILA	639839.08	2055209.96	530.00	13	1969 - 1973	18.58305556	36.071	1.26570	5.50
16125	TANGANCICUA	TANGANCICUA	792666.03	2201615.65	1710.00	13	2010 (03) - 2015 (04)	19.88888889	37.857	1.80702	0.00
16141	YURECUARO	YURECUARO	783677.14	2251168.59	1543.00	13	2011-2015	20.33750000	37.000	0.65465	2.00
16151	ARTEAGA (CFE	ARTEAGA	786305.78	2031625.51	826	13	1983-1987	18.35527778	35.714	1.16057	1.00
16158	EL CAJON	TEPALCATEPE	736901.84	2099112.94	296.00	13	2011(10) - 2016(9)	18.97083333	43.786	0.24740	10.50
16174	SAHUAYO	SAHUAYO	738055.60	2219405.04	1540.00	13	2012-2016	20.05694444	34.071	0.67776	2.00
16190	ARCEO	TUMBISCATIO	788013.72	2072050.79	320.00	13	1980(10)-1985(09)	18.72000000	42.000	0.46290	11.50
16194	E.T.A. 039 TOC	TOCUMBO	759939.77	2180396.21	1600.00	13	1989(10)-1994(09)	19.70194444	34.571	1.17800	-2.00
16208	CACHAN	AQUILA	687810.25	2021831.68	79.00	13	2012 -2016	18.27777778	33.571	0.67763	12.00
16216	BUENAVISTA II	BUENAVISTA	753772.00	2125761.68	450.00	13	1986-1990	19.20944444	42.429	1.17800	2.50

En la Tabla 18, se muestran los resultados obtenidos de los análisis de datos hechos por los scripts dentro del software Python. El dato de la temperatura media máxima de los 7 días consecutivos más calurosos del rango de 5 años más recientes se muestra en la columna de color rojo, el dato de la temperatura más baja del mismo periodo en la columna azul, y la desviación estándar de los 7 días consecutivos más calurosos en la que se determinó el la TMAX.

En la tabla anterior, también se aprecia cómo se unen las estaciones de apoyo, y como ejemplo la estación 16003 de Aguililla, Aguililla, que se encuentra en la zona de hueco geográfico de las primeras revisiones.

4.2.- Implementación del Modelo LTPP

De acuerdo con el ANEXO 2 del Protocolo AMAAC, "Ajuste por temperatura para la selección del Grado PG en el Cemento Asfáltico tomando en cuenta Factores de Confiabilidad", se implementaron los algoritmos del Modelo del programa LTPP de la FHWA. Dichos algoritmos fueron presentados y explicados en la sección 3.3.1, SUPERPAVE de este trabajo, y a continuación se vuelven a enunciar.

$$T_{pav} = -1.56 + 0.72T_{air} - 0.004Lat^2 + 6.26\log_{10}(H + 25) - z(4.4 + 0.52(\sigma_{air})^2)^{1/2}$$

Ecuación 4.- Temperatura baja del pavimento por el Modelo LTPP con confiabilidad. Fuente: FHWA-RD

Dónde:

T_{pav} = Temperatura baja del pavimento asfáltico bajo la superficie. °C.

T_{air} = Temperatura media más baja anual del ambiente. °C.

Lat = Latitud de la sección, grados.

H = Profundidad, mm.

σ_{air} = Desviación Estándar de la temperatura media más baja del ambiente, °C.

z = Distribución Normal, $z = 2.055$ para una confiabilidad del 98%.

Modelo para baja temperatura con confiabilidad

$$T_{pav} = 54.32 + 0.78T_{air} - 0.0025Lat^2 - 15.14\log_{10}(H + 25) + z(9 + 0.61(\sigma_{air})^2)^{1/2}$$

Ecuación 5.- Temperatura alta del pavimento por el Modelo LTPP con confiabilidad. Fuente: FHWA-RD

Dónde:

T_{pav} = Temperatura alta del pavimento asfáltico bajo la superficie. °C.

T_{air} = Temperatura alta del ambiente. °C.

Lat = Latitud de la sección, grados.

H = Profundidad, mm.

σ_{air} = Desviación Estándar de los 7 días más calurosos, °C.

z = Distribución Normal, $z = 2.055$ para una confiabilidad del 98%.

Modelo para alta temperatura con confiabilidad

A modo de ejemplo, seleccionaremos una estación cualquiera, para realizar el cálculo de la Temperatura del Pavimento a cierta profundidad:

Estación = 16109

Nombre = San Diego Curupatzeo, Madero

Rango de 5 años = 2010 -2015

$T_{air}(TMAX) = 41.571$ °C

$T_{air}(TMIN) = 1.00$ °C

Latitud = 19.33333333 grados.

$H = 20$ mm

$\sigma_{air} = 0.90350$

$z = 2.055$ para una confiabilidad del 98%.

Sustituyendo estos valores en la Ecuación 2,

$$T_{pav} = -1.56 + 0.72(1.0) - 0.004(19.333)^2 + 6.26\log_{10}(20 + 25) - 2.055(4.4 + 0.52(0.9035)^2)^{1/2}$$

Ecuación 6.- Ejemplo de implementación de Modelo baja temperatura con confiabilidad LTPP, valores estación 16109. Fuente: Propia

$$T_{pav} = -2.44$$
 °C

Ecuación 7.- Resultado (Ec. 6) con valores de estación 16109. Fuente: Propia.

Sustituyendo los valores (Est. 16109) en la Ecuación 3,

$$T_{pav} = 54.32 + 0.78(41.571) - 0.0025(19.333)^2 - 15.14\log_{10}(20 + 25) + 2.055(9 + 0.61(0.9035)^2)^{1/2}$$

Ecuación 8.- Ejemplo de implementación de Modelo alta temperatura con confiabilidad LTPP, valores estación 16109. Fuente: Propia

$$T_{pav} = 66.76^{\circ}\text{C}$$

Ecuación 9.- Resultado (Ec. 7) con valores de estación 16109. Fuente Propia

Teniendo los resultados de la implementación de los modelos, T_{pav} (alta)= 66.76°C y T_{pav} (baja), y conociendo que los grados PG van desde 46°C, 52°C, 58°C, 64°C, 70°C y 76°C, $X+16^{\circ}\text{C}$ para temperatura alta (en incrementos de 6°C), y de +2°C -4°C, -10°C, -16°C, -22°C, -28°C, -34°C, -40°C y -46°C, $X-16^{\circ}\text{C}$ para temperatura baja (e igual en saltos de 6°C), las temperaturas arrojadas por los algoritmos en este ejemplo resultan como un Grado PG 70 – 04

Nota: Cabe aclarar que en México el único fabricante de asfalto es PEMEX y de acuerdo con la Sección 3.4 de este trabajo, éste entrega a los proveedores de asfaltos con Grado PG, 64-22. Por lo tanto, son los proveedores quienes modifican el asfalto para entregar al usuario final grados superiores como 70, 76, ó $X+16^{\circ}\text{C}$ para temperatura máxima y para temperatura mínima un grado -22.

En este caso del ejemplo de la aplicación del Modelo LTPP para la estación 16109, será un Grado PG 70 – 22, este argumento se aplica en todos los casos de las 118 estaciones aprobadas en este trabajo.

En la Tabla 19 se presentan algunas de las 118 estaciones, con sus respectivos cálculos de la implementación de los algoritmos del Modelo LTPP para la determinación de la Temperatura del Pavimento (T_{pav}) a cierta profundidad. En color naranja pálido encontramos el resultado del algoritmo para alta temperatura, en azul pálido el resultado del algoritmo para baja temperatura, en color naranja fuerte el Grado PG estándar correspondiente para alta temperatura, y en color azul fuerte el Grado PG estándar correspondiente para baja temperatura.

Tabla 19.- Cálculo y selección del PG (calculado y estándar) para 118 estaciones.

ESTACIÓN	NOMBRE	MUNICIPIO	TMAX AMB	σ (St_Dev)	TMIN AMB	TMAX (Confiabilidad) St	TMIM (Confiabilidad) St	PG_MAX ST	PG_MIN ST
16006	ANTUNEZ	PARACUARO	40.143	0.58029	13.00	65.7	6.5	70	-22
16007	APATZINGAN (SMN)	APATZINGAN	40.571	1.56800	10.50	65.9	4.0	70	-22
16009	ARTEAGA	ARTEAGA	34.714	1.16050	6.00	61.4	1.1	64	-22
16026	CUATRO CAMINOS	MUGICA	42.500	0.53452	13.00	67.6	6.6	70	-22
16030	CUIMATO	BRISEÑAS	36.129	0.73623	1.00	62.5	-2.4	64	-22
16039	PIEDRAS BLANCAS	BUENAVISTA	42.500	0.70711	10.50	67.5	4.6	70	-22
16063	LA PALMA	VENUSTIANO CARRANZA	33.500	1.10190	-1.00	60.3	-4.2	64	-22
16065	LA PIEDAD DE CABADAS (D	LA PIEDAD	35.286	0.69985	3.00	61.8	-1.0	64	-22
16068	LAS FUENTES	SAHUAYO	34.571	0.49487	0.00	61.3	-2.9	64	-22
16073	LOS LIMONES (CFE)	LOS REYES	33.786	0.92029	1.50	60.7	-2.1	64	-22
16085	PARACUARO	PARACUARO	39	0.9258201	8.00	64.8	2.6	70	-22
16094	PRESA GUARACHA	VILLAMAR	37.500	0.75593	-2.00	63.5	-4.6	64	-22
16095	PRESA JARIPO	VILLAMAR	30.714	0.88063	-2.00	58.2	-4.7	70	-22
16106	SAN ANGEL	TINGUINDIN	34.143	0.34990	-4.50	61.0	-5.9	64	-22
16108	SAN CRISTOBAL	IXTLAN	33.643	1.48111	-5.00	60.4	-7.3	64	-22
16112	SAN JUAN DE ALIMA	AQUILA	36.071	1.26570	5.50	62.5	0.7	64	-22
16125	TANGANCICUARO	TANGANCICUARO	37.857	1.80702	0.00	63.6	-3.8	64	-22
16141	YURECUARO	YURECUARO	37.000	0.65465	2.00	63.1	-1.7	64	-22
16151	ARTEAGA (CFE)	ARTEAGA	35.714	1.16057	1.00	62.2	-2.5	64	-22
***	***	***	***	***	***	***	***	***	***

