



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



*“CONSIDERACIONES SOBRE EL MODELO CLIMÁTICO EN LA
GUÍA MEPDG (MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN
GUIDE)”*

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

BISMARCK LEDEZMA NAVARRO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA

MORELIA, MICHOACÁN, MARZO DE 2011

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	vii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	xv

CAPÍTULO 1

GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EMPÍRICO – MECANICISTA	19
1.1 Introducción	19
1.2 Características generales de la guía	21
1.3 Condiciones de entrada	24
1.3.1 Tránsito	24
1.3.2 Efectos ambientales	25
1.3.3 Propiedades de los materiales	29
1.3.4 Otros.....	30

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES AMBIENTALES DEL MODELO EICM	31
2.1 Introducción	31
2.2 Descripción del análisis	33
2.3 Formato de los archivos del EICM	34
2.3.1 Archivo hourly climatic data (hcd)	34
2.3.2 Archivo icm (*.icm)	35
2.3.3 Datos de las estaciones (station.dat)	37
2.4 Procedimiento del análisis de sensibilidad del EICM	37
2.5 Ajuste de temperatura.....	39
2.6 Sensibilidad de acuerdo a la variable climática	41
2.6.1 Precipitación.....	42
2.6.2 Temperatura.....	50

2.6.3 Velocidad del viento	59
2.6.4 Radiación solar (Nubosidad)	68
2.6.5 Humedad relativa	77
2.7 Análisis de resultados	85
CAPÍTULO 3	
GENERACIÓN DE LOS ARCHIVOS CLIMÁTICOS PARA MÉXICO	87
3.1 Estaciones climáticas.....	87
3.1.1 Estaciones convencionales	87
3.1.2 Estaciones Meteorológicas Automatizadas	89
3.2 Generación de estaciones virtuales con variables nacionales	96
3.2.1 Formato de los archivos climáticos	96
3.3 Adaptación de datos	100
3.4 Generación de archivo “icm”	107
CAPÍTULO 4	
LA GUÍA DE DISEÑO PAVIMENTOS EMPÍRICO – MECANICISTA EN MÉXICO	109
4.1 Introducción	109
4.2 Aplicación de la Guía de Diseño de Pavimentos E-M.....	110
4.2.1 Tránsito vehicular	113
4.2.2 Condiciones ambientales	122
4.2.3 Estructura	123
4.3 Diseño de estructuras de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM (DISPAV-5)	130
4.4 Diseño estructural de pavimentos flexibles con el Método AASHTO ‘93	132
4.5 Resultados de los análisis realizados en la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista	134
4.5.1 Análisis realizado con datos climáticos de la estación localizada en el Sistema Meteorológico Nacional.....	135
4.5.2 Análisis realizado con datos climáticos de la estación localizada en la ciudad de Zacatecas, Zacatecas	136
4.5.3 Análisis realizado con datos climáticos de la estación localizada en la ciudad de Mérida, Yucatán	137
4.6 Análisis de resultados	139
CONCLUSIONES	142
BIBLIOGRAFÍA	145

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1	Proceso de análisis en la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista.....	22
Figura 1.2	Estaciones climáticas de los Estados Unidos con las que cuenta la base de datos del EICM	27
Figura 1.3	Estaciones climáticas automatizadas y estaciones sinópticas administradas por el Servicio Meteorológico Nacional.....	29

CAPÍTULO 2

Figura 2.1	Temperatura caso base.....	40
Figura 2.2	Temperatura ajustada	40
Figura 2.3	Temperatura base contra temperatura ajustada	41
Figura 2.4	Agrietamiento longitudinal debido a la precipitación en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham	43
Figura 2.5	Agrietamiento en cocodrilo debido a la precipitación en clima templado lluvioso con estación en Portland.....	43
Figura 2.6	Iri presentado en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham debido a la precipitación.....	45
Figura 2.7	Iri presentado en clima templado-lluvioso con estación en Portland debido a la precipitación.....	45
Figura 2.8	Roderos finales presentadas debido a la precipitación en clima seco con estación en Phoenix	47
Figura 2.9	Roderos finales presentadas debido a la precipitación en clima templado-lluvioso con estación en Portland	47
Figura 2.10	Módulos presentados debido a la precipitación en clima templado-lluvioso con estación en Seattle	48
Figura 2.11	Módulos presentados debido a la precipitación en clima cálido-húmedo con estación en Miami....	49
Figura 2.12	Módulos presentados debido a la precipitación en clima seco con estación en El Paso	49
Figura 2.13	Agrietamiento longitudinal presentado debido a la temperatura en clima cálido-húmedo con estación en Miami	51
Figura 2.14	Agrietamiento longitudinal presentado debido a la temperatura en clima templado-lluvioso con estación en Portland	51
Figura 2.15	Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la temperatura en clima cálido-húmedo con estación en Miami	52
Figura 2.16	Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la temperatura en clima templado-lluvioso con estación en Portland	52
Figura 2.17	Iri presentado debido a la temperatura en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham	54

Figura 2.18	Iri presentado debido a la temperatura en clima seco con estación en Phoenix.....	55
Figura 2.19	Roderas finales presentadas debido a la temperatura en clima templado-lluvioso con estación en Portland	56
Figura 2.20	Roderas finales presentadas debido a la temperatura en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham	56
Figura 2.21	Módulos presentados debido a la temperatura en clima cálido-húmedo con estación en Miami.....	58
Figura 2.22	Módulos presentados debido a la temperatura en clima templado-lluvioso con estación en Portland.....	58
Figura 2.23	Agrietamiento longitudinal presentado debido a la velocidad del viento en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham.....	60
Figura 2.24	Agrietamiento longitudinal presentado debido a la velocidad del viento en clima seco con estación en Phoenix	60
Figura 2.25	Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la velocidad del viento en clima cálido-húmedo con estación en Miami	61
Figura 2.26	Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la velocidad del viento en clima seco con estación en Phoenix	61
Figura 2.27	Iri presentado debido a la velocidad del viento en clima templado-lluvioso con estación en Portland.....	63
Figura 2.28	Iri presentado debido a la velocidad del viento en clima seco con estación en Phoenix	63
Figura 2.29	Roderas finales presentadas debido a la velocidad del viento en clima templado-lluvioso con estación en Portland	65
Figura 2.30	Roderas finales presentadas debido a la velocidad del viento en clima seco con estación en Phoenix	65
Figura 2.31	Módulos presentados debido a la velocidad del viento en clima templado-lluvioso con estación en Portland	67
Figura 2.32	Módulos presentados debido a la velocidad del viento en clima seco con estación en El Paso.....	67
Figura 2.33	Agrietamiento longitudinal presentado debido a la nubosidad en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham.....	69
Figura 2.34	Agrietamiento longitudinal presentado debido a la nubosidad en clima templado-lluvioso con estación en Portland	70
Figura 2.35	Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la nubosidad en clima templado-lluvioso con estación en Portland	70
Figura 2.36	Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la nubosidad en clima cálido-húmedo con estación en Miami	71
Figura 2.37	Iri presentado debido a la nubosidad en clima cálido-húmedo con estación en Miami.....	73
Figura 2.38	Iri presentado debido a la nubosidad en clima seco con estación en Phoenix	73
Figura 2.39	Roderas finales presentadas debido a la nubosidad en clima seco con estación en El Paso	75
Figura 2.40	Roderas finales presentadas debido a la nubosidad en clima templado-lluvioso con estación en Portland	75
Figura 2.41	Módulos presentados debido a la nubosidad en clima seco con estación en Phoenix.....	76
Figura 2.42	Módulos presentados debido a la nubosidad en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham	77

Figura 2.43	Agrietamiento longitudinal presentado debido a la humedad relativa en clima templado-lluvioso con estación en Portland.....	78
Figura 2.44	Agrietamiento longitudinal presentado debido a la humedad relativa en clima seco con estación en Phoenix	79
Figura 2.45	Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la humedad relativa en lima templado-lluvioso con estación en Portland.....	79
Figura 2.46	Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la humedad relativa en lima seco con estación en Phoenix	80
Figura 2.47	Iri presentado debido a la humedad relativa en clima templado-lluvioso con estación en Portland.....	81
Figura 2.48	Iri presentado debido a la humedad relativa en clima seco con estación en Phoenix	81
Figura 2.49	Rodera finales presentadas debido a la humedad relativa en clima templado-lluvioso con estación en Portland	82
Figura 2.50	Rodera finales presentadas debido a la humedad relativa en lima seco con estación en Phoenix	83
Figura 2.51	Módulos presentados debido a la humedad relativa en clima templado-lluvioso con estación en Portland.....	84
Figura 2.52	Módulos presentados debido a la humedad relativa en clima seco con estación en Phoenix	84

CAPÍTULO 3

Figura 3.1	Estación automatizada tipo andamio.....	95
Figura 3.1	Estación automatizada tipo torre triangular	95

CAPÍTULO 4

Figura 4.1	Pantalla inicial del programa Mechanical Empirical Pavement Design Guide.....	111
Figura 4.2	Información general del proyecto	112
Figura 4.3	Información sobre identificación del proyecto	112
Figura 4.4	Límites de parámetros a analizar	113
Figura 4.5	Tránsito vehicular	114
Figura 4.6	Ajuste mensual del tránsito vehicular	115
Figura 4.7	Distribución por clase de vehículos pesados	115
Figura 4.8	Distribución horaria para vehículos pesados.....	115
Figura 4.9	Factor de crecimiento vehicular.....	117
Figura 4.10	Espectro de carga vehículo T3-S2-R4.....	118
Figura 4.11	Ventana respeto a los espectros de carga	120
Figura 4.12	Características de entrada sobre el número de ejes.....	121
Figura 4.13	Configuración de los ejes	121

Figura 4.14	Espacio entre ejes	121
Figura 4.15	Ventana del Enhanced Integrated Climatic Model.....	123
Figura 4.16	Estructura del pavimento	125
Figura 4.17	Propiedades del material asfáltico.....	125
Figura 4.18	Granulometría de la mezcla asfáltica	126
Figura 4.19	Propiedades generales del asfalto proyecto	126
Figura 4.20	Propiedades de la capa de base	127
Figura 4.21	Granulometría de la capa de base	127
Figura 4.22	Propiedades de la capa subrasante	128
Figura 4.23	Granulometría de la capa subrasante	128
Figura 4.24	Propiedades de la terracería	129
Figura 4.25	Granulometría de la terracería.....	129
Figura 4.26	Ventana sobre el agrietamiento termal.....	129
Figura 4.27	Ejes sencillos equivalentes.....	134

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1	Agrietamiento longitudinal (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por precipitación	44
Tabla 2.2	Agrietamiento en cocodrilo (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por precipitación	44
Tabla 2.3	Rugosidad (iri) (mm/m) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por precipitación	46
Tabla 2.4	Deformaciones permanentes (roderas) (cm) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por precipitación	48
Tabla 2.5	Agrietamiento longitudinal (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por temperatura	53
Tabla 2.6	Agrietamiento en cocodrilo (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por temperatura	53
Tabla 2.7	Rugosidad (iri) (mm/m) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por temperatura	54
Tabla 2.8	Deformaciones permanentes (roderas) (cm) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por temperatura	57
Tabla 2.9	Agrietamiento longitudinal (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por velocidad del viento	62
Tabla 2.10	Agrietamiento de cocodrilo (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por velocidad del viento	62
Tabla 2.11	Rugosidad (iri) (mm/m) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por velocidad del viento	64
Tabla 2.12	Deformaciones permanentes (roderas) (cm) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por velocidad del viento	66
Tabla 2.13	Agrietamiento longitudinal (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por nubosidad	71
Tabla 2.14	Agrietamiento de cocodrilo (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por nubosidad	72
Tabla 2.15	Rugosidad (iri) (mm/m) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por nubosidad ...	74
Tabla 2.16	Deformaciones permanentes (roderas) (cm) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por nubosidad	76
Tabla 2.17	Agrietamiento longitudinal (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por humedad relativa	80
Tabla 2.18	Agrietamiento de cocodrilo (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por humedad relativa	80

Tabla 2.19	Rugosidad (iri) (mm/m) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por humedad relativa.....	82
Tabla 2.20	Deformaciones permanentes (roderas) (cm) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por humedad relativa.....	83

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1	Estaciones convencionales a lo largo de la república Mexicana	91
Tabla 3.2	Estaciones Meteorológicas Automatizadas	92
Tabla 3.3	Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automatizadas	94
Tabla 3.4	Formato de archivo climático de una Estación Meteorológica Automatizada la cuál no contiene unidades dentro de la misma	97
Tabla 3.5	Formato de archivo climático de una Estación Meteorológica Automatizada la cuál contiene las unidades dentro de una fila en la misma	97
Tabla 3.6	Formato de archivo climático de una Estación Meteorológica Automatizada la cuál no contiene unidades he incluye el formato de fecha diferente.....	98
Tabla 3.7	Formato de archivo climático de una Estación Meteorológica Automatizada la cuál no contiene unidades he incluye la localidad en los datos dentro de la misma	98
Tabla 3.8	Formato de archivo climático de una Estación Meteorológica Automatizada con los datos en formato juliano.....	99
Tabla 3.9	Formato de datos climático dentro de la pestaña cálculo	103
Tabla 3.10	Formato de datos en la pestaña resumen desfases	105

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1	Clasificación vehicular AASHTO contra SCT.....	115
Tabla 4.2	Formato en que se tienen los espectros de carga actualmente en México	119
Tabla 4.3	Distribución vehicular utilizado en el DISPAV-5.....	131
Tabla 4.4	Características estructurales de diseño DISPAV-5 en el corredor México-Nogales en el km 89.1	131
Tabla 4.5	Comparativa de tránsito previsible contra tránsito de proyecto en el Dispav-5	132
Tabla 4.6	Características estructurales de diseño AASHTO '93 en el corredor México-Nogales en el km 89.1	134
Tabla 4.7	Espesores estructurales para la ciudad de México.....	135
Tabla 4.8	Resumen de confiabilidad de la ciudad de México	136
Tabla 4.9	Espesores de la estructura en la ciudad de Zacatecas	137
Tabla 4.10	Resumen de confiabilidad de la ciudad de Zacatecas	137
Tabla 4.11	Espesores de la estructura en la ciudad de Mérida	138
Tabla 4.12	Resumen de confiabilidad de la ciudad de Mérida.....	138

A mi Mamá!

Agradezco a Mamá por sus noches de desvelo, creer en mi todo el tiempo, apoyarme, orientarme cuando a sido necesario, ser fuente de inspiración y motivo para seguir adelante, gracias a ella he podido realizar este sueño.

A mis hermanos Lizeth y Gustavo por su cariño y confianza en momentos que los he necesitado.

A mis tíos y abuelos ya que han sido parte importante en mi formación con su ejemplo, pláticas y concejos a lo largo de mi vida.

A mi asesor de tesis el Dr. Jorge Alarcón Ibarra por sus pláticas y apoyo, además de darme la oportunidad de desarrollar este trabajo con el, así como el tiempo dedicado e interés mostrado en el mismo.

A mis amigos que se han hecho parte de mi familia, con los cuales he pasado momentos y experiencias maravillosas.

A Anahí por su comprensión y apoyo durante este tiempo juntos y la elaboración de este proyecto.

Finalmente al Dr. Paul Garnica por permitirme realizar mi estancia en el Instituto Mexicano del Transporte y al M. en I. Roberto Hernández por su ayuda en el trabajo.

RESUMEN

El análisis de estructuras por medios mecanicistas no es algo que se halla pensado apenas para la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico – Mecanicista, ya que desde finales de los 80's se tenía pensado desarrollar metodologías de diseño con estas características pero en aquel entonces la mayoría de los usuarios no contaban con el poder de cómputo con el que se cuenta ahora en las computadoras personales. Debido a esto fue que se decidió hasta 1996 en el taller realizado en Irvine, California, comenzar a desarrollar la Guía de Diseño de Pavimentos E-M, a la cual se le realizaron diversas implementaciones mayores como lo son el análisis del tránsito vehicular mediante espectros de carga y la implementación del factor climático como variable de diseño dentro del programa Enhanced Integrated Climate Model (EICM), el cuál quedó integrado en la Guía de Diseño de Pavimentos E-M.

El EICM se encarga de modelar el comportamiento de 5 variables climáticas como son, precipitación, temperatura, velocidad del viento, nubosidad y humedad relativa en el transcurso del periodo de diseño de la estructura, con las cuales predice diversos parámetros como pueden ser los perfiles de humedad, temperatura, la presión de poro, el empuje por deshielo en la estructura, etc. Pero para lo cual requiere datos históricos de las variables mencionadas con una frecuencia de una hora durante un periodo mínimo de 24 meses.

Debido a lo anterior se decidió realizar el análisis de sensibilidad de EICM para las diferentes variables climáticas y su impacto sobre diferentes parámetros de deterioro como lo son, agrietamiento longitudinal, agrietamiento en piel de cocodrilo, IRI, roderas o deformaciones permanentes y módulos en la carpeta. El análisis de sensibilidad se realizó con el tipo de datos que tenemos en las estaciones climáticas convencionales, para así entender el comportamiento del EICM con dichos datos y si se podrían emplear en análisis futuros.

Además del análisis de sensibilidad se realizó la adaptación de los valores climáticos de las Estaciones Meteorológicas Automatizadas (EMA's) que maneja el Sistema Meteorológico Nacional ya que estas nos proporcionan todos los parámetros que el EICM necesita para su correcto funcionamiento.

Con los datos que nos proporcionan las EMA's y con su respectiva adaptación se realizaron análisis en tres regiones climáticas diferentes con la Guía de Diseño de Pavimentos E-M, para así de esta forma apreciar las variaciones que se pueden presentar en los espesores de una estructura en algunas de las diferentes regiones climáticas que se presentan en la república mexicana, ya que las únicas variaciones que se presentaron en los análisis fue la región climática y el espesor de las diferentes capas de la estructura. Además de lo anterior se realizaron diseños con el método de diseño de estructuras de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM (DISPAV-5) y el método de Diseño de Pavimentos AASHTO en su versión del 1993, esto para poder apreciar las variaciones que se presentan en los espesores de las diferentes metodologías.

Debido al estudio realizado con la información obtenida en este trabajo podemos decir que en México se cuenta con los datos que requiere el EICM para su funcionamiento, pero en otros parámetros de entrada se necesita realizar un poco mas de trabajo para tenerlos como se necesitan, además de realizar la calibración de algunos modelos de diseño que utiliza la Guía de Diseño de Pavimentos E-M para su correcta implementación en México.

ABSTRACT

The structural analysis by the mechanist way is not something that had thought only for Mechanical – Empirical Pavement Design Guide, because since the final 80's had thought develop some design methodology with this features, but in these days most of the users did not have computer power which we have on this days on the personal computers. Because of this in 1996, on the workshop that was celebrated in Irvine, California, it was decided begin to develop the Mechanical – Empirical Pavement Design Guide. This guide has several mayor implementations like the weight-in-motion transit analysis and the addition of the weather as a design input in the Enhanced Integrated Climatic Model (EICM).

The EICM is responsible of model the weather inputs trough time. This weather inputs are: precipitation, temperature, wind speed, sunshine and moisture. With this inputs the EICM makes a prediction of several parameters as moisture and temperature profiles, frost heave and thaw settlement, etc. The EICM required historic data of the input forementioned with an hour periodicity for at least 24 months.

Due the previous it was decided to realized a sensibility analysis of the EICM for the different inputs and it's impact onto different deterioration parameters as longitudinal cracking, crocodile cracking, IRI, permanent deformation and asphalt modulus. The sensibility analysis was realize with the kind of data that we have in Mexico in conventional weather stations, so

we can understand a little the EICM behavior with this data and if we can use it on future analysis.

Moreover the sensibility analysis it was realized the adaptation of the climatic data of the Automatically weather stations (EMA's) of the Sistema Meteorológico Nacional because it's has all the parameters, which the EICM needs.

Which the EMA's data and its adaptations we made analysis in three different climatic regions with the Mechanical – Empirical Pavement Design Guide, for this way we can appreciate variations that may occur in the structural thickness in some of the different climatic regions that the Mexican republic have. The variations that we made in the different analysis were the climatic region and the thickness in the different layers of the structure. Also, we realized designs with the design method of asphalt pavement structures, including roads with high specifications of the Engineering Institute of UNAM and the design pavement method AASHTO in its version of 1993, this we made to appreciate variations in the thickness of the different methods.

Due the information that we get with the realized work, we can mention that in Mexico we have the input data, which the EICM need, but in other input parameters we have to work a little bit more to get it like the Mechanical – Empirical Pavement Design Guide needs. Besides we have to calibrate some design models that the guide use, this for its correct implementation in Mexico.

Antecedentes y Objetivos

Antecedentes

Los caminos pavimentados que se utilizan actualmente contemplaron para su diseño variables como la cantidad de tráfico que pasa por la vía, características del terreno, así como de los materiales que se utilizaron para su construcción. De esta forma se encuentran diseñados los aproximadamente 360,075 km que componen la estructura de caminos del país, los cuales atraviesan regiones que tienen una variedad de climas importantes a lo largo de 1'972,550 km² que corresponden al territorio nacional.

Sin embargo, las metodologías de diseño que se han utilizado no contemplan suficientemente las condiciones climáticas del sitio donde se construirá la estructura, llevándonos a diseñar prácticamente de la misma manera para todas las regiones. Si a esto le agregamos el crecimiento exorbitante que se ha tenido en el transporte, tanto en número como en el peso del vehículo, nos ha llevado a que las estructuras carreteras con las que se cuenta no sean capaces de soportar las demandas para la vida de proyecto.

El diseño de pavimentos flexibles en México se ha basado en varias metodologías, entre las principales tenemos la desarrollada por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) la cuál se conoce, en su versión de 1999, como el programa DISPAV-5, la otra es la generada por la American Association of State Highway and

Transportation Officials (AASHTO) en su versión de 1993. Ninguno de los métodos anteriores contempla el clima detalladamente como variable de diseño.

El DISPAV-5 surge a través de análisis experimentales en tramos de prueba, tanto de carreteras en servicio, de investigaciones teóricas y de experimentos de laboratorio en la pista circular de pruebas. El trabajo de años de investigación del Instituto de Ingeniería de la UNAM se encuentra en la publicación No. 444 de dicha institución que data de 1981.

El Método AASHTO en su versión actual, la cuál data del año 1993, está basada principalmente en las ecuaciones y resultados obtenidos originalmente en el tramo de prueba que fue llevado a cabo en el año de 1961, en Ottawa, Illinois. El método con el que se cuenta actualmente ha sido modificado respecto a lo que era el original, esto para incluir ciertos factores que no habían sido considerados, esto es producto de la experiencia adquirida por dicho organismo entre su versión original y la actual, además de la experiencia de otras dependencias y consultores independientes.

La nueva guía de diseño de pavimentos la cuál inicio bajo el proyecto 1-37 A desarrollada por la NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) en tarea conjunta de cooperación con la FHWA (Federal Highway Administration) y AASHTO, lleva varios años de desarrollo hasta llegar a la guía de diseño de pavimentos MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) que se completó en agosto del 2009. Dicha versión ya se encuentra en sus últimas pruebas antes de salir como versión final en septiembre del año 2011, bajo el nombre de DARWin ME.

La Guía MEPDG tiene como base la guía AASTHO Guide for Design of Pavement Structures, la cual está basada en las ecuaciones empíricas obtenidas de los ensayos realizados en los tramos de prueba en Ottawa, Illinois. Dada la necesidad de incluir métodos mecanicistas en el diseño de pavimentos ya que las metodologías anteriores presentaban ciertas limitaciones en cuanto al diseño y conservación de las estructuras carreteras, en marzo de 1996 se llevó

a cabo el taller en Irvine, California, para desarrollar y sentar las bases para mejorar dicha guía.