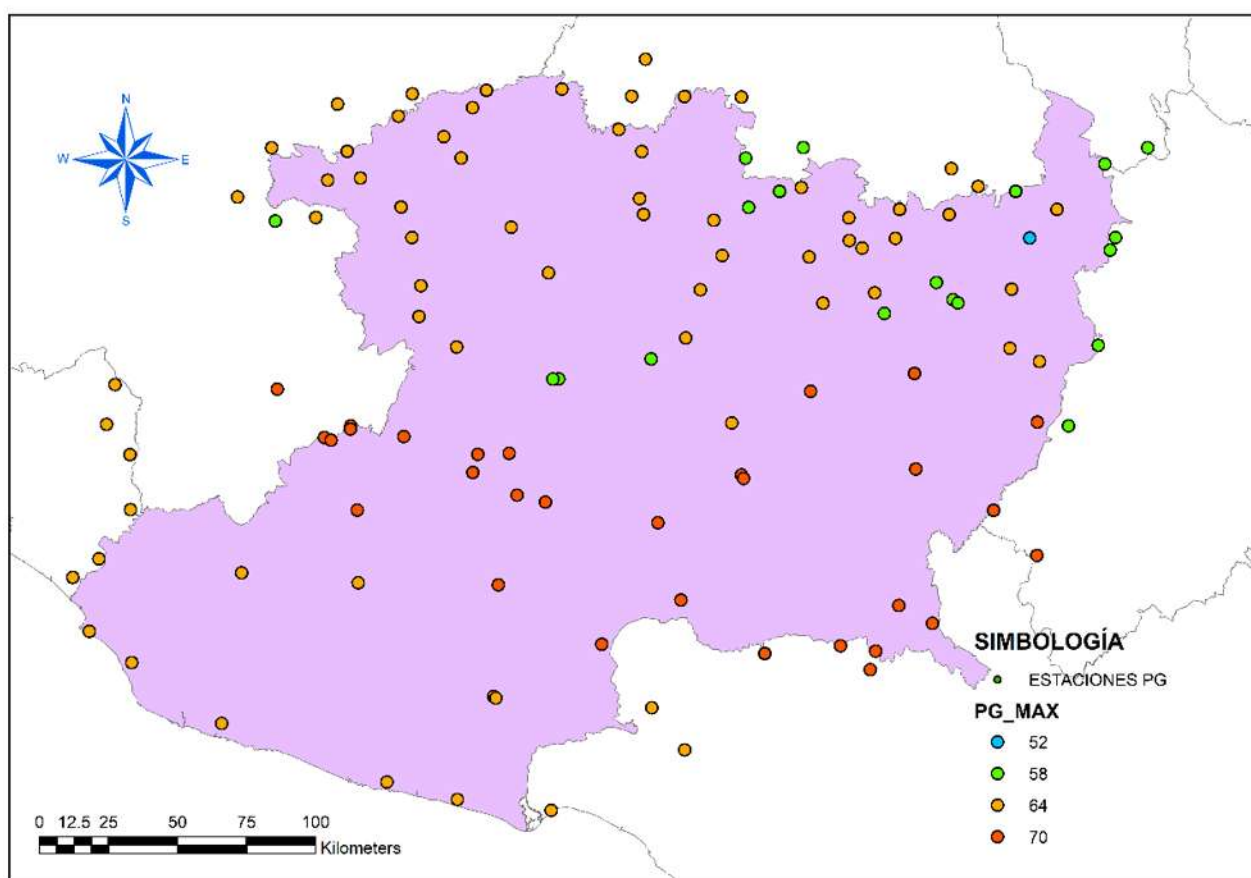


Figura 50.- Mapa de distribución del PG por estación. Fuente: Propia.

En el mapa anterior (Figura 50), se hace más visual la ubicación de las estaciones que ya tienen la información de su PG MÁX calculado correspondiente. Asimismo, se observa la tendencia por zona respecto al mismo.

Se aprecia que en la zona norte del estado la mayoría de los puntos pertenece a un PG 64-22, salvo a algunos puntos, en donde la temperatura es aún más baja, con PG 52-22 y PG 58-22. En la zona de "Tierra caliente" (la zona central del estado), la tendencia es clara, las temperaturas son más elevadas causando que los puntos se muestren con un PG 70-22, y en la zona costera, también se ve marcado que pertenezcan a un PG 64-22, y aunque esta zona es caliente, su cercanía con el océano (que hace de regulador térmico) afecta la temperatura.

La gráfica de la Figura 51, nos presenta la distribución de los PG MÁX calculado por estaciones, nos dice que para un PG 52 existe una sola estación, para un PG 58, 19 estaciones, para un PG 64, 69 estaciones, y para un PG 70, existen 31 estaciones, dando un total de 118 estaciones.

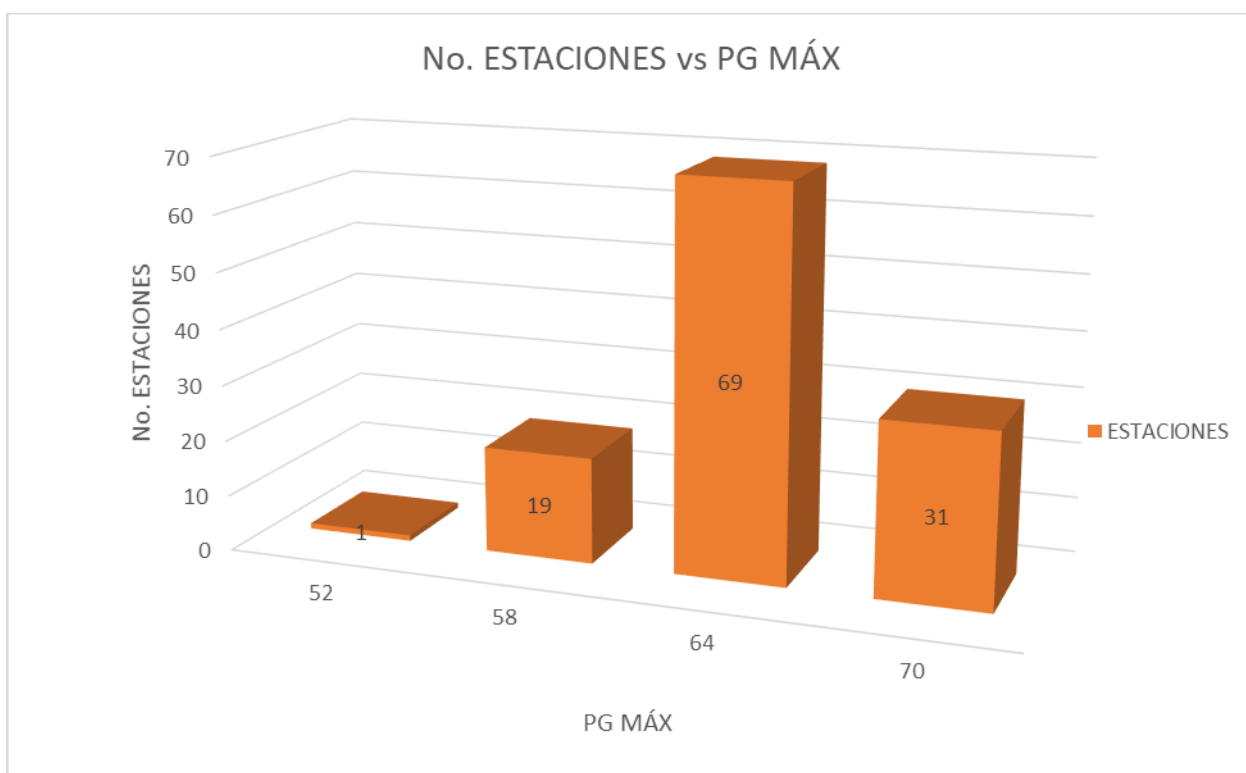


Figura 51.- Distribución gráfica de los PG por estación. Fuente: Propia.

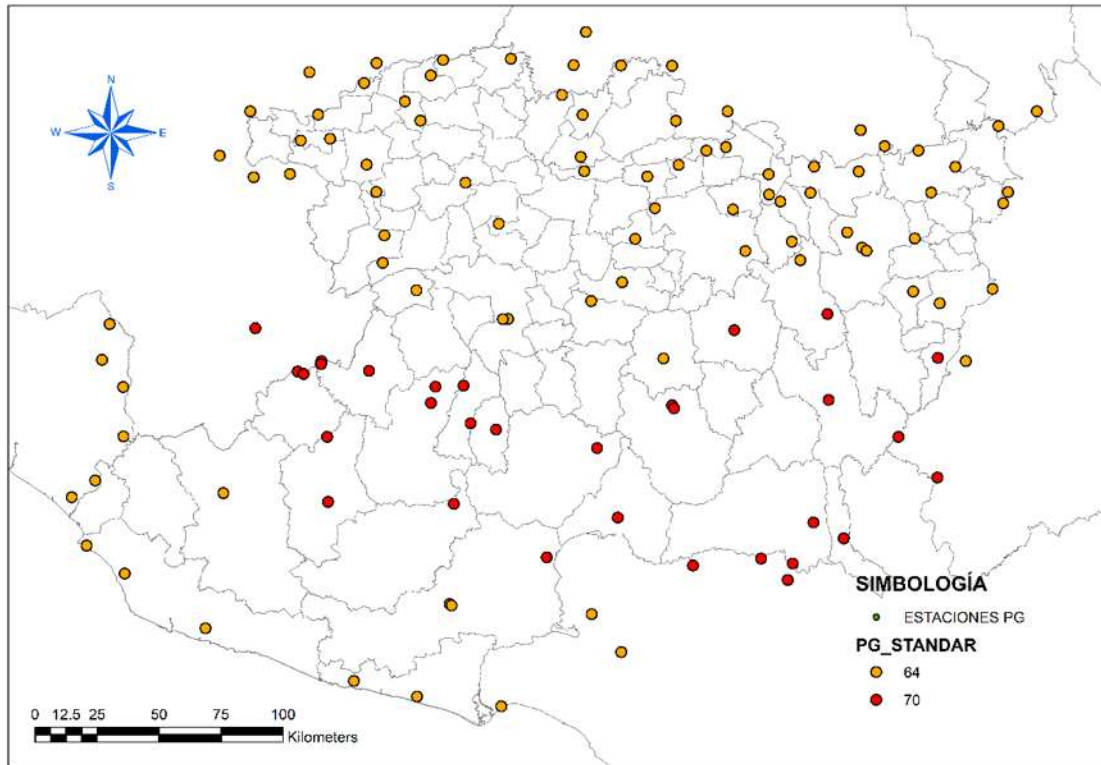


Figura 52.- Mapa de Estaciones con PG estandarizado (PG 64-22 y PG 70-22). Fuente: Propia.

Solo como aclaración, PG MÁX calculada, son las temperaturas que arrojan los algoritmos de Modelo LTPP, y PG MÁX estándar, son las temperaturas de los Grados PG que el proveedor puede ofrecer. En el mapa de la Figura 52, ya se representan los puntos de las estaciones con los PG Estándar que debe proporcionar el proveedor (PG 64-22 y PG 70-22).

4.3.- Interpretación Geográfica



ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Considerada como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), ArcGIS es utilizada para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios. ArcGIS permite publicar la información geográfica para que esté accesible para cualquier usuario. (ESRI, 2017)

Nos apoyamos de ArcGIS para modelar gráficamente la relación que existe entre la Temperatura Registrada, la Temperatura del Pavimento, la Latitud y la Altitud descrita en la Sección 3.3.1, Modelo LTPP de temperatura de alta y baja del pavimento.

Como se puede observar en la Figura 52, existe una tendencia clara en la ubicación del PG en ciertas zonas del Estado de Michoacán. Es en este punto que podemos hablar de una zonificación, puesto que la ubicación de los PG marca 3 zonas dentro del estado, 2 zonas para un Grado PG 64 -22 y una zona intermedia para el Grado PG 70-22.

Para ser más visible la pre zonificación del PG MÁX, se hizo uso de las herramientas con las que cuenta ArcGIS, para los casos de las estaciones con valores de PG MÁX calculada y PG MAX estándar.

Estas herramientas son:

- Polígonos de Thiessen
- Interpolación Distancia Inversa Ponderada (IDW)

El método de Polígonos de Thiessen asigna a cada estación un peso proporcional a su área de influencia, la cual se define para cada estación de la siguiente manera:

- Todas las estaciones contiguas se conectan mediante líneas rectas en tal forma que no haya líneas interceptadas, es decir conformando triángulos.
- En cada una de las líneas previamente dibujadas se trazarán mediatrices perpendiculares, las cuales se prolongarán hasta que se corten con otras mediatrices vecinas.
- Los puntos de cruce o intersección entre las mediatrices representan los puntos del polígono cuya superficie constituye el área de influencia de la estación que queda dentro de dicho polígono. (Ingeniería-Civil, 2013)

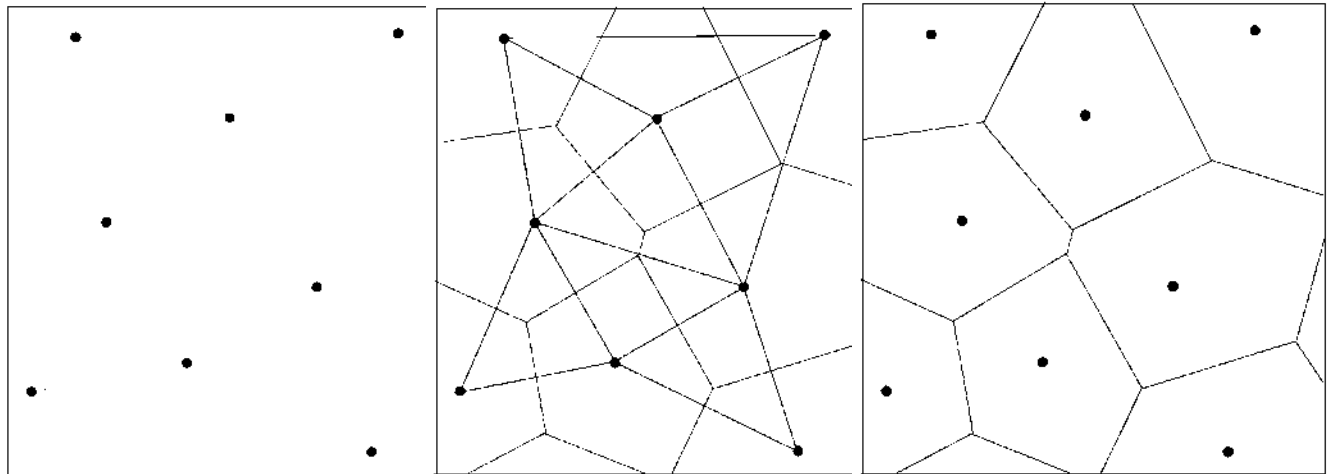


Figura 53.- Pasos para construir los Polígonos de Thiessen. Fuente: Propia.

En el método de Interpolación Distancia Inversa Ponderada (IDW), los puntos de muestreo se ponderan durante la interpolación de tal manera que la influencia de un punto en relación con otros disminuye con la distancia desde el punto desconocido que se desea crear

La ponderación es asignada a los puntos de muestreo mediante la utilización de un coeficiente de ponderación que controla cómo la influencia de la ponderación decae mientras la distancia hacia el punto nuevo se incrementa. Mientras más grande sea el coeficiente de ponderación menor será el efecto que los puntos tendrán si están lejos del punto desconocido durante el proceso de interpolación. Conforme el coeficiente se incrementa, el valor de los puntos desconocidos se aproxima al valor del punto de observación más cercano. (QGIS, 2017)

Empleando las dos herramientas de ArcGIS, en el mapa de estaciones con valores de PG MÁX calculado se obtiene una noción de lo que podría ser una pre zonificación.

El área de influencia de las estaciones dentro y fuera del Estado de Michoacán, con los datos cargados de PG MÁX calculado, se muestran en este mapa (Figura) también se aprecia la pre zonificación, pero ahora es mucho más visible.

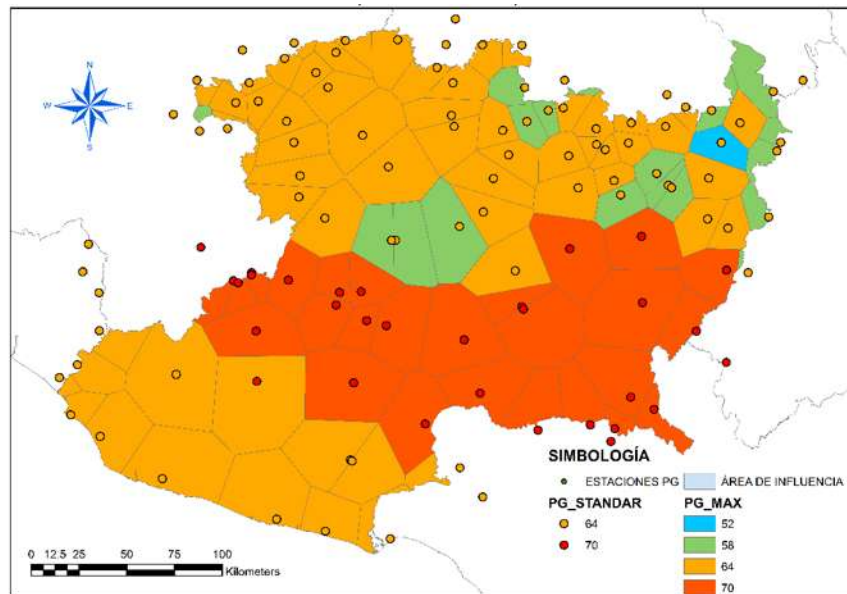


Figura 54.- Área de Influencia por Polígonos de Thiessen cada estación. Estaciones con PG MÁX calculado. Fuente: Propia.

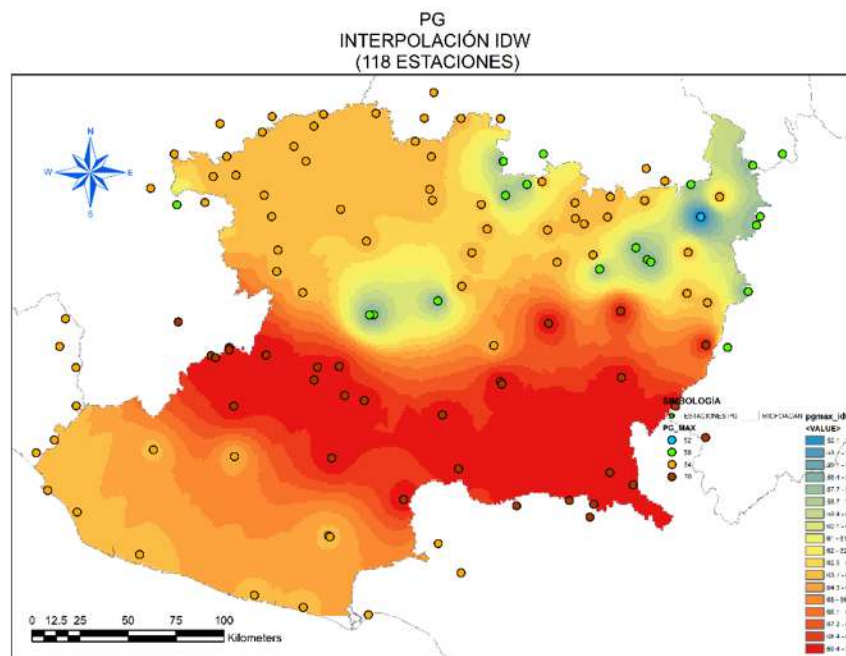


Figura 55.- Interpolación IDW de las temperaturas PG MÁX calculadas. Fuente: Propia.

La interpolación de estas temperaturas nos mostró otro tipo de zonificación del PG en el estado, considerando las temperaturas PG MÁX calculado en gradientes de un grado centígrado, vimos la varianza en el espacio de la temperatura.

Ahora, utilizando estas mismas herramientas y aplicándolas a las temperaturas estandarizadas de PG MAX (PG 64-22 y PG 70-22), obtuvimos lo siguiente:

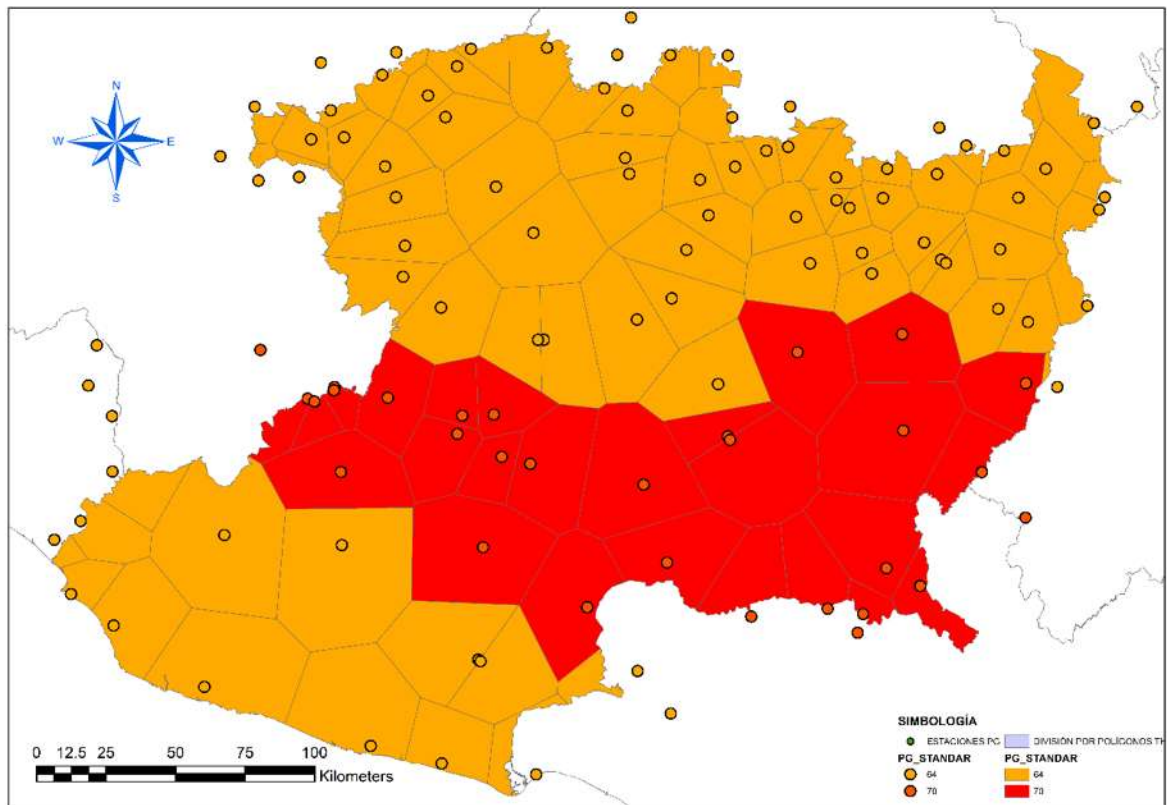


Figura 56.- Área de Influencia por Polígonos de Thiessen cada estación. Estaciones con PG MÁX estándar.
Fuente: Propia.

Son evidentes las fronteras que existen entre las zonas dominadas por un PG 64-22 y la zona central de PG 70-22 (Figura 56). Pero aún sigue siendo un método poco fiable para elegirlo como un mapa de zonificación PG, dado a que los polígonos abarcan zonas con elevaciones con un rango muy amplio en el que las temperaturas pueden variar demasiado, ya que este tipo de zonificación no conlleva ningún dato de temperatura, perdiendo certeza en la zonificación PG, sin embargo, es de gran ayuda al momento de guiarse en la elección de las fronteras de cada Grado PG.