La guía MEPDG inició bajo el proyecto 1-37 A desarrollada por la NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) en tarea conjunta de cooperación con la FHWA (Federal Highway Administration) y AASHTO. Los derechos intelectuales de la MEPDG fueron transferidos de la NCHRP hacia AASHTO en diciembre del 2007, para así en febrero del 2009 empezar a denominarse DARWin ME. Dicha guía incluye ciertas mejoras mayores al diseño de pavimentos, pero de las cuales en este trabajo nos centraremos en la inclusión del efecto climático, el cuál se incorpora en el modelo climático integral mejorado, EICM por sus siglas en inglés (Enhanced Integrated Climatic Model), este modelo incorpora a los diseños de pavimentos los datos climáticos de: precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, esto como principales datos, de los cuales también incorpora la hora de salida y puesta del sol, las cuales son obtenidas a partir de las coordenadas geográficas.

La versión original de EICM data de 1989 y fue desarrollada por la FHWA en el Instituto del Transporte en Texas A&M University, aquella versión era conocida como Integrated Climatic Model (ICM), la cuál tubo futuras implementaciones en 1999 dando como resultado la versión actual. El EICM predice la siguiente información en toda la estructura del pavimento: temperatura, módulo resiliente, presión de poro, contenido de agua, congelamiento y deshielo.

Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es obtener un conocimiento claro correspondiente a la sección de efectos climáticos que incorpora la Guía MEPDG, así como la adaptación de los datos climáticos con los que contamos en México para que se pueda alimentar el EICM y de esta forma poder implementar la Guía de una manera mas precisa para las condiciones climatológicas con las que se cuentan en el país.

Para lograr lo anterior se prevén los siguientes objetivos particulares:

- Analizar la forma en que es alimentado el EICM, así como sus principales factores climáticos.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los principales factores climáticos, para de esta forma entender cuál es el impacto que tienen dentro de la modelación del pavimento.
- Obtener los datos climáticos con los cuales contamos en México, además de analizar de que forma se están tomando para así ver como se podrían implementar en el EICM.
- Elaborar un programa o metodología para la adaptación de los datos climáticos disponibles en el país hacia el formato que requiere el EICM.
- Llevar a cabo una comparativa entre los espesores que nos proporcionan las dos metodologías que se han venido empleando en la república mexicana junto al desempeño predicho en la Guía de Diseño de Pavimentos E-M para tres regiones climáticas diferentes en México.
- Entender y el general una explicación del funcionamiento de la Guía de Diseño de Pavimentos E-M, de forma que nuevos usuarios la puedan entender.

CAPÍTULO

1

GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EMPÍRICO - MECANICISTA

1.1. INTRODUCCIÓN

La guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista 2002, ha sido desarrollada por Applied Research Associates (ARA) a través de la contratación de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Joint Task Force on Pavements (JTfP) bajo el proyecto 1-37 A de la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), el cuál es administrado por la Transportation Research Board of the National Research Council. El proyecto ha sido patrocinado por AASHTO en cooperación con la Federal Highway Administration (FHWA) (Quintero , 2007).

La Mechanical Empirical Pavement Design Guide 2002 (MEPDG 2002), se desarrolla debido a que las guías de diseño de pavimentos se basan en resultados empíricos, esto aunado a que los métodos de diseño utilizados actualmente provienen de las ecuaciones de diseño derivadas de los estudios realizados en el tramos de prueba de la AASHO entre los años de 1958 a 1961, con limitadas secciones estructurales debido a una sola localidad, Ottawa,

Illinois, además de tener condiciones de tráfico muy modestas comparadas con las que hay a la fecha, ya que estas se han visto rebasadas por las condiciones de trabajo actuales asociado al incrementado considerable de las cargas que transitan por los caminos pavimentados (Sharpe, 2004).

El diseño a través de métodos mecanicistas surge debido a que se reconocieron las limitaciones de la actual guía de diseño de pavimentos en su versión 1993. En el taller que se llevó a cabo del 24 al 26 de marzo de 1996 en Irvin, California, se sentaron las bases para mejorar la guía de diseño. El proyecto 1-37 A bajo la NCHRP, el cuál ha sido el más grande en los 40 años de historia del programa. Este nuevo proyecto reunió a expertos de diversas áreas, algunas de las especializaciones fueron: cargas de tráfico, caracterización de materiales, desempeño de pavimentos, medio ambiente entre otros, esto para ayudar a determinar la tecnología que se acoplará de mejor manera a la nueva guía de diseño (Huang, 2004).

La Guía de diseño de pavimentos E-M (Empírico-Mecanicista) cambiara la forma en que los pavimentos son diseñados, remplazando las tradicionales ecuaciones de diseño propuestas en la actual guía de diseño de pavimentos (AASHTO, 1993) por principios empírico-mecanicistas. Por este planteamiento el modelo mecanicista es utilizado para estimar la compresión y tensión dentro de la estructura del pavimento. En un principio la principal ventaja de utilizar un modelo empírico-mecanicista era que se percibía la posibilidad de extrapolar resultados fuera de los rangos de datos por los cuales fuera originalmente calibrado. Esta es una importante limitación para los métodos empíricos, los cuales se pueden aplicar con confiabilidad solamente para valores dentro de los rangos para los cuales fueron desarrollados.

La idea de diseñar mediante procesos basados en principios empírico-mecanicistas surgió durante el desarrollo de la guía AASHTO 1986, sin embargo en aquel entonces no era práctico desarrollar dicha metodología ya que la mayoría de los usuarios no tendrían acceso

al poder de computo requerido para realizar dicho análisis, como con el que la mayoría de los usuarios cuentan hoy en día en la mayoría de las computadoras portátiles. (ARA,2004)

La Guía de diseño de pavimentos E-M incorpora varias modificaciones en cuanto a su uso, empezando con la principal, la Guía no es una herramienta de diseño que nos proporcione espesores de la estructura como se venía realizando en las anteriores metodologías, ahora es una herramienta de análisis del pavimento que nos proporciona una predicción del desempeño de la estructura a lo largo del periodo de diseño. Además incorpora el uso de un programa (software) el cuál realiza el análisis del diseño que nosotros hemos previsto.

La Guía de diseño de pavimentos E-M utiliza para el análisis las siguientes condiciones de entrada:

- Tránsito.
- Condiciones ambientales.
- Propiedades de los materiales.
- Otros.

1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA GUÍA

Debido a que la Guía de diseño de pavimentos E-M es una herramienta de análisis, nos permite una interacción entre propiedades de los materiales, tráfico, condiciones ambientales y geometría del proyecto. En la figura 1.1 se muestra el proceso que se debe seguir para el análisis, ya que el espesor de las capas de la estructura es obtenido mediante un proceso iterativo en donde el desempeño predicho es comparado con los criterios de diseño de los diferentes parámetros de desempeño (roderas, agrietamiento, rugosidad en pavimentos flexibles, etc.).

Diversas son las variables que son requeridas para el proceso de análisis en la Guía de diseño de pavimentos E-M, en las cuales en este trabajo nos centraremos en las ambientales

(temperatura, precipitación, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa, etc.) y propiedades de los materiales. Además el proceso emplea un nivel jerárquico, en donde se pueden seleccionar entre tres nivel de análisis de acuerdo a la confiabilidad de la información, los recursos disponibles para realizar el proyecto y la importancia del mismo. Los tres niveles son los siguientes:

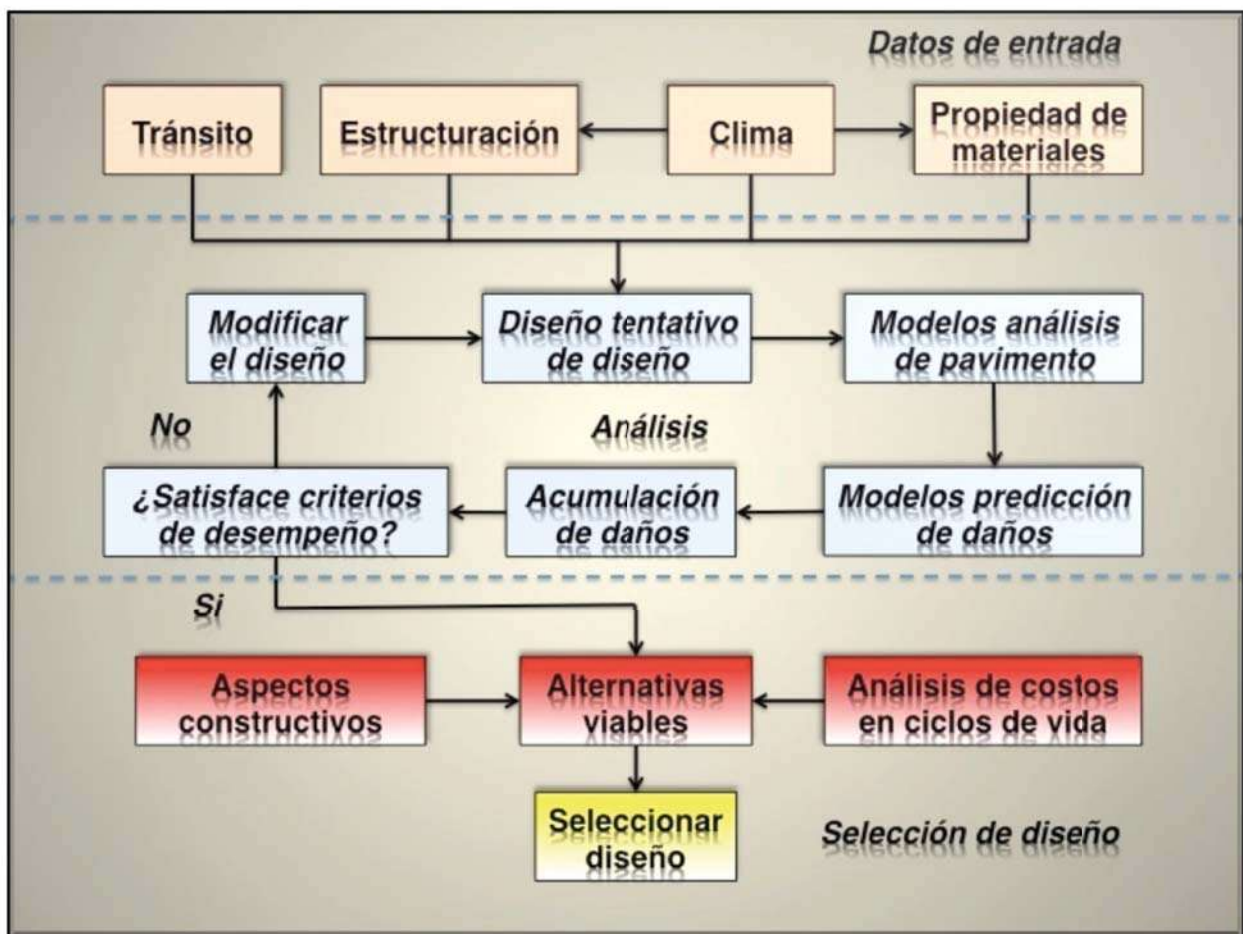


Figura 1.1 Proceso de análisis en la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista (Fuente: Elaboración propia con base en Sánchez Sabogal, 2010).

- **Nivel 1**, la información proviene de un alto nivel de precisión en la veracidad de los datos. El nivel 1 se utilizará comúnmente para pavimentos con una carga de tráfico muy alta, o cuando puede haber serias consecuencias sobre seguridad y economía debido a la falla. El módulo resiliente obtenido por pruebas triaxiales en el laboratorio es un ejemplo del nivel 1.

- **Nivel 2**, los datos provén un nivel intermedio cuando su grado de veracidad es cercano al que se utiliza en la guía de diseño AASHTO 1993. Este nivel puede ser utilizado cuando los recursos o equipos de prueba no se encuentran disponibles para realizar el nivel 1. Los datos del nivel 2 se derivaran de un limitado programa de pruebas, estimados debido a correlación o experiencia. El módulo resiliente obtenido por la correlación medida con la prueba del valor de soporte de California CBR es un ejemplo del nivel 2.