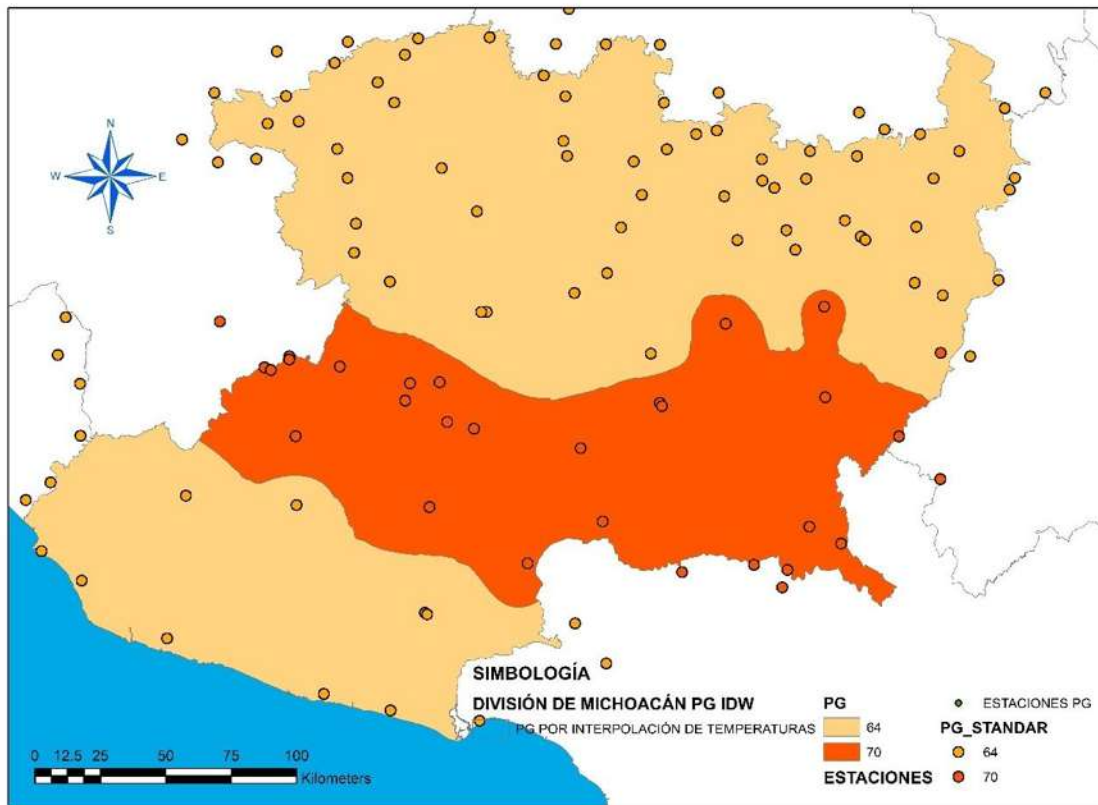


Figura 57.- Interpolación IDW de las temperaturas PG MÁX estándar Fuente: Propia.

Las fronteras encontradas en el Mapa de la Figura 57, se asemejan a las encontradas en el mapa de la Figura 56, de lo que deducimos que existe relación entre el área de influencia de cada estación y la ponderación de estas dada la interpolación de sus valores. También revisamos la relación de la topografía y temperatura.

4.4.- Interpretación Topografía/Temperatura.

La atmósfera es diatérmana, es decir, no se calienta directamente por la radiación solar, sino de manera indirecta a través de la emisión de radiación infrarroja por parte del suelo y de la superficie de mares y océanos.

Se compone de varias capas o estratos separados por estrechas zonas de transición. Cada capa tiene una composición diferente, así como una altura superior y un gradiente térmico y temperaturas diferentes. Aún no se ha determinado el límite superior de la atmósfera, pero algunos autores toman los

10000 metros como el límite, ya que a esa altura la concentración de gases es tan baja que se asemeja a la del espacio exterior. Más del 95% de la masa de la atmósfera se concentra en los primeros 15 km desde la superficie terrestre (Figura 58). Los gases que conforman la atmósfera tienen pesos distintos. Hasta una altitud de unos 10 km la composición del aire no presenta variaciones notables. Esto se debe a procesos de mezcla a gran escala que permiten el intercambio de los gases, al mismo tiempo que impiden que los gases se depositen de acuerdo con su peso.

La atmósfera aumenta o disminuye su volumen por la acción de la temperatura. Esto da lugar a cambios de presión, consecuentemente la atmósfera se expande y se contrae. (Suárez, 2014)

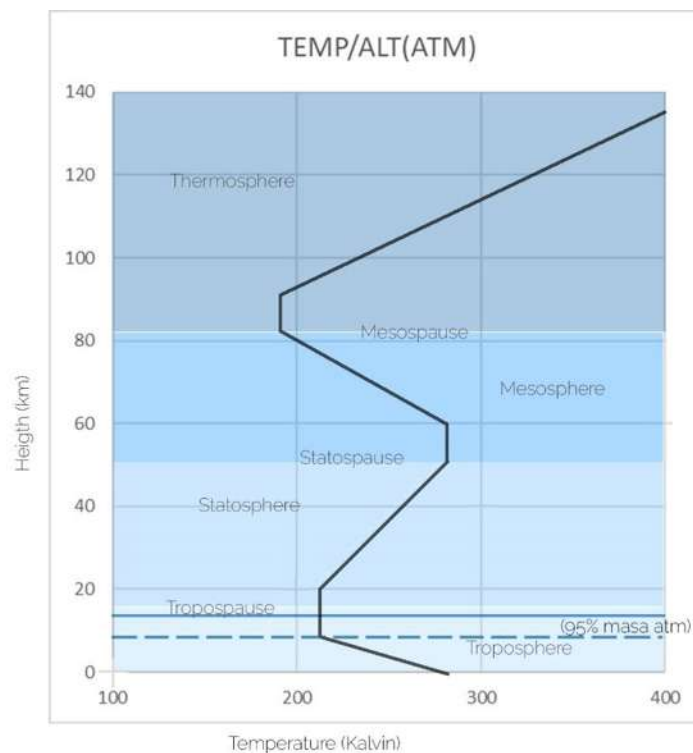


Figura 58.- Perfil vertical de temperatura y estructura de la atmósfera. Fuente: Geociencias.

La temperatura es una magnitud intensiva que adopta un valor distinto para cada punto del espacio, por lo que puede ser descrito como un campo escalar:

$$T = (x, y, z)$$

en el que $\{x, y, z\}$ son las coordenadas del punto considerado. Asumiendo que el valor de la temperatura viene dado por una función continua y diferenciable, el

gradiente (∇T) se define mediante derivadas parciales como el vector: (Alva Valdivia, 2016)

$$\nabla T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$ELR = \partial Temperatura / \partial Altitud$$

Ecuación 10.- Gradiente Térmico. Fuente: Fundamentos de meteorología.

Los cambios de temperatura son más acusados en tierra firme que sobre el mar, debido al alto poder calorífico de este último. Es decir, el mar es una sustancia capaz de absorber y ceder grandes cantidades de energía en forma de calor sin variar apreciablemente su temperatura. (Suárez, 2014)



Figura 59.- Influencia reguladora del océano en la temperatura. Fuente: Geoclimas.com

El agua se calienta y se enfría más lentamente que el suelo, Por ello, durante el día la temperatura del mar es más baja que la de la costa y la brisa que llega a la costa disminuye la temperatura en ella. Por la noche ocurre lo contrario, la temperatura del mar es mayor que la de la costa, teniendo el mismo efecto enfriador (Ver Figura 59).

Entonces podemos decir que el océano actúa como un regulador térmico, frente a las costas o hasta que su efecto disminuya o sea cortado por un obstáculo geográfico. (Giraldo, 2017)

Para ver la relación de la temperatura, la altitud y la influencia térmica del mar, nos apoyamos nuevamente de ArcGIS, y así visualizar los comportamientos de estas variables.

MODELO DE ELEVACIONES

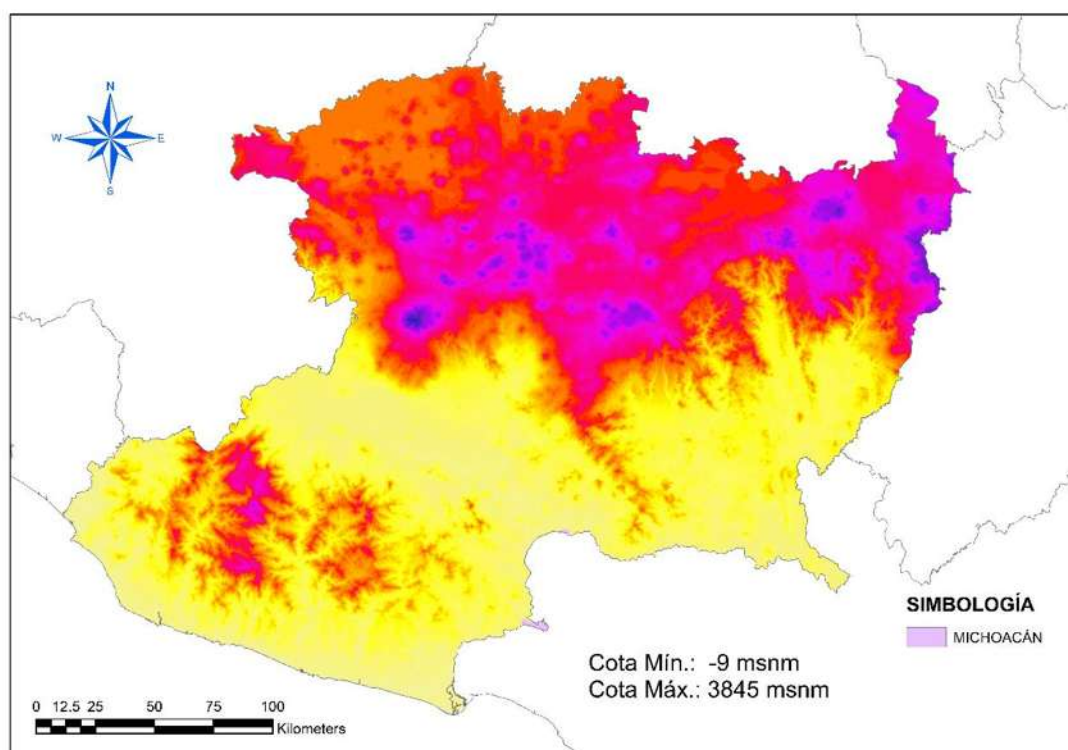


Figura 60.- Modelo de Elevaciones del Estado de Michoacán. Fuente: Propia.

Michoacán es uno de los estados más accidentados orográficamente hablando, por ello alberga numerosos volcanes que forman parte del Eje Neovolcánico Transversal (en su punto más alto puede oscilar entre 4000 msnm) y de la Sierra Madre del Sur. Entre estas dos sierras existe una zona llamada Depresión del Balsas. Cuenca del Río Balsas es una amplia región de tierras bajas que están situadas entre el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur. Dicha depresión ocupa importantes porciones de los estados de Jalisco, Michoacán, México, Guerrero, Morelos, Tlaxcala, Oaxaca y Puebla. El rango de altitud más bajo oscila entre los 300 y los 600 msnm (Ver Figura 60).

Para realizar una representación gráfica sobre las condiciones topográficas en Michoacán, se trazó una línea imaginaria que cruza el estado, esta línea contiene la información sobre elevación (Ver Figura 61).

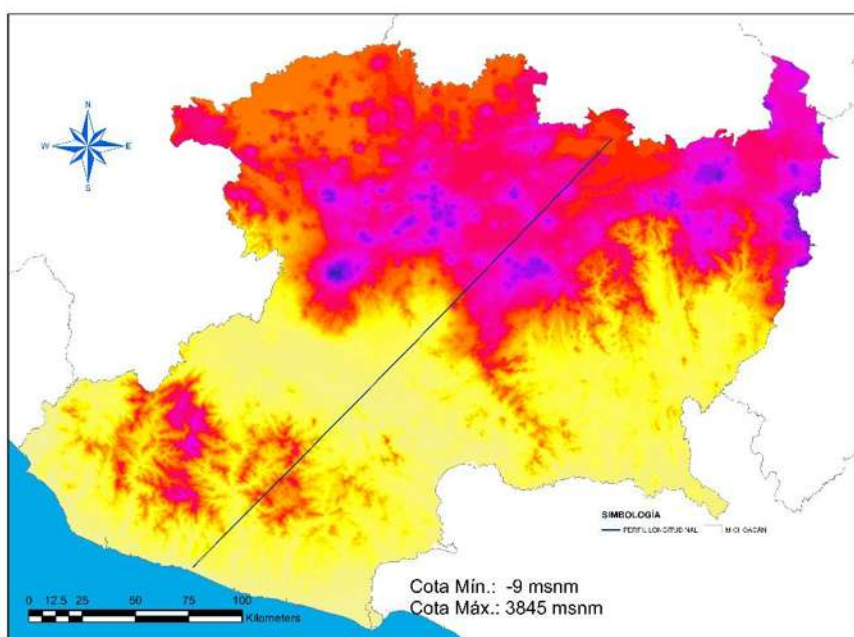


Figura 61- Línea para representación topográfica en Michoacán

Los resultados son vistos en la gráfica de la izquierda (Figura 66), en ella se aprecia las dos cordilleras montañosas, que inicia desde el punto 0 a 120,000 km (eje x) para la Sierra Madre del Sur, seguido de la depresión del Balsas (120,000 – 160,000, eje x) y terminado con el Eje Neovolcánico Transversal Mexicano (Ver Figura 62).

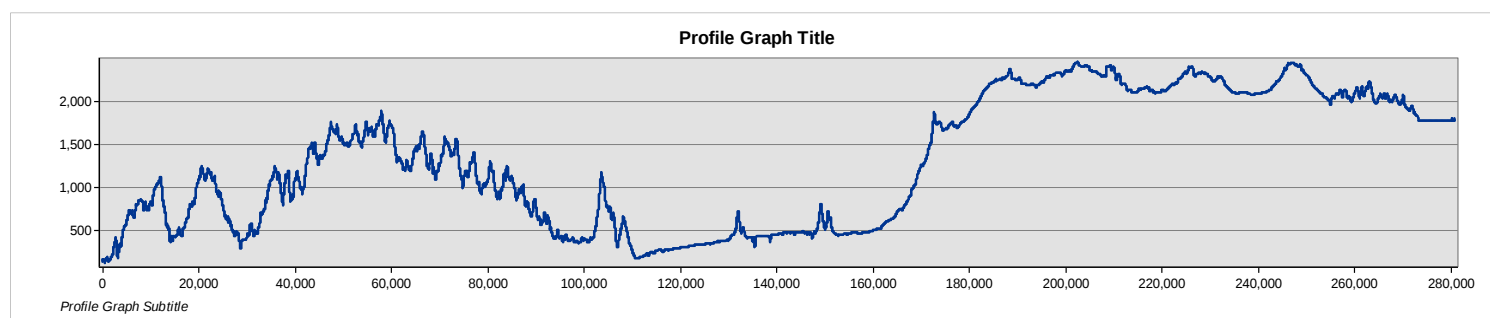


Figura 62.- Representación gráfica de la topografía de Michoacán. Fuente: Propia.

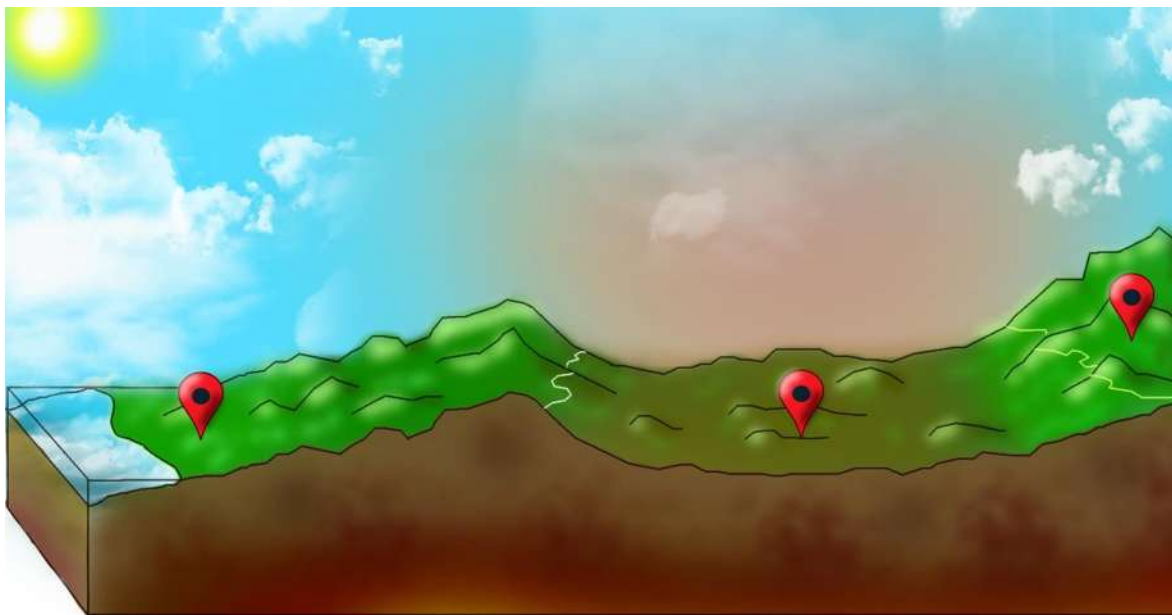


Figura 63.- Representación del dinamismo de la temperatura atmosférica respecto a la altitud. Fuente Propia

Conociendo ahora cómo funciona la relación que existe entre la temperatura y la altitud, y el efecto regulador térmico que produce el océano en las costas. Podemos constatar que las temperaturas arrojadas por las bases de datos de CONAGUA y las temperaturas calculadas por los algoritmos de los Modelos LTPP son consistentes con las condiciones topográficas en donde se encuentran las estaciones meteorológicas (Ver Figura 63).

La siguiente fase de este trabajo, es calcular las fronteras topográficas en las que se conservan las temperaturas PG MÁX estándar, y así ilustrar las zonas PG 64-22 y PG 70-22 dentro del estado.

Utilizando la ecuación 10, para el cálculo del Gradiente Térmico, e implementándola con los datos de temperatura y altitud de cada estación meteorológica, se logró calcular los gradientes térmicos para cada punto. Asimismo, se realizó un cálculo inverso para corroborar, que los datos obtenidos eran correctos.

Tabla 20.- Cálculo del Gradiente Térmico. Fuente: Propia.

ESTACIÓN	NOMBRE	MUNICIPIO	Z	TMAX AMB	ELR	TMIN AMB	TMAX (Confiabilidad) St	TMIM (Confiabilidad) St	PG_MAX St	PG_MIN St
16095	PRESA JARIPO	VILLAMAR	1587.00	30.714	0.019	-2.00	58.23	-4.68	60	-22
16063	LA PALMA	VENUSTIANO CARRANZA	1520.00	33.500	0.022	-1.00	60.34	-4.15	62	-22
16108	SAN CRISTOBAL	IXTLAN	1530.00	33.643	0.022	-5.00	60.36	-7.29	62	-22
16073	LOS LIMONES (CFE)	LOS REYES	1175.00	33.786	0.029	1.50	60.65	-2.13	62	-22
16208	CACHAN	AQUILA	79.00	33.571	0.425	12.00	60.66	5.83	62	-22
16174	SAHUAYO	SAHUAYO	1540.00	34.071	0.022	2.00	60.88	-1.64	62	-22
16106	SAN ANGEL	TINGUINDIN	1840.00	34.143	0.019	-4.50	61.03	-5.95	62	-22
16194	E.T.A. 039 TOCUMBO	TOCUMBO	1600.00	34.571	0.022	-2.00	61.20	-4.85	62	-22
16068	LAS FUENTES	SAHUAYO	2200.00	34.571	0.016	0.00	61.31	-2.90	62	-22
16009	ARTEAGA	ARTEAGA	860	34.714	0.040	6.00	61.44	1.12	62	-22
16065	LA PIEDAD DE CABADAS (D	LA PIEDAD	1684.00	35.286	0.021	3.00	61.80	-0.99	62	-22
16151	ARTEAGA (CFE)	ARTEAGA	826	35.714	0.043	1.00	62.22	-2.48	64	-22
16030	CUIMATO	BRISEÑAS	1520.00	36.129	0.024	1.00	62.45	-2.45	64	-22
16112	SAN JUAN DE ALIMA	AQUILA	530.00	36.071	0.068	5.50	62.46	0.66	64	-22
16141	YURECUARO	YURECUARO	1543.00	37.000	0.024	2.00	63.14	-1.67	64	-22
16094	PRESA GUARACHA	VILLAMAR	1580.00	37.500	0.024	-2.00	63.55	-4.57	64	-22
16125	TANGANCICUARO	TANGANCICUARO	1710.00	37.857	0.022	0.00	63.61	-3.83	64	-22
16085	PARACUARO	PARACUARO	597.00	39	0.065	8.00	64.76	2.61	66	-22
16006	ANTUNEZ	PARACUARO	360.00	40.143	0.112	13.00	65.74	6.53	66	-22
16007	APATZINGAN (SMN)	APATZINGAN	320.00	40.571	0.127	10.50	65.85	3.99	66	-22
16190	ARCEO	TUMBISCATIO	320.00	42.000	0.131	11.50	67.24	5.62	68	-22
16216	BUENAVISTA II	BUENAVISTA	450.00	42.429	0.094	2.50	67.38	-1.54	68	-22
16039	PIEDRAS BLANCAS	BUENAVISTA	419.00	42.500	0.101	10.50	67.53	4.58	68	-22
16026	CUATRO CAMINOS	MUGICA	672.00	42.500	0.063	13.00	67.59	6.58	68	-22
16158	EL CAJON	TEPALCATEPEC	296.00	43.786	0.148	10.50	68.66	5.13	70	-22

Los resultados del cálculo de Gradiente Térmico resultan en una conclusión, muestran claramente ciertas cotas de curvas de nivel que hacen de "parteaguas" en el cambio de temperatura, la cota 1500 msnm en la parte media superior, las 800 600, y 400 msnm para la parte media inferior. A continuación, se presentará un mapa con estas curvas de nivel en el cual se hizo una revisión visual y se corroboró con los puntos de las estaciones, las zonas de cambio de temperatura, y posteriormente se comparó con los mapas de las figuras 56 y 67.

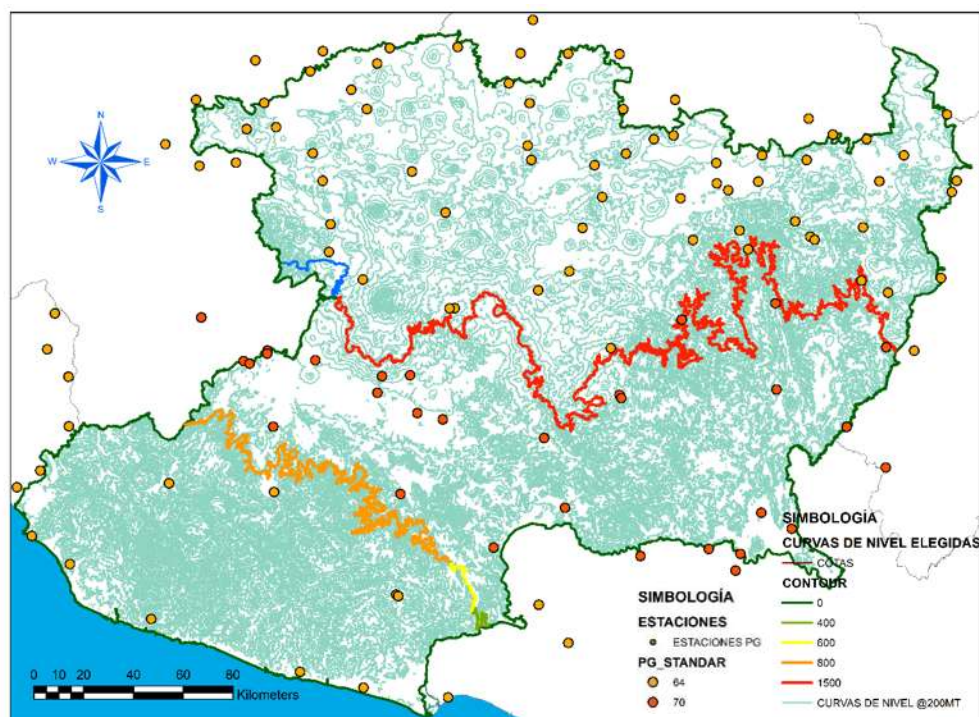


Figura 64.- Cotas de Curva de Nivel elegidas como fronteras de temperatura. Fuente: Propia.