- **Nivel 3**, los datos provén el menor grado de exactitud. Este nivel deberá usarse en los casos de que haya consecuencias bajas debido a una falla temprana (caminos de bajo volumen de tránsito). Los valores de materiales incluidos por defecto que están basados en experiencia local son datos de nivel 3. El valor por defecto del módulo resiliente basado en la clasificación de suelos de AASHTO es un ejemplo de nivel 3.

La Guía de diseño de pavimentos E-M incorpora una mezcla de datos de los diferentes niveles, sin embargo el algoritmo usado en el análisis es el mismo sin importar el nivel que se este empleando.

El tráfico es ingresado basado en la metodología de espectro de carga, dejando de lado el concepto de ejes equivalentes (ESAL's) que se venían utilizando en la mayoría de las metodologías de diseño, incluyendo todas las guías de diseño AASHTO. El espectro de carga es la frecuencia sobre la distribución de los ejes de carga debido a su magnitud, por su

configuración (Simple, tandem, tridem, quad), y a través del tiempo (mensualmente, por lo general).

La Guía de diseño de pavimentos E-M agrega el modelo climático integral mejorado, EICM por sus siglas en inglés (Enhanced Integrated Climatic Model), debido a que es el encargado de elaborar los perfiles de humedad y de temperatura.

1.3. CONDICIONES DE ENTRADA

1.3.1. TRÁNSITO

Las características del tránsito vehicular son esenciales para el análisis y diseño de pavimentos. La mayoría de los métodos de diseño existentes al momento, incluidas todas las guías de diseño de la AASHTO, cuantifican el tráfico en términos de ejes equivalentes (ESAL's), los cuales representan el tránsito acumulado en ejes sencillos de 8.2 ton (18,000 lbs) en el carril de proyecto. Mientras tanto la metodología aplicada en la Guía de diseño de pavimentos E-M requiere de la especificación de la magnitud y de la frecuencia de las cargas que se espera que pasen por el pavimento durante su periodo de diseño, esto es lo que se conoce como espectros de carga.

A continuación se enlistan los datos de tránsito vehicular requeridos por la Guía de Diseño de Pavimentos E-M:

- i) Información del volumen de tránsito base.
 - a) Tránsito promedio anual en las dos direcciones de camiones de carga.
 - b) Número de carriles en la dirección de diseño.
 - c) Porcentaje de camiones en la dirección de diseño.
 - d) Porcentaje de camiones en el carril de diseño.
 - e) Velocidad de operación de vehículos de carga.

ii) Factores de ajuste del volumen de tránsito.

- a) Ajuste mensual.
- b) Distribución por clase de vehículo.
- c) Distribución horaria de los camiones.
- d) Factor de crecimiento del tránsito.

iii) Factores de distribución de los ejes de carga por temporada, tipo de vehículo y tipo de eje.

iv) Características generales de entrada del tránsito.

1.3.2. EFECTOS AMBIENTALES

El efecto del medio ambiente se incorpora en el modelo climático integral mejorado, EICM por sus siglas en inglés (Enhanced Integrated Climatic Model), este modelo incorpora en el análisis del pavimento los datos climáticos de: precipitación, temperatura, nubosidad, humedad relativa, velocidad del viento, esto como principales datos, de los cuales también incorpora la hora de salida y puesta del sol, las cuales son obtenidas a partir de las coordenadas geográficas.

El EICM realiza análisis mecanicistas en una dimensión del calor y el flujo de humedad, esto simula los cambios en el comportamiento y características del pavimento y capas de material inducidos por los factores climáticos. La versión original data de 1989 y fue desarrollada por la FHWA en el Instituto del Transporte de la Texas A&M University, aquella versión era conocida como Integrated Climatic Model (ICM), la cual tuvo futuras implementaciones en 1999 dando como resultado la versión actual. El EICM predice la siguiente información en toda la estructura del pavimento: temperatura, módulo resiliente, presión de poro, contenido de agua, congelamiento y deshielo (Quintero , 2007).

El EICM se incorpora debido a que las condiciones climáticas tienen un efecto importante en el desempeño de pavimentos flexibles y rígidos. Factores externos como precipitación, temperatura, ciclos de congelamiento/deshielo y profundidad del nivel freático juegan un papel importante para definir el impacto del medio ambiente en el desempeño del pavimento. Factores internos como la susceptibilidad de los materiales del pavimento a la humedad y al daño por deshielo, drenaje de las capas del pavimento y la infiltración definen como reaccionara un pavimento a las condiciones climáticas externas.

El efecto climático lo estudiamos con especial interés ya que las bases de datos climáticas que se encuentran en la guía están desarrolladas de manera exclusiva para los Estados Unidos de América. Esta base climática proviene de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) con valores de 850 estaciones con datos aproximadamente de 10 años tomados de forma horaria (fig. 1.2). Esto nos lleva a tener ciertas dificultades al querer utilizar la guía de diseño fuera de los EUA, en este caso utilizarla en México, ya que nosotros no contamos con una base de estaciones climática tan extensa con los datos que necesita el EICM (133 estaciones meteorológicas automatizadas y 30 estaciones sinópticas meteorológicas automáticas, ambas administradas por la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (figura 1.3)); pero también contamos con estaciones que toman datos climáticos diarios de casi todos los principales factores en el caso de requerir estaciones adicionales, pero con menor grado de veracidad en las valores.

A continuación se listan los datos requeridos por el EICM la Guía de diseño de pavimentos E-M:

i) Información general.

- a) Fecha de término de la construcción de base y sub-base.
- b) Fecha de construcción del pavimento.
- c) Fecha de apertura al tránsito.

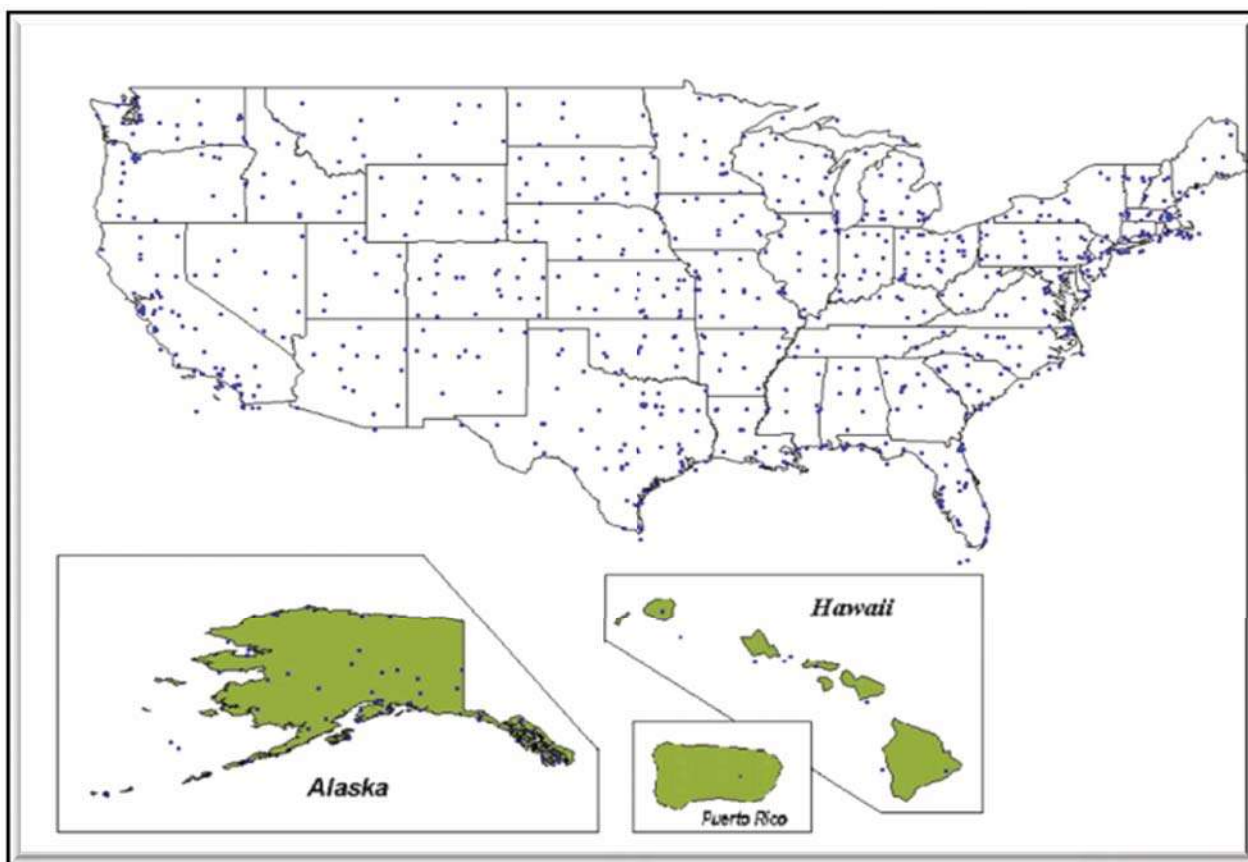


Figura 1.2 Estaciones climáticas de los Estados Unidos con las que cuenta la base de datos del EICM (Fuente: Obtenida en la página web, <http://www.weather.gov/climate/index.php?wfo=oun>).

ii) Información relacionada con el clima.

- a) Temperatura.
- b) Precipitación.
- c) Velocidad del viento.
- d) Temperatura.
- e) Precipitación.
- f) Velocidad del viento.
- g) Nubosidad.
- h) Humedad relativa.

iii) Información relacionada con el nivel freático.

a) Profundidad del nivel freático.

iv) Propiedades de drenaje y de la superficie.

a) Absorción de la superficie.

b) Infiltración.

c) Longitud de la trayectoria de drenaje.

d) Pendiente transversal.

v) Material del pavimento.

a) Cemento asfáltico y cemento hidráulico.

Para el análisis de dentro de la Guía de diseño de pavimentos E-M el EICM evalúa las siguientes características debido al efecto climático. (Quintero , 2007)

En pavimentos flexibles:

- Cambios en el contenido de humedad debido al cambio de estaciones, para toda las sub-capas y los materiales no ligados.
- Cambios en el módulo resiliente, M_r , de todas las sub-capas y materiales no ligados debido al cambio en el contenido de humedad del suelo.
- Cambios en el M_r debido al congelamiento, deshielo y recuperación de las condiciones de congelamiento.
- Distribución de la temperatura en las capas ligadas de concreto asfáltico.

En pavimentos rígidos:

- Perfiles de temperatura en las losas de concreto (para la predicción del alabeo por calor).
- Valores promedio de humedad relativa (estimación del alabeo por humedad en las losas de concreto).



Figura 1.3 Estaciones climáticas automatizadas y estaciones sinópticas administradas por el Servicio Meteorológico Nacional (Fuente: Elaboración propia con base en <http://smn.cna.gob.mx/emas/>).

1.3.3. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Las propiedades de los materiales requeridas para calcular la respuesta estructural del pavimento sobre la tensión y contracción del mismo, se podrían agrupar por tipo, como se describe a continuación:

- i) Concreto asfáltico.
 - a) Espesor de la capa.
 - b) Módulo dinámico.
 - c) Propiedades del asfalto.
 - d) Módulo de Poisson.

e) Propiedades del agrietamiento térmico.

ii) Concreto hidráulico.

- a) Espesores de la capa.
- b) Propiedades de la mezcla.
- c) Características de la contracción.
- d) Resistencia a la compresión.
- e) Módulo elástico.
- f) Módulo de ruptura.
- g) Coeficiente de expansión térmica.

iii) Materiales no ligados de la estructura.

- a) Tipo de materiales.
- b) Espesor de las capas.
- c) Unidad de peso.
- d) Coeficiente de presión lateral de la tierra.
- e) Módulo resiliente.
- f) Módulo de Poisson.

1.3.4. OTROS

Además de los parámetros mencionados con anterioridad se requieren una variedad de datos de entrada para el análisis de pavimentos con la Guía de diseño de pavimentos E-M. Algunos de estos datos dependen por el tipo de pavimento (flexible o rígido), asimismo del tipo de construcción (nuevo o rehabilitación).