En el mapa de la Figura 64, se presentan las cotas que definen las fronteras de temperaturas para Grado PG, en rojo y azul fuerte, las cotas que marca el "parteaguas" entre las zonas PG 64-22 y PG 70-22 en la parte media superior, en color naranja, amarillo y verde, la frontera entre las zonas PG 70-22 y PG 64-22, y en color azul pálido, las curvas de nivel de la topografía a cada 200 mts.

Al superponer, las cotas elegidas con los mapas de las Figuras 56 y 57, vemos la similitud entre las fronteras que nos muestra la división por Polígonos de Thiessen y la división por Interpolación IDW de tales mapas. A continuación, se presentan los mapas con la superposición con las cotas elegidas.

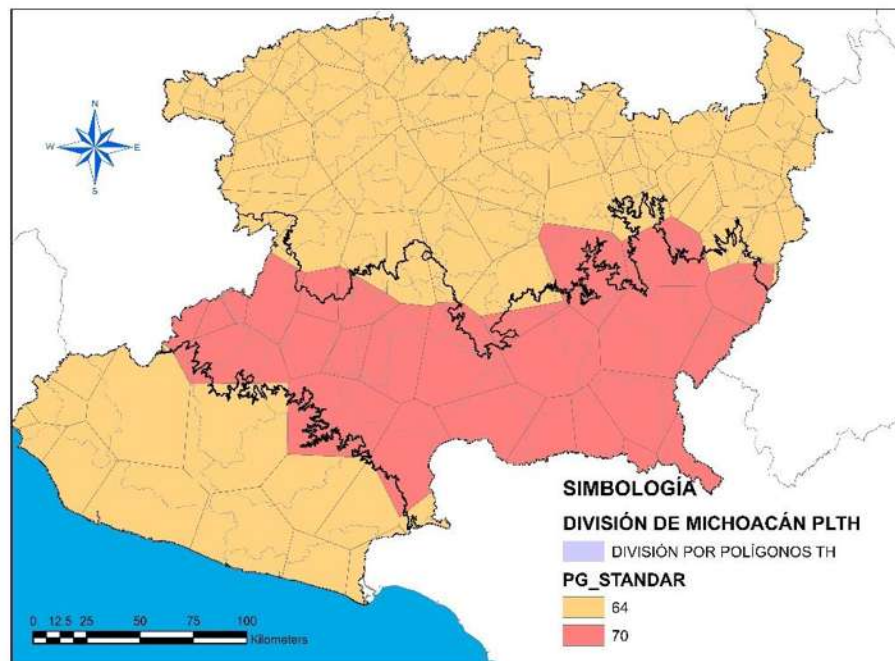


Figura 65- Comparación de Mapa Zonificación por Polígonos de Thiessen (Con cotas elegidas y puntos de estaciones). Fuente Propia.

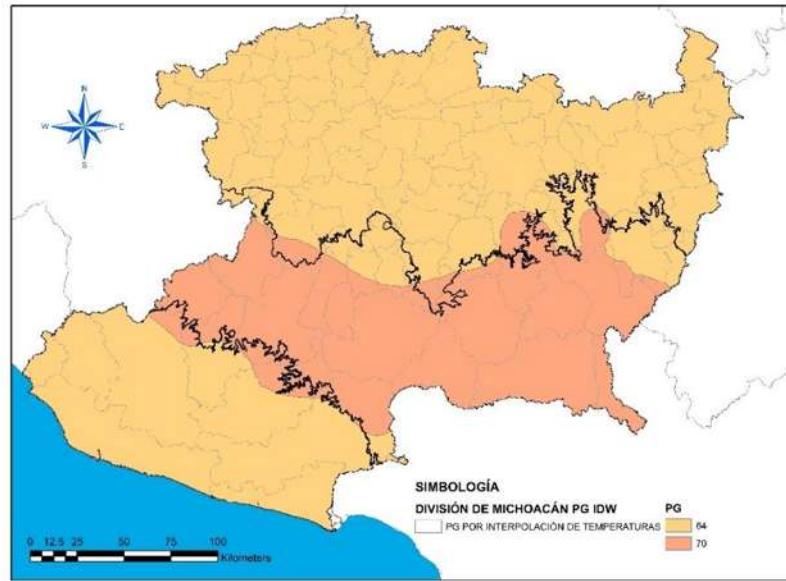


Figura 66.- Comparación de Mapa Zonificación por Interpolación IDW (Con cotas elegidas y puntos de estaciones). Fuente Propia.

En los mapas de las Figuras 65 y 66 se hizo la comparación entre los mapas de División por Polígonos de Thiessen con los puntos de las estaciones también con su clasificación de PG cada uno. Y con el mapa de Interpolación IDW, también con los puntos de las estaciones

El resultado de las iteraciones de las temperaturas, altitudes y los gradientes de temperaturas, junto con la comparación de los resultados de las pre zonificaciones por métodos como Área de Influencia por Polígonos de Thiessen y la Interpolación IDW de temperaturas: finalmente tienen su resultado, dos zonas a las que pertenece el Grado PG 64-22 y una zona PG 70-22 (Ver Figuras 67 y 68):

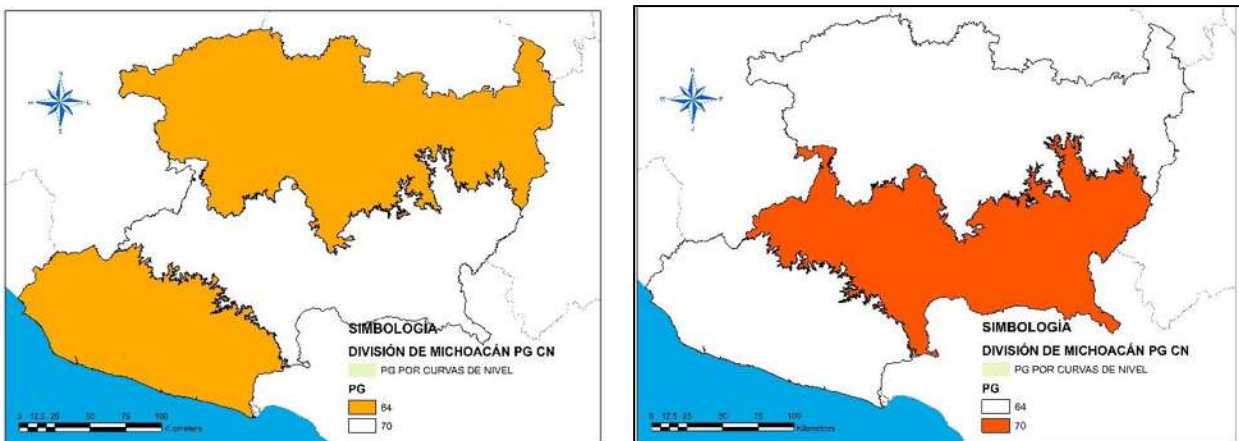


Figura 67.- Zonificación del Grado PG 64-22 y Grado PG 70-22 por separado. Fuente: Propia

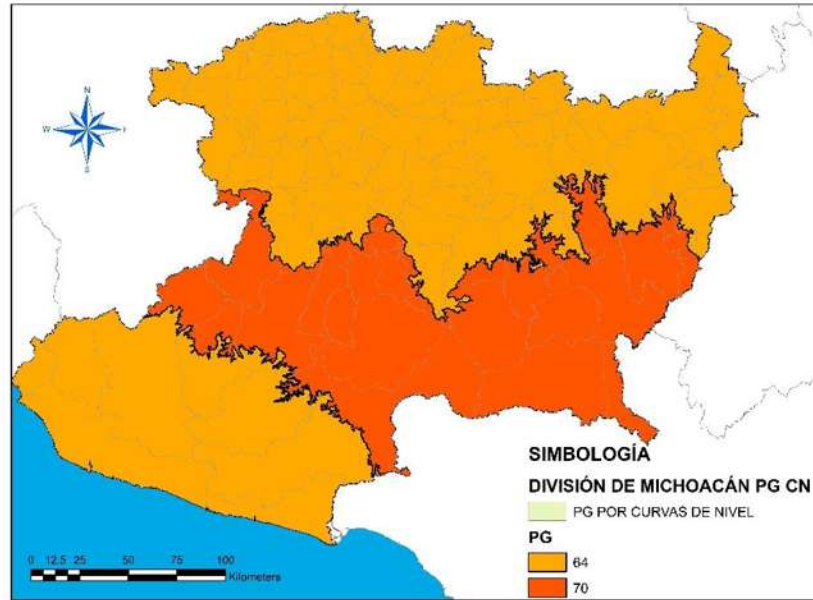


Figura 68.- Zonificación Final del Grado de Desempeño para la Selección de Cementos Asfálticos para el Estado de Michoacán

Haciendo una comparación final, esta vez con el mapa de zonificación del Grado PG de la Norma Mexicana N-CTM-4-005/05 Calidad de los materiales asfálticos Grado PG. Se observan grandes diferencias, entre uno y otro, por ejemplo, hay áreas que no cubren las zonas de Grado PG o que no corresponde a lo calculado en este trabajo (Ver Figura 6g).

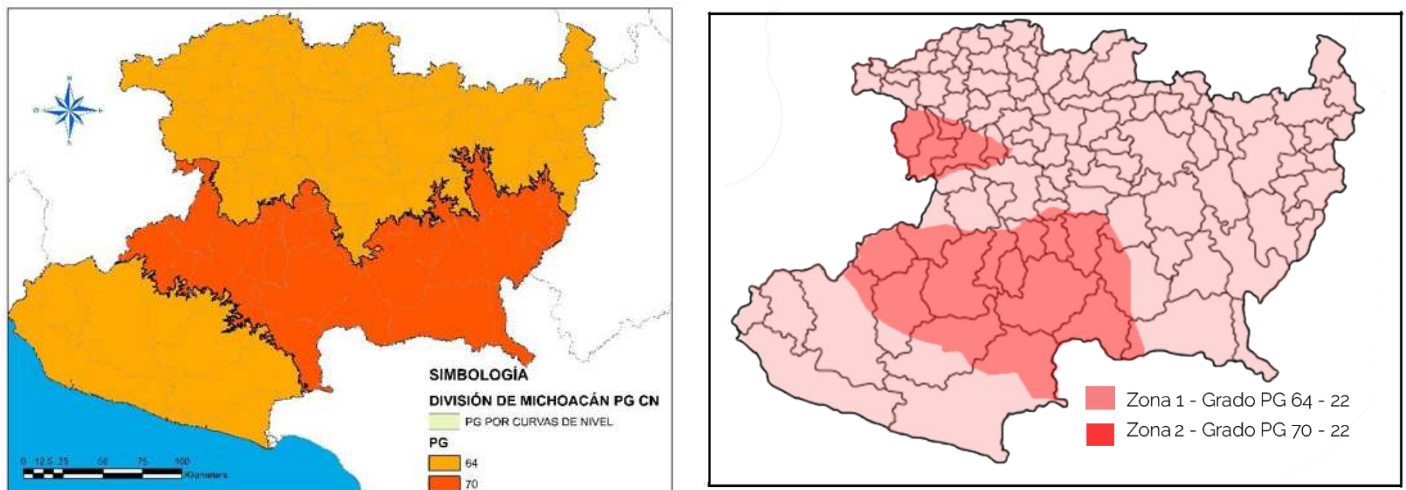


Figura 6g.- Comparativa del Mapa de Zonificación del Grado PG concebido por este trabajo y el Mapa de Zonificación del Grado PG de la Norma Mexicana N-CTM-4-005/05

RESULTADOS

4.5.-Resultados

En este trabajo se explica la importancia socio económica de los pavimentos en México, los tipos de pavimentos, ¿qué son los pavimentos asfálticos?, los tipos de diseños más utilizados en México, la clasificación de cementos asfálticos Grado PG, las características y pruebas de los cementos asfálticos Grado PG, como se deriva una clasificación de un cemento Grado PG (SUPERPAVE), antecedentes, el objetivo de este trabajo, y la problemática.

El mapa de zonificación del Grado PG para la selección del Cemento Asfáltico se deriva del análisis estadístico de la temperatura local en cada punto de estación meteorológica en la plataforma de lenguaje Python; la implementación de los algoritmos del Modelo LTPP del programa SUPERPAVE, usado por el Protocolo AMAAC, para encontrar las temperaturas correspondientes a la temperatura del ambiente; la interpretación de la relación Temperatura – Altitud mediante el uso de procesadores georreferenciados (GIS) junto con el gradiente térmico, y la comparación de los diferentes resultados obtenidos.

Dando como resultado final El Mapa de Zonificación del Grado PG para la selección del Cemento Asfáltico para el Estado de Michoacán por temperatura (Ver Figura 70):

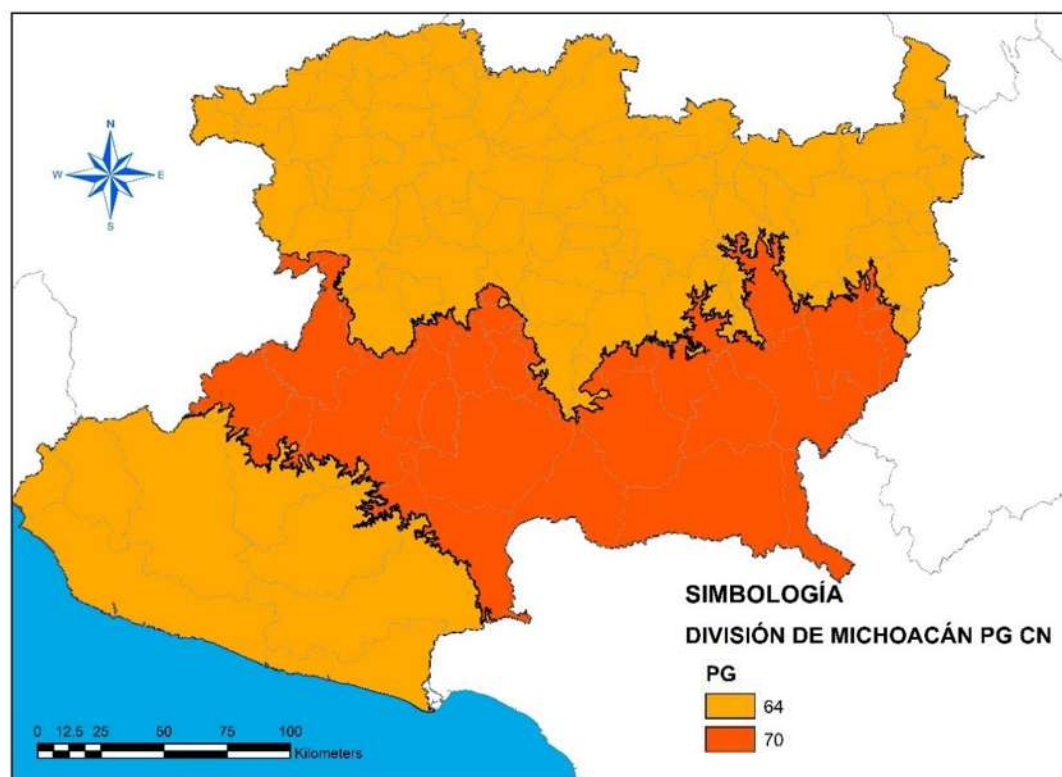


Figura 70.- Mapa de Zonificación del Grado PG para la selección del Cemento Asfáltico para el Estado de Michoacán por temperatura

CONCLUSIONES

Conclusión

México tiene un arduo camino por recorrer en muchos ámbitos, para poder emerger como una de las potencias socio económicas más fuertes del planeta, lugar que se merece. Ya que tiene las condiciones idóneas para ello. Hay rubros que aún no se actualizan a la vanguardia que es de esperarse en el país.

Los sistemas informáticos o bases de datos en México aún viven en el siglo pasado, es muy difícil acceder a información verídica, completa y confiable, de cualquier tipo de dependencia gubernamental. En ocasiones la información es falsa, errónea, o se proporciona en formas poco prácticas (escrita en papel), o simplemente no existe tal información en ninguna base de datos. Repercutiendo negativamente en investigaciones o trabajos como este, que dependen fielmente de estas bases de datos.

Sin embargo, no está todo perdido en México, paso a paso, las nuevas tecnologías se hacen presentes, tal es el caso de este proyecto, que al hacer uso de programas de lenguaje facilitaron en gran medida el trabajo, que de no haber sido así, se hubiesen invertido muchas horas en ello.

Esta investigación tiene como fin el ofrecer una herramienta que de mayor certeza a los futuros proyectos carreteros que se desarrollen en el Estado de Michoacán, dando una sugerencia bien fundada en la selección de cemento asfáltico adecuado para cualquier zona dentro del territorio michoacano. Caminos que refuercen el bienestar socioeconómico de las comunidades michoacanas. Impulsando el desarrollo de nuestro estado y, por ende, de nuestro país.

Bibliografía

- Alva Valdivia, L. M. (2016). *Propiedades geofísicas de la tierra*. Plaza y Valdes.
- Alvarez, M. A. (2017). *Desarrollo Web*. Obtenido de ¿Qué es Python?: <https://desarrolloweb.com/articulos/1325.php>
- AMAAC-PA. (2016). *Protocolo AMAAC - PA - MA 2016*. Grafica, Creatividad y Diseño S.A C.V.
- CANACEM. (2014). *Pavimentos*.
- CanaldelaConstrucción.com. (2017). *Canal de la Construcción*. Obtenido de Canal de la Construcción: <http://canalconstruccion.com/pavimentos-flexibles.html>
- Carbajal, G. (2016). Método Marshall. En Desconocido, *Método Marshall* (pág. 1).
- Coalla, F. (Marzo de 2017). Programa Estatal de Rehabilitación de Carreteras. (C. d. Michoacán, Entrevistador)
- ConstruPedia. (2017). *Clasificaciones de las Mezclas Asfálticas*. Obtenido de ConstruPedia: <http://www.construmatica.com/construpedia/>
- CT, C. d. (2016). *Infraestructura 2016*. Gubernamental, Camara de Diputados, Comición de Transportes. Obtenido de <http://www.diputados.gob.mx/comisiones/transportes/infogen.htm>
- Doing.Business. (2014). *Informe Económico México*.
- ESRI. (2017). *Qué es ArcGIS*. Obtenido de <http://desktop.arcgis.com/es/>
- fallasenpavimentoflexible.blogspot. (2017). *fallas en pavimento flexible*. Obtenido de <http://fallasenpavimentoflexible.blogspot.mx>
- FHWA-SUPERPAVE. (1998). LTPP SEASONAL ASPHALT CONCRETE. En FHWA, *SUPERPAVE-L TPP*.
- FIPAIM. (2017). *Fideicomiso de Parques Industriales de Michoacán*.
- Giraldo, J. A. (2017). *La atmosfera y el clima*. (J. A. Giraldo, Intérprete)
- IMT-ISSN-188-7297. (1998). *PAVIMENTOS FLEXIBLES PROBLEMÁTICA, METODOLOGÍAS DE DISEÑO Y TENDENCIAS*.
- Ingeniería-Civil. (2013). *ingenieriacivil.tutorialesaldia*. Obtenido de <http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/metodos-para-el-calculo-de-la-precipitacion-media-en-una-cuenca/>
- Mungaray. (2017). "Zonificación para la elaboración del Catálogo de Secciones Estructurales para Pavimentos Flexibles del Estado de Baja California. En D. L. Dr. Julio Alberto Calderón Ramírez, *"Zonificación para la elaboración del Catálogo de*

Secciones Estructurales para Pavimentos Flexibles del Estado de Baja California (pág. Varias). Mexicali, B.C.

PEMEX-EKBÉ-SUPERPAVE-PG. (2014). *PEMEX EKBÉ SUPERPAVE PG*. Obtenido de <http://www.pemex.com/comercializacion/productos/Paginas/refinados/asfalto-ekbe.aspx>

QGIS. (2017). *Documentación de QGIS*. Obtenido de https://docs.qgis.org/2.8/es/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html

SCT. (2006). N-CTR-CAR-1-04-006/09. En S. d. Transportes, *Pavimentos - Carpetas Asfálticas con Mezclas en Caliente* (pág. 1).

SCT, S. d. (2006). Características de los Materiales para Pavimentos. En *Características de los Materiales* (pág. 1).

SCT, S. d. (2016). *Informe de Infraestructura 2016*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Republica Mexicana: Gobierno Federal.

SCT-M-MMP-4-05-002/02. (2002). Viscosidad Dinámica. En SCT, *Métodos de Muestreo y Pruebas a los Materiales*.

SCT-M-MMP-4-05-007/00. (2007). Punto de Inflamación de Cleveland. En SCT, *Métodos de Muestreo y Pruebas a los Materiales*.

SCT-M-MMP-4-05-010/02. (2002). Película Delgada. En SCT, *Métodos de Muestreo y Pruebas a los Materiales*.

SCT-M-MMP-4-05-025/02. (2002). Módulo Reológico de Corte Dinámico. En SCT, *Métodos de Muestreo y Pruebas a los Materiales*.

SCT-N-CMT-4-05-001 (2002). Ensayo de Vasija de Envejecimiento (PAV). En SCT, *Métodos de Muestreo y Pruebas a los Materiales*.

SCT-N-CTM-4-05-004/05. (2005). Calidad de los Materiales Grado PG. En SCT, *Características de los Materiales*.

SEE-Secretaría de Economía del Estado de Michoacán. (2016). *Informe Económico de Michoacán*.

SE-Secretaría de Economía. (2015). *Informe Económico Michoacán*.

Silva, J. H. (2016). Tipo de Pavimentos. En J. H. Silva, *Tipo de Pavimentos* (pág. 4).

SMN-EMAS. (2017). *Servicio Meteorológico Nacional*. Obtenido de <http://smn.cna.gob.mx/es/emas>

Suárez, V. K. (2014). Cálculo y análisis de la inversión térmica. En V. K. Suárez.