CAPÍTULO

2

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES AMBIENTALES DEL MODELO EICM

2.1 Introducción

 El efecto que tiene el medio ambiente sobre las estructuras del pavimento se decide incorporar en la Guía de Diseño de Pavimentos E-M (Empírico – Mecanicista) en el Enhanced Integrated Climatic Model (EICM). Esto se decide hacer debido a que no se podía seguir dejando de lado el impacto que tiene el factor climático en el desempeño de la vida útil sobre los pavimentos que se llegan a diseñar.

El EICM realiza análisis mecanicistas en función del calor y el flujo de humedad, esto simula los cambios en el comportamiento y características del pavimento y capas de material inducidos por los factores climáticos. El desarrollo del EICM empezó en los años 60's cuando el Climatic/Materials/Structures (CMS) fue programado en la universidad de Illinois. La

primera versión del modelo actual data de 1989 y esta fue desarrollada por la FHWA en el Instituto del Transporte de la Universidad Texas A&M, aquella versión era conocida como Integrated Climatic Model (ICM), la cual combinaba el CMS con el modelo de infiltración y drenaje (Infiltration and Drainage Model, IDM), el modelo de ajuste debido a los esfuerzos por deshielo desarrollado por el Laboratorio de Ingeniería en Investigaciones Sobre Regiones Frías (Cold Regions Research and the Engineering Laboratory ,CRREL) la cual es una dependencia de la Armada de los Estados Unidos de América y el modelo de precipitación (Rainfall Precipitation Model, PRECIP). Finalmente fue agregado el modelo del flujo de humedad en materiales no saturados (Unsaturated Moisture Flow Model) de la Universidad del Estado de Arizona (ASU), así como el índice de humedad de Thornthwaite para calcular las condiciones de humedad en contacto con la capa de base. Con todos estos antecedentes, la versión final del EICM (3.2) fue desarrollada con la colaboración de la Universidad de Illinois y la Applied Research Associates (ARA). (Quintero , 2007)

El EICM calcula los contenidos de humedad, temperatura, presión de poro y el empuje por deshielo en la estructura. El modelo CMS incorpora datos climáticos para calcular el flujo de calor bajo las condiciones de contacto (superficie del pavimento) y la temperatura a través del pavimento. El modelo del PRECIP es utilizado para simular los patrones de precipitación con los datos climáticos. El modelo de ajuste debido a los esfuerzos por deshielo del CRREL es un modelo en una dimensión que integra el flujo de calor y de humedad en los suelos. Todos los diferentes modelos intercambian información para desarrollar nuevos cálculos.

El EICM se incorpora debido a que las condiciones climáticas tienen un efecto importante en el desempeño de los pavimentos flexibles y rígidos. Factores externos como precipitación, temperatura, ciclos de congelamiento y profundidad del nivel freático juegan un papel importante para definir el impacto del medio ambiente en el desempeño del pavimento. Factores internos como la susceptibilidad de los materiales del pavimento a la humedad y al daño por deshielo, drenaje de las capas del pavimento y la infiltración definen como reaccionará un pavimento a las condiciones climáticas externas.

El efecto climático lo estudiamos con especial interés ya que las bases de datos climáticas que se encuentran en la guía están desarrolladas de manera exclusiva para los Estados Unidos de América. La base de datos contiene información aproximadamente de los últimos 10 años proveyendo datos de manera horaria de unas 850 estaciones meteorológicas. Esta base de datos climática proviene de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Esto nos lleva a tener ciertas dificultades al querer utilizar la guía de diseño fuera de los EUA, tal como sucede en este caso al querer utilizarla en México, ya que no poseemos una base de estaciones climática tan extensa con los datos que necesita el EICM (en el país contamos con 133 estaciones meteorológicas automatizadas y 30 estaciones sinópticas meteorológicas automáticas, administradas por la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional); pero también contamos con estaciones que toman datos climáticos diarios de casi todos los factores principales en el caso de requerir estaciones adicionales.

2.2. Descripción del análisis

El análisis se realizó explorando la sensibilidad de los cinco datos ambientales que utiliza el EICM en los principales indicadores de deterioro resultantes que predice la Guía de Diseño de Pavimentos E-M en cuanto al análisis de pavimentos flexibles se refiere, los cuales son, agrietamientos (longitudinales y de cocodrilo), IRI, Módulos (en la estructura del pavimento y la carpeta), así como roderas (en la estructura del pavimento y la carpeta).

Esto se realizó cambiando los datos de las variables ambientales para de esta forma observar el comportamiento que tenían al final del análisis los diferentes indicadores de deterioro, es decir, para una variable de alguna estación climatológica norteamericana, que contiene datos horarios, cuál sería la influencia en el resultado del análisis de esa variable al asumirla como si solo se tomara un dato diario, ya que es la forma en que las estaciones climáticas convencionales recaudan la información y este tipo de estaciones son las más extensas en el territorio nacional.

Este análisis de sensibilidad se realizó para seis estaciones climáticas, mismas que tienen condiciones diferentes dentro de los Estados Unidos; estas estaciones se tomaron en diferentes estados, en las siguientes ciudades: Birmingham, Alabama; Miami, Florida; El Paso, Texas; Phoenix, Arizona; Portland, Oregón; y Seattle, Washington. Las estaciones dentro de las ciudades anteriores se consideraron debido a que “representan” de cierta forma algunos climas que tenemos en la mayor parte del territorio mexicano, como lo son, clima templado-lluvioso, seco y cálido-húmedo, así se pudo observar cómo sería el comportamiento de un diseño en la Guía de Diseño de Pavimentos E-M con datos climáticos que tienen una similitud de cierta forma a los que encontramos en las estaciones climáticas convencionales en México.

2.3. Formato de los archivos del EICM

EL EICM utiliza una serie de archivos para la modelación de los perfiles de temperatura y de humedad en la carpeta. El formato de los archivos se describe a continuación.

2.3.1. Archivo hourly climatic data (hcd)

Este es el primer archivo con datos ambientales que utiliza el EICM, es una base de datos climáticos de manera horaria, esta base se encuentra dividida por estaciones climáticas. La base de datos se encuentra estructurada en el siguiente orden: Fecha, temperatura, velocidad del viento, porcentaje de radiación solar, precipitación y humedad relativa. A continuación se muestra un ejemplo de estructuración del archivo hcd, el cuál corresponde al primero de junio de 1997.

AAAAMDDHH, Temperatura (F), Velocidad del viento (mph), Nubosidad (%), Precipitación (in), Humedad relativa (%).

1997060100,57.9,9,0,0.2,97
1997060101,57.9,9,0,0.35,97
1997060102,57.9,5,0,0.18,100
1997060103,59,9,0,0.06,93
1997060104,59,10,0,0.05,93
1997060105,59,12,0,0.07,96
1997060106,59,12,0,0.07,96
1997060107,60.1,9,0,0.03,96
1997060108,61,9,0,0.03,97
1997060109,62.1,9,0,0.06,96
1997060110,63,5,0,0,97
1997060111,64,4,0,0.01,96
1997060112,64.9,3,0,0.04,97
1997060113,68,0,0,0,90
1997060114,69.1,0,0,0,87
1997060115,69.1,0,0,0,84
1997060116,69.1,0,0,0,84
1997060117,69.1,0,0,0,78
1997060118,66.9,0,25,0,87
1997060119,64.9,4,100,0,97
1997060120,64,0,100,0,100
1997060121,62.1,0,50,0,100
1997060122,60.1,3,0,0,100
1997060123,62.1,0,0,0,100

2.3.2. Archivo icm (*.icm)

El archivo icm es generado a partir de la base de datos horaria y contiene toda la información que se necesita para que pueda trabajar numéricamente el EICM. Los datos que se encuentran en el archivo son los siguientes:

-Fecha de inicio – fecha de terminación, es el periodo de años entre los cuales se tienen datos.

-Longitud, latitud, elevación, profundidad del nivel freático anual (-1 si se utiliza por estaciones), profundidad del nivel freático en primavera, profundidad del nivel freático en verano, profundidad del nivel freático en otoño, profundidad del nivel freático en invierno, temperatura promedio anual, días de congelamiento, lluvia anual, promedio de humedad mensual (12 meses, iniciando en enero).

-Mes, día, año, horas con sol, atardecer, radiación solar máxima diaria, salida y puesta del sol calculada a partir de latitud y longitud, datos de radiación solar a partir del archivo rad.dat, corrección de latitud y longitud.

-Hora, temperatura, precipitación, velocidad del viento, porcentaje de radiación, profundidad del nivel freático de forma horaria.

Se muestra como se encuentra estructurado un archivo icm:

#Station: BIRMINGHAM, AL - Elevation (ft): 639 - Latitude: 33.34 - Longitude:-86.45 - Location: BIRMINGHAM INTL AIRPORT - Months available data: 90

19980901-20050930

-86.45,33.34,639,20,-1,-1,-1,-1,63.3313,30.1714,68.7491,69.0,65.7,66.7,70.0,75.5,75.1,72.5,69.4,71.7,71.2,70.6

9 1 1998 5.62158 18.3784 3201.03

0 71.8 0 0 0 20

1 71.2 0 3 0 20

2 71.2 0 0 0 20

3 71.6 0 0 0 20

4 70.9 0 3 0 20

5 71.1 0 3 0 20

6 73 0 3 0 20

7 75.7 0 4 0 20

8 78.8 0 0 0 20

9 82.4 0 0 0 20

10 85.5 0 0 0 20

11 87.8 0 4 0 20

12 89.2 0 0 0 20

13 89.8 0 5 0 20

14 90.5 0 3 25 20

15 90.3 0 3 25 20

16 86.9 0 7 0 20

17 83.8 0 8 25 20

18 81.5 0 4 25 20

19 76.6 0 3 25 20

20 77.4 0 4 0 20

21 79 0 5 0 20

22 77.2 0 3 0 20

23 77.4 0 5 0 20

2.3.3. Datos de las estaciones (station.dat)

El archivo station.dat contiene información de la base de datos de las estaciones climáticas. Cada estación climática contiene la siguiente información: Número de la estación climática, abreviación de la estación climática, localización (ciudadleestado), latitud, longitud, elevación, y primer día de datos (AAAAMMDD). Se muestran los datos de una estación climática:

-25704,ADK,ADAKI AK,ADAK NAS,51.53,-176.39,17,19960701

2.4. Procedimiento del análisis de sensibilidad del EICM

El análisis de sensibilidad consistió en modificar las diferentes variables de los factores climáticos que utiliza el EICM de forma que se encontraran en el formato ó nomenclatura con que se encuentran en las estaciones climáticas convencionales, para así compararlo con un caso base que se realizó sobre la misma zona, de tal modo que se pueda comprender el impacto que tendría realizar posteriores análisis con la Guía de Diseño de Pavimentos E-M. Esto se realizó para 6 diferentes estaciones climáticas dentro de los Estados Unidos, las cuales se podría decir que contienen tres de los principales climas con los cuales contamos en el país.

La variación de los datos climáticos se realizó dentro del archivo hcd, debido a la facilidad de manejo dentro de este archivo, además de que en el archivo icm, se adicionan datos de los cuales algunos son tomados por el EICM de acuerdo a las coordenadas del lugar, por mencionar algún dato, la salida y puesta del sol. Los archivos hcd se localizan dentro de la carpeta “hcd” que se encuentra en el directorio raíz de la Guía de Diseño de Pavimentos E-M, para modificar algún archivo primeramente se identifica el código de la estación, el cual se localiza en la misma carpeta en el archivo station.dat.

Con el archivo localizado se procedió a modificarlo con el programa Microsoft Excel, una vez realizado el cambio sobre la columna deseada al archivo hcd se guardó como archivo csv.

De aquí se abren los archivos hcd y csv de la misma estación (el archivo csv contiene los datos como deseamos que los utilice el EICM) con el block de notas de Windows, de aquí copiamos el contenido del csv y lo sustituimos por el que contiene el archivo hcd y procedimos a guardar las modificaciones del archivo hcd. Ya con el archivo hcd con los datos con que nosotros íbamos a realizar el análisis, lo sustituimos en la carpeta que contiene todos los archivos hcd de la Guía de Diseño de Pavimentos E-M. Con el archivo hcd conteniendo los datos deseados se procedió a realizar el archivo icm que se requiere para la estación a analizar.