Figuras

<i>Figura 1.- Mapa de Zonificación del Estado de Baja California del Grado PG. Fuente: Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano del Estado de Baja California.</i>	1
<i>Figura 2.- Logística en ubicación de Parques Industriales. Fuente: Secretaría de Economía.</i>	3
<i>Figura 3.- Puerto Lázaro Cárdena en una de las zonas económicas especiales de México en el Estado de Michoacán. Fuente: Secretaría de Economía.</i>	4
<i>Figura 4.- Aguacate, representativo en la actividad agrícola del estado de Michoacán.</i>	4
<i>Figura 5.- Isla de Janitzio, en Pátzcuaro, Michoacán. Fuente: Miranda Hurtado</i>	5
<i>Figura 6.- Autopista Siglo XXI. Fuente: Noventa Grados.</i>	5
<i>Figura 7.- Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos Grado PG en el Estado de Michoacán. Fuente: N-CMT-405-004/05 SCT.</i>	6
<i>Figura 8.- Posibles fallas que puede presentar un Pavimento Flexible mal diseñado. Fuente: fallasenpavimentoflexible.blogspot.</i>	7
<i>Figura 9.- Prototipo visual del Programa PG Zonificado de Michoacán. Fuente: Propia.</i>	10
<i>Figura 10.- Posición de México en el Mundo en cuestión de Infraestructura Carretera. Fuente: Indexmundi.</i>	13
<i>Figura 11.- Ilustración de la red carretera del Estado de Michoacán. Fuente: www.sct.gob.mx.</i>	14
<i>Figura 12.- Vialidad de superficie de rodamiento de Concreto Hidráulico. Fuente: www.PECASMAYO.com</i>	15
<i>Figura 13.- Distribución de cargas en capas de un pavimento flexible. Fuente: www.PECASMAYO.com</i>	15
<i>Figura 14.- Capas de un pavimento flexible. Fuente: Canal Construcción</i>	16
<i>Figura 15.- Esquema representativo de una mezcla asfáltica a nivel agregado pétreo. Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013³</i>	16
<i>Figura 16.- Diagrama de las fases de una mezcla asfáltica. Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013³.</i>	17
<i>Figura 17.- Clasificación de los materiales asfálticos. Fuente: Noticias + verdes</i>	20
<i>Figura 18.- Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60°C. Fuente: N-CMT-405-001/06 SCT.</i>	21
<i>Figura 19.- Recomendaciones mínimas para el rango de granulometrías densas. Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013³</i>	28
<i>Figura 20.- Copa abierta de Cleveland. Fuente: Norma MMMP-405-007/00.</i>	35
<i>Figura 21.- Montaje del equipo. Fuente: Norma MMMP-405-007/00.</i>	35
<i>Figura 22.- Viscosímetro capilar de vacío del Instituto del Asfalto (AIVV).</i>	36
<i>Figura 23.- Reómetro de corte dinámico (DSR). a) Muestra del procedimiento del ensayo DSR. b) Equipo DSR. Fuente: SciELO.</i>	37
<i>Figura 24.- Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO). Fuente: Proetisa.</i>	37
<i>Figura 25.- Vasija de envejecimiento a</i>	38
<i>Figura 26.- Viscosímetro rotacional (RV). Fuente: Elcometer</i>	38
<i>Figura 27.- Reómetro en viga de Flexión (BBR). Fuente: Metrología Adatec</i>	39
<i>Figura 28.- Ensayes de Simulación de Etapas de Vida de un Asfalto. Fuente: Dr. Delgado</i>	40
<i>Figura 29.- Sistema de clasificación basado en clima. Especificación del cemento asfáltico SUPERPAVE. Fuente: Asociación Mexicana del Asfalto, A. C.</i>	43
<i>Figura 30.- Nomenclatura de gradiente de temperatura alta y baja. Fuente: Asociación Mexicana del Asfalto, A. C.</i>	43
<i>Figura 31.- Incremento del grado en 6 °C para temperaturas altas y bajas. Fuente: Asociación Mexicana del Asfalto, A. C.</i>	43

Figura 32.-Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos Grado PG. Fuente: N-CMT-405-001/08 SCT.....	44
Figura 33.-Temperatura Baja del Pavimento vs Temperatura del Aire. Fuente: FHWA - RD.....	49
Figura 34.-Temperatura Baja del Pavimento vs Latitud. Fuente: FHWA - RD.....	50
Figura 35.- Temperatura Baja del Pavimento vs Profundidad. Fuente: FHWA - RD.....	50
Figura 36.- Comportamiento de los Modelos SHRP y LTPP con diferentes niveles de confiabilidad. Fuente: FHWA-RD.....	51
Figura 37.- Comportamiento de los Modelos SHRP y LTPP con diferentes niveles de confiabilidad (Profundidad 20 mm). Fuente: FHWA-RD.....	53
Figura 38.- Estación Meteorológica Automática EMA	55
Figura 39.- Las 232 estaciones meteorológicas presentes en el Edo. de Michoacán	59
Figura 40.- Comportamiento de TMAX (rojo) y TMIN (azul) en el tiempo. Est. 16109. Fuente: Propia	60
Figura 41.- Comportamiento de TMAX (rojo) y TMIN (azul) en el tiempo. Est. 16003. Fuente: Propia	60
Figura 42.- Comportamiento de TMAX (rojo) y TMIN (azul) en el tiempo. Est. 16032. Fuente: Propia	61
Figura 43.- Total de 81 Estaciones Aprobadas por Paso 1 y 2. Fuente: Propia	62
Figura 44.- Zona con vicios geográficos por estaciones aprobadas en Michoacán (Área Color Rojo). Fuente: Propia.	62
Figura 45.- Estaciones Aprobadas más estaciones de apoyo. Fuente: Propia.....	63
Figura 46.- Python (PyCharm Interprete), Script 01 Conversión de datos (tipo calendario) a Datos en series de tiempo. Fuente: Propia	65
Figura 47.- Proceso visual del Script 01 de Python. Fuente: Propia.	65
Figura 48.- Outlier en data frame para la variable TMAX en la estación 16136. Fuente: Propia.....	66
Figura 49.- Python (PyCharm Interprete), Script 06, Análisis Estadístico. Fuente: Propia	67
Figura 50.- Mapa de distribución del PG por estación. Fuente: Propia.	71
Figura 51.- Distribución gráfica de los PG por estación. Fuente: Propia.	72
Figura 52.- Mapa de Estaciones con PG estandarizado (PG 64 -22 y PG 70 -22). Fuente: Propia.....	73
Figura 53.- Pasos para construir los Polígonos de Thiessen. Fuente: Propia.....	75
Figura 54.- Área de Influencia por Polígonos de Thiessen cada estación. Estaciones con PG MÁX calculado. Fuente: Propia.....	76
Figura 55.- Interpolación IDW de las temperaturas PG MÁX calculadas. Fuente: Propia.	76
Figura 56.- Área de Influencia por Polígonos de Thiessen cada estación. Estaciones con PG MÁX estándar. Fuente: Propia.	77
Figura 57.- Interpolación IDW de las temperaturas PG MÁX estándar Fuente: Propia.	78
Figura 58.- Perfil vertical de temperatura y estructura de la atmósfera. Fuente: Geociencias.	79
Figura 59.- Influencia reguladora del océano en la temperatura. Fuente: Geoclimas.com	80
Figura 60.- Modelo de Elevaciones del Estado de Michoacán. Fuente: Propia.	81
Figura 61.- Línea para representación topográfica en Michoacán	82
Figura 62.- Representación gráfica de la topografía de Michoacán. Fuente: Propia.	82
Figura 63.- Representación del dinamismo de la temperatura atmosférica respecto a la altitud. Fuente Propia.....	83
Figura 64.- Cotas de Curva de Nivel elegidas como fronteras de temperatura. Fuente Propia.	84
Figura 65.- Comparación de Mapa Zonificación por Polígonos de Thiessen (Con cotas elegidas y puntos de estaciones). Fuente Propia	85
Figura 66.- Comparación de Mapa Zonificación por Interpolación IDW (Con cotas elegidas y puntos de estaciones). Fuente Propia	86
Figura 67.- Zonificación del Grado PG 64 -22 y Grado PG 70 -22 por separado. Fuente: Propia	86

Figura 68.- Zonificación Final del Grado de Desempeño para la Selección de Cementos Asfálticos para el Estado de Michoacán.....	87
Figura 69.- Comparativa del Mapa de Zonificación del Grado PG concebido por este trabajo y el Mapa de Zonificación del Grado PG de la Norma Mexicana N-CTM-4-005/05.....	87
Figura 70.- Mapa de Zonificación del Grado PG para la selección del Cemento Asfáltico para el Estado de Michoacán por temperatura.....	89

Tablas

Tabla 1.- Posición de México en el Mundo en Densidad de Infraestructura Carretera. Fuente: The World Competitiveness Yearbook 2000.	13
Tabla 2.- Clasificación de los materiales asfálticos. Fuente: N-CMT-4-05-001/06 SCT	20
Tabla 3.- Clasificación de los cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60°C. Fuente: N-CMT-4-05-001/06 SCT.....	21
Tabla 4.- Clasificación de las emulsiones asfálticas. Fuente: N-CMT-4-05-001/06 SCT	23
Tabla 5.- Clasificación de los asfaltos rebajados. Fuente: N-CMT-4-05-001/06 SCT	23
Tabla 6.- Niveles de diseño en función de los ejes equivalentes de 8.2 t y el tipo de carretera. Fuente: TECA	27
Tabla 7.- Definición del tipo de mezcla en función del tamaño nominal Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013 ³	28
Tabla 8.- Requisitos de calidad de la fracción gruesa del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa. Fuente: TECA	29
Tabla 9.- Requisitos de calidad de la fracción fina del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa. Fuente: TECA	30
Tabla 10.- Rangos de viscosidad para seleccionar las temperaturas de mezclado y compactación entre el agregado pétreo y el cemento asfáltico. Fuente: Protocolo AMAAC PA – MA 01/2013 ³ ...	32
Tabla 11.- Requisitos de calidad para cementos Grado PG. Fuente: N-CMT-4-05-001/05 SCT.....	33
Tabla 12.- Ensayes de acuerdo la etapa de vida de un asfalto. Fuente: TECA.	39
Tabla 13.- Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada y con la velocidad de operación. Fuente: N-CMT-4-05-001/05 SCT.....	45
Tabla 14.- Ejemplo de acomodo de los datos de una estación meteorológica – Estación 16009 Arteaga, Arteaga (Temp. Máx. Diaria) Fuente: CONAGUA.....	56
Tabla 15.- Ejemplo de acomodo de los datos de una estación meteorológica – Estación 16009 Arteaga, Arteaga (Temp. Mín. Diaria) Fuente: CONAGUA.....	57
Tabla 16.- Ejemplo de acomodo de los datos de una estación meteorológica – Estación 16009 Arteaga, Arteaga (Precipitación Diaria) Fuente: CONAGUA.....	57
Tabla 17.- Descripción por Estación, Código, Nombre, Ubicación (Coordenadas). Fuente: CONAGUA.....	58
Tabla 18.- Estaciones Aprobadas más estaciones de apoyo. Fuente: Propia.	67
Tabla 19.- Cálculo y selección del PG (calculado y estándar) para 118 estaciones.	71
Tabla 20.- Cálculo del Gradiente Térmico. Fuente: Propia.	84

Ecuaciones

<i>Ecuación 1.- Determinación del DSR.....</i>	36
<i>Ecuación 2.- Temperatura baja del pavimento por el Modelo LTPP con confiabilidad. Fuente: FHWA-RD.....</i>	51
<i>Ecuación 3.- Temperatura alta del pavimento por el Modelo LTPP con confiabilidad. Fuente: FHWA-RD.....</i>	52
<i>Ecuación 4.- Temperatura baja del pavimento por el Modelo LTPP con confiabilidad. Fuente: FHWA-RD.....</i>	68
<i>Ecuación 5.- Temperatura alta del pavimento por el Modelo LTPP con confiabilidad. Fuente: FHWA-RD.....</i>	69
<i>Ecuación 6.- Ejemplo de implementación de Modelo baja temperatura con confiabilidad LTPP, valores estación 16109. Fuente: Propia.....</i>	69
<i>Ecuación 7.- Resultado (Ec. 6) con valores de estación 16109. Fuente Propia.....</i>	69
<i>Ecuación 8.- Ejemplo de implementación de Modelo alta temperatura con confiabilidad LTPP, valores estación 16109. Fuente: Propia.....</i>	70
<i>Ecuación 9.- Resultado (Ec. 7) con valores de estación 16109. Fuente Propia</i>	70
<i>Ecuación 10.- Gradiente Térmico. Fuente: Fundamentos de meteorología.....</i>	80