El procedimiento anterior se siguió para los análisis que se llevaron a cabo modificando la condición climática al valor deseado, dentro de las 6 diferentes estaciones. Los diferentes valores adoptados en los análisis realizados se describen a continuación.

i) Humedad relativa:

- a) 25.
- b) 50.
- c) 75.

Los datos sobre humedad relativa que contenía la base de datos hcd se sustituyeron por los antes mencionados a lo largo del día.

ii) Precipitación:

- a) Sin precipitación, se consideró que en el lugar del análisis nunca llueve.
- b) 8 am, la precipitación presentada a lo largo del día se sumo y se concentró en esta hora, debido a que es como las estaciones convencionales adquieren el dato.

iii) Temperatura del aire:

- a) Temperatura constante (18°C) y precipitación a las 8 am.
- b) Temperatura constante (18°C).
- c) Ajuste de temperatura, este valor se explicará a detalle posteriormente.

iv) Velocidad del viento:

- a) Viento nulo, se eliminó cualquier velocidad de viento de dicha columna, de esta forma realizamos el análisis como si nunca soplara el viento.
- b) Viento promedio, se obtuvo el promedio de la velocidad del viento horaria contenida en la base de datos y este se sustituyó a lo largo del día.
- c) Viento máximo, se localizó la velocidad máxima que se presentó con mayor frecuencia en la base de datos y este valor se sustituyó a lo largo del día.

v) Radiación solar (porcentaje de nubosidad):

- a) Radiación 0.
- b) Radiación 75.
- c) Radiación 100.
- d) Radiación promedio.

Los datos correspondientes a la radiación solar (nubosidad) que contenía la base de datos hcd se sustituyeron por los antes mencionados, en cuanto a la radiación promedio se obtuvo el promedio de la radiación solar horaria contenida en la base de datos y este se sustituyó a lo largo del día.

2.5. Ajuste de temperatura

La temperatura juega un papel importante dentro del comportamiento de un pavimento, debido a esto se decidió realizar un ajuste de la temperatura el cuál distribuyera a lo largo del día los valores con que se cuentan en las estaciones convencionales, lo que se decidió hacer fue tomar la temperatura máxima y mínima del día, esto debido a que con estos datos climáticos diarios de temperatura se cuenta en las bases de datos, por lo tanto teníamos que simular una estación con los datos que nosotros pudiéramos proporcionar.

El ajuste se ejecutó, extrayendo la temperatura máxima y mínima diaria de la base de datos del EICM, y de ahí se realizó una repartición lineal colocando el máximo a las 2 pm, y el

mínimo a las 5 am, además esta variación lineal, presentó un cambio de pendiente durante la madrugada que se consideró a las 2 am, debido a que la temperatura presenta normalmente ascensos y descensos, pero en la madrugada tiene un ligero cambio que es a descender con menor intensidad a como se hace durante el atardecer.

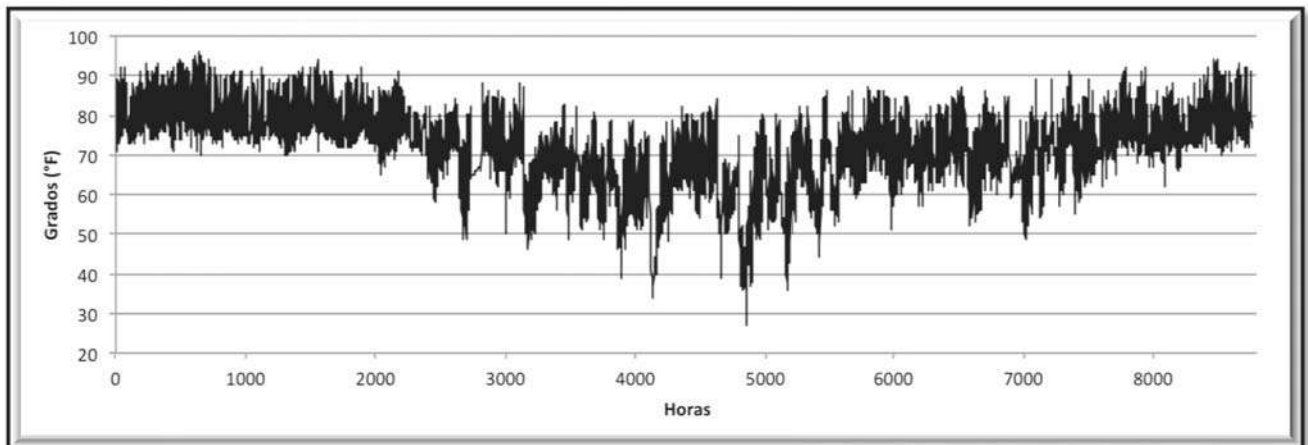


Figura 2.1 Temperatura caso base.

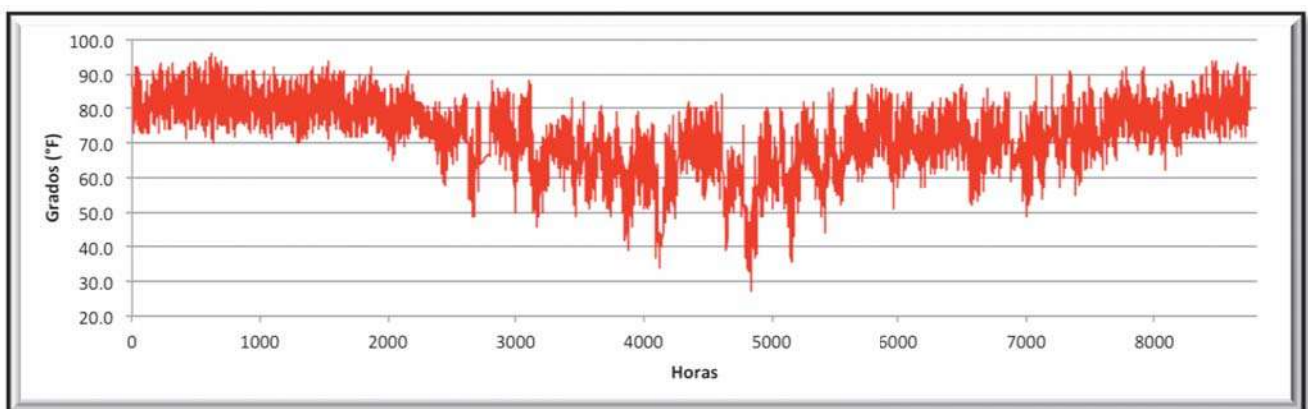


Figura 2.2 Temperatura ajustada.

Esta modo de manejar los datos de temperatura, fue la que realizó el ajuste lo más cercano al comportamiento de temperatura habitual. La figura 2.1 muestra de manera gráfica el comportamiento de la temperatura en el caso base, en contra parte, la figura 2.2 nos muestra igualmente de manera los valores del ajuste de temperatura para el caso base. Finalmente, la figura 2.3 muestra las dos gráficas contrapuestas, en la cual se aprecia la similitud que se logra con el ajuste de temperatura.

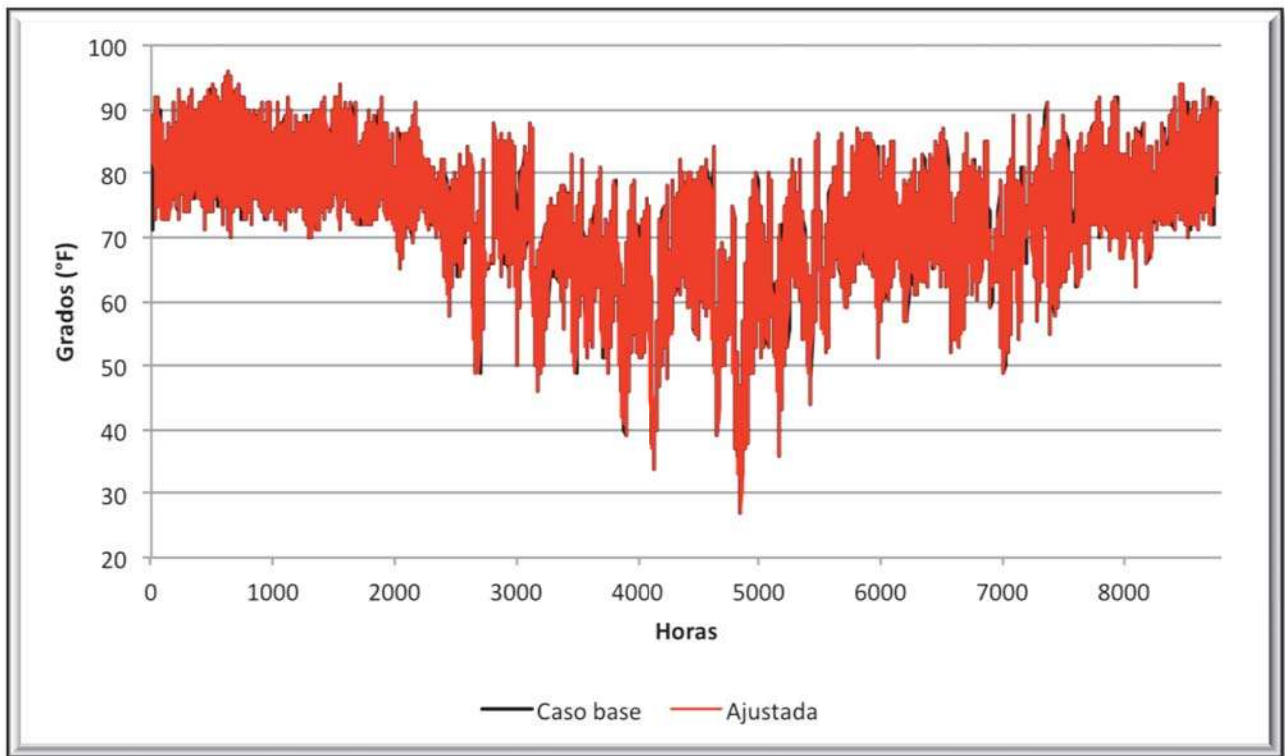


Figura 2.3 Temperatura base contra temperatura ajustada.

2.6. Sensibilidad de acuerdo a la variable climática

Este análisis se explicará de acuerdo a la variable climática que se analizará, estas variables fueron: humedad relativa, precipitación, radiación solar (nubosidad), temperatura y velocidad del viento. Al realizar el estudio de sensibilidad del EICM de acuerdo a las variables climáticas nos percatamos también del impacto que tienen dichos datos en el comportamiento de la estructura del pavimento asfáltico, provocando menor o mayor efecto sobre los principales factores de falla que se revisaron. El análisis de sensibilidad de acuerdo a la variable analizada del pavimento se comparó siempre con un caso base de la estructura, el cuál es un análisis sin variación en sus datos climáticos.

2.6.1. Precipitación

Aquí se analizó el impacto que se tiene al sustituir los datos de precipitación horaria considerando que nunca llueve o en la forma que se recauda en las estaciones climáticas convencionales, la cual es un valor al día, esto se resume de acuerdo al tipo de falla que se presenta, así como el efecto que se tiene.

a) Agrietamientos

Los agrietamientos longitudinales y de piel de cocodrilo debido a la variación de la precipitación se presentaron con mayor impacto en la zona con clima cálido-húmedo, esta región en el estudio la centramos en las ciudades de Birmingham y Miami. Esta fue la región que presentó una correlación menor para el dato que tenemos mayor interés en analizar, el cuál es un valor diario, pero teniendo en cuenta que a pesar de ser la zona climática con menor correlación, su variación es de -2.76% de acuerdo al agrietamiento longitudinal previsto en el análisis a 20 años (figura 2.4), en contra parte la región climática seca que fue analizada en las ciudades de El Paso y Phoenix fue la que presentó menor correlación cuándo no se incluye precipitación. Sin embargo el análisis de sensibilidad respecto a los agrietamientos debidos a la precipitación resultó favorable contando con un dato diario (figura 2.5). En las tablas 2.1 y 2.2 se muestra el resumen de agrietamientos para el análisis a 20 años.

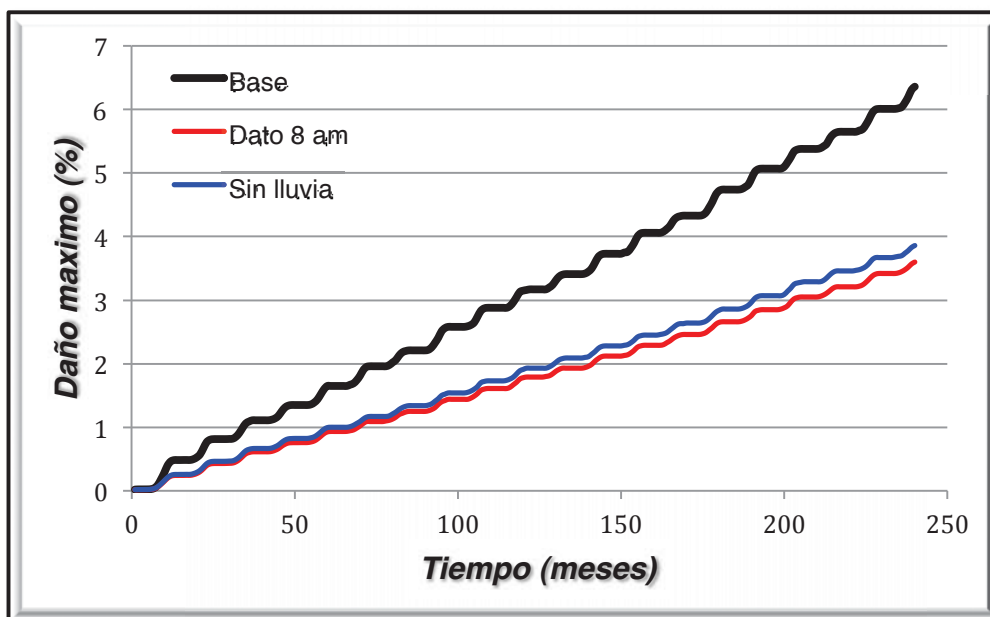


Figura 2.4 Agrietamiento longitudinal debido a la precipitación en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham.

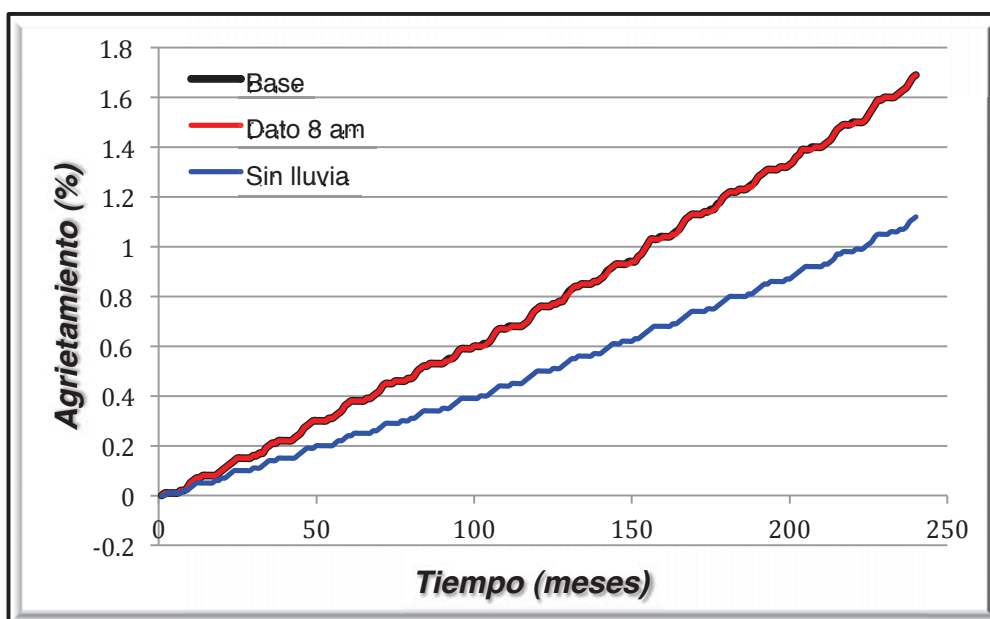


Figura 2.5 Agrietamiento en cocodrilo debido a la precipitación en clima templado lluvioso con estación en Portland.

Tabla 2.1 Agrietamiento longitudinal (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por precipitación.

Estación	Caso base	8:00 a.m.	Sin precipitación
Birmingham	6.36	3.6	3.86
Phoenix	81.8	81.8	7.2
Portland	1.83	1.82	1.42

Tabla 2.2 Agrietamiento en cocodrilo (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por precipitación.

Estación	Caso base	8:00 a.m.	Sin precipitación
Birmingham	3.03	1.91	1.83
Phoenix	9.5	9.5	2.79
Portland	1.69	1.69	1.12

b) IRI

La variación del IRI por motivo de la precipitación presenta una correlación considerable para las 6 estaciones estudiadas, esto debido a que el análisis con un dato de precipitación se comportó de manera admisible en casi todos los ensayos, siendo una de las estaciones con clima cálido-húmedo la que presenta la mayor discrepancia (figura 2.6), la cual es de 0.14 mm/m al finalizar el análisis de 20 años. Por otra parte el clima templado-lluvioso presenta la mejor adaptación ya que a lo largo del análisis debido al valor de precipitación muestra el mejor ajuste con el caso base (figura 2.7). La tabla 2.3 presenta el resumen de los valores del IRI al finalizar el periodo de análisis.

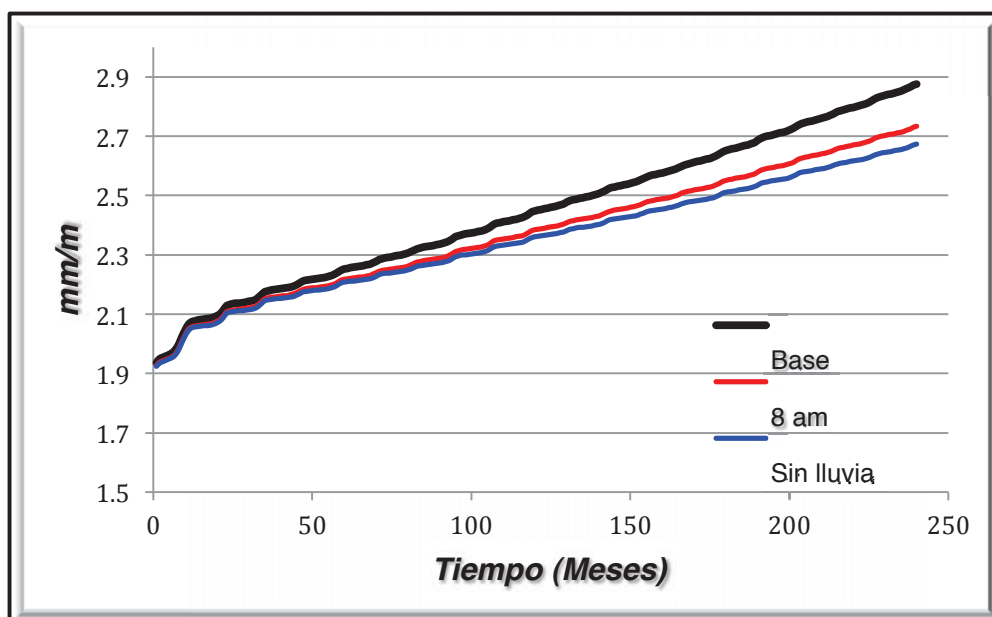


Figura 2.6 Iri presentado en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham debido a la precipitación.

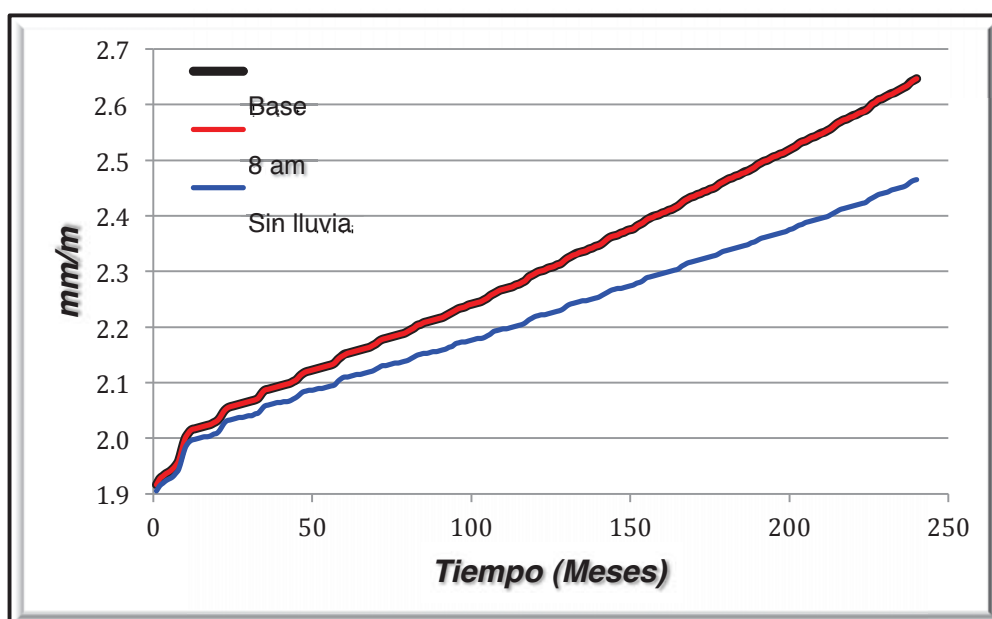


Figura 2.7 Iri presentado en clima templado-lluvioso con estación en Portland debido a la precipitación.

Tabla 2.3 Rugosidad (iri) (mm/m) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por precipitación.

<i>Estación</i>	<i>Caso base</i>	<i>8:00 a.m.</i>	<i>Sin precipitación</i>
Birmingham	2.87	2.73	2.67
Miami	1.9	1.9	1.9
El Paso	2.31	2.31	1.85
Phoenix	3.2	3.03	3.21
Portland	2.65	2.65	2.46
Seattle	2.24	2.24	1.83

c) Roderas

Las deformaciones permanentes, comúnmente conocidas como roderas, igualmente presentaron un comportamiento aceptable al momento de introducir los datos con una concentración de la precipitación diaria a un solo dato. De igual manera el comportamiento no fue tan disperso cuando no se incluyó la precipitación, exceptuando el clima seco, en el cual la diferencia llegó a ser para las roderas totales de medio centímetro (figura 2.8), mientras tanto en el clima templado-lluvioso, se deformó 10 mm menos que el caso base cuando la precipitación no se hace presente en la vida del pavimento (figura 2.9). La tabla 2.4 presenta los valores finales para las deformaciones permanentes en la estructura del pavimento.

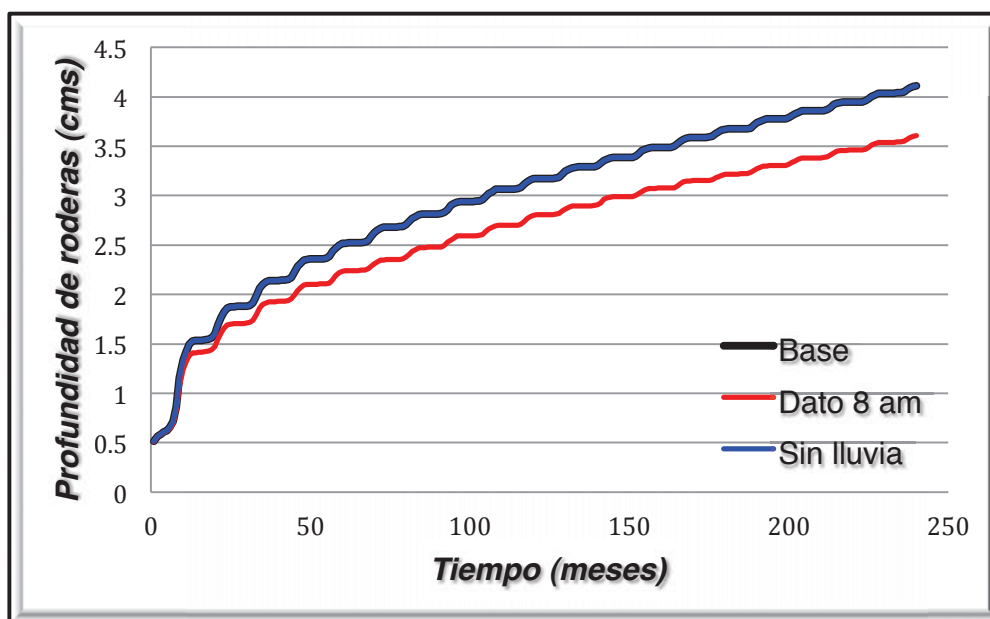


Figura 2.8 Roderas finales presentadas debido a la precipitación en clima seco con estación en Phoenix.

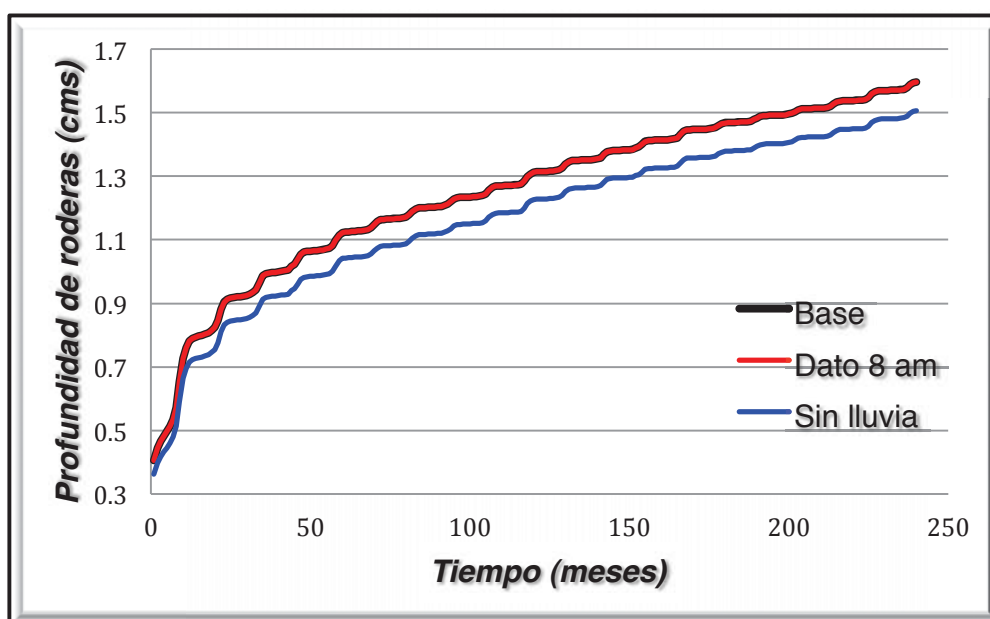


Figura 2.9 Roderas finales presentadas debido a la precipitación en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

Tabla 2.4 Deformaciones permanentes (roderas) (cm) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por precipitación.

Estación	Caso base	8:00 a.m.	Sin precipitación
Birmingham	2.29	2.21	2.2
Miami	2.27	2.27	2.23
Phoenix	4.11	4.11	3.61
Portland	1.6	1.6	1.51

d) Módulos

El comportamiento de los módulos de la carpeta asfáltica debido a la precipitación se comportó de manera apropiada, incluso si no existiera precipitación alguna. El movimiento de los módulos es variado dependiendo de la época del año, lo cual se muestra en las figuras 2.10, 2.11 y 2.12, pertenecientes a cada una de las diferentes regiones climáticas analizadas.

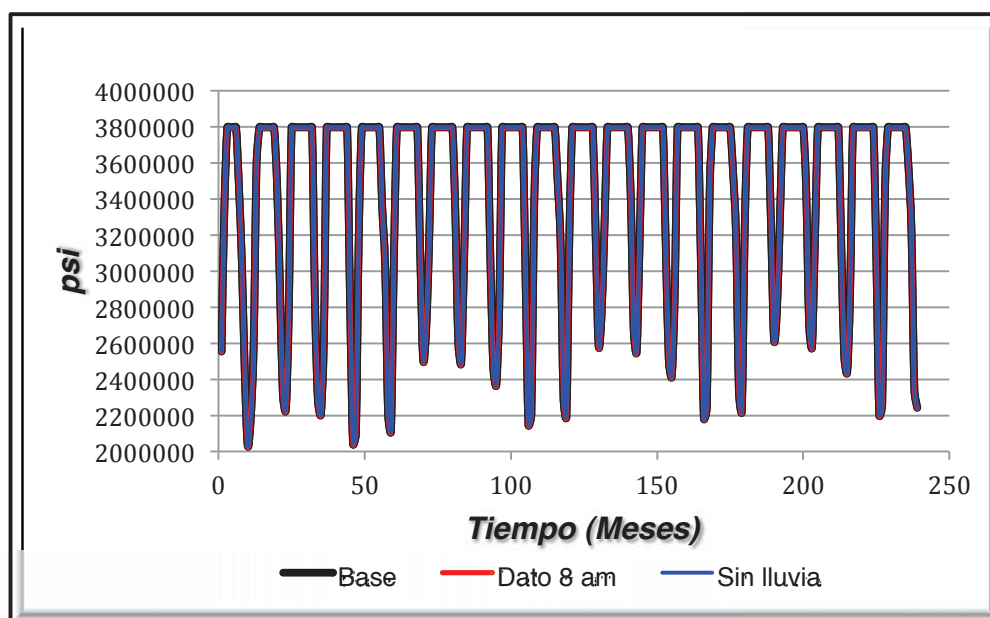


Figura 2.10 Módulos presentados debido a la precipitación en clima templado-lluvioso con estación en Seattle.

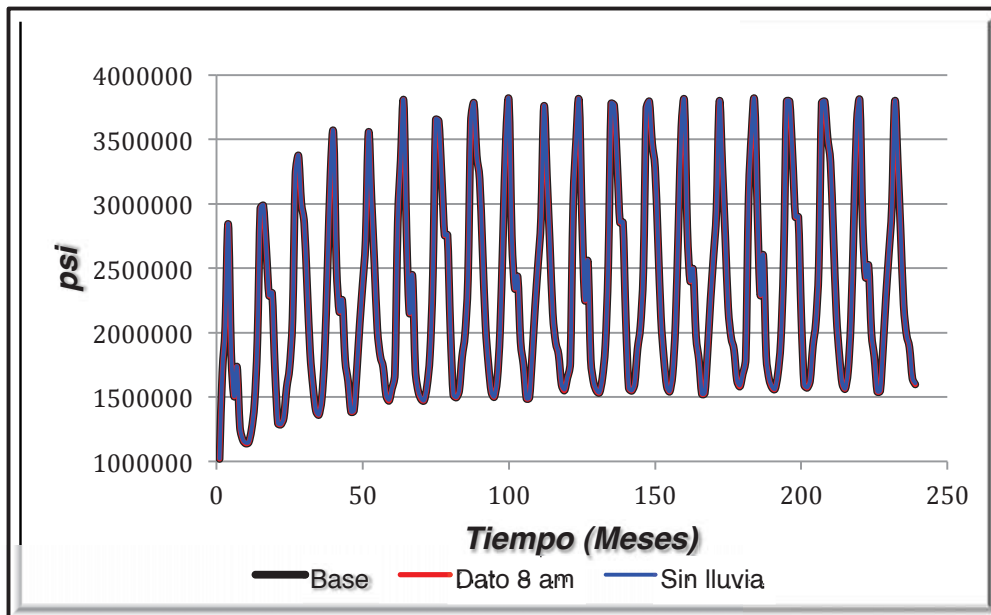


Figura 2.11 Módulos presentados debido a la precipitación en clima cálido-húmedo con estación en Miami.

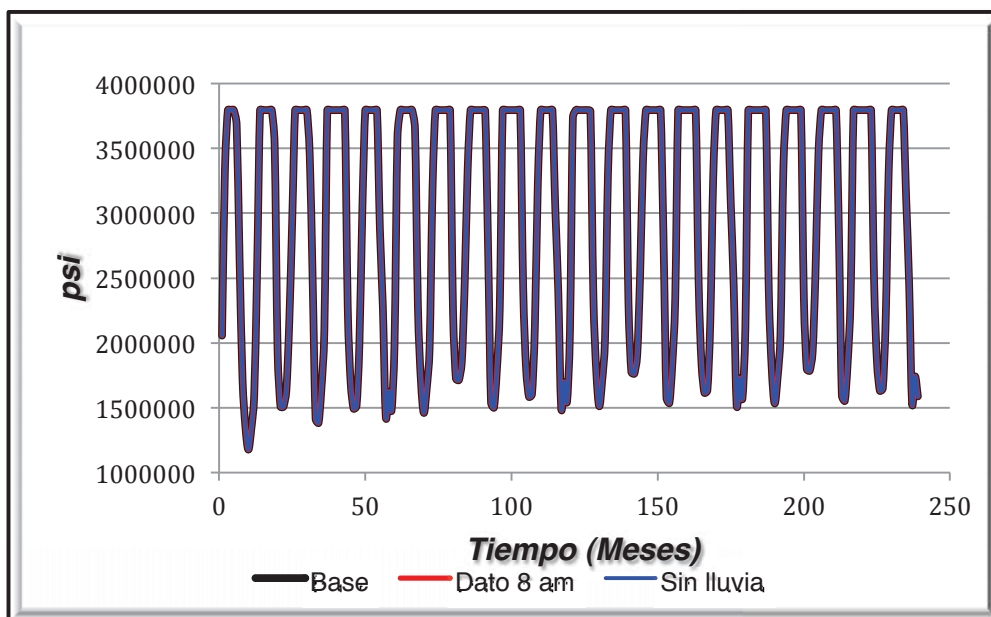


Figura 2.12 Módulos presentados debido a la precipitación en clima seco con estación en El Paso.

2.6.2. Temperatura

En este análisis se llevó a cabo la sustitución de los datos de temperatura. Esta parte del trabajo fue de especial interés debido al comportamiento de la temperatura a lo largo del día. Para esto se realizó el estudio de sensibilidad colocando los datos de temperatura estables a lo largo del día, la cual fue de 18°C, además de este estudio, se realizó el ajuste mencionado anteriormente el cuál mostró un comportamiento apropiado a lo largo del análisis.

a) Agrietamientos

El agrietamiento longitudinal debido a la modificación de la temperatura nos presentó un mayor impacto debido al cambio de valores en el clima cálido-húmedo, especialmente en la estación de Miami donde nos presentó un aumento de 1.6% al pronóstico final con el ajuste de temperatura que se realizó (figura 2.13), sin dejar de lado el resultado final para el análisis dentro del caso base que fue de 46.1% de agrietamientos al final de periodo de análisis; por contraparte el clima templado-lluvioso nos presentó la menor variación con un 0.05% al deterioro pronosticado (figura 2.14), pero en el cual debemos considerar que el valor final fue de 1.83% en el caso base. La tabla 2.5 Muestra el resumen de valores final de los agrietamientos.

Dentro del agrietamiento en piel de cocodrilo, las modificaciones en los valores de temperatura que causaron una mayor diferencia nuevamente fueron para el clima cálido-húmedo con base de estudio en Miami, donde nos presentó un aumento de 0.14% con los valores del ajuste de temperatura (figura 2.15), pero teniendo en cuenta que el valor del caso base al finalizar el pronóstico es de 7.91%; por otro lado el clima templado-lluvioso con base en Portland (figura 2.16) nos presentó una menor variación a lo largo del análisis teniendo un aumento de 0.03% con los valores del ajuste de temperatura respecto al valor del caso base el cuál su valor final es de 1.69%. En la tabla 2.6 se observa el resumen de los resultados para los diferentes casos planteados.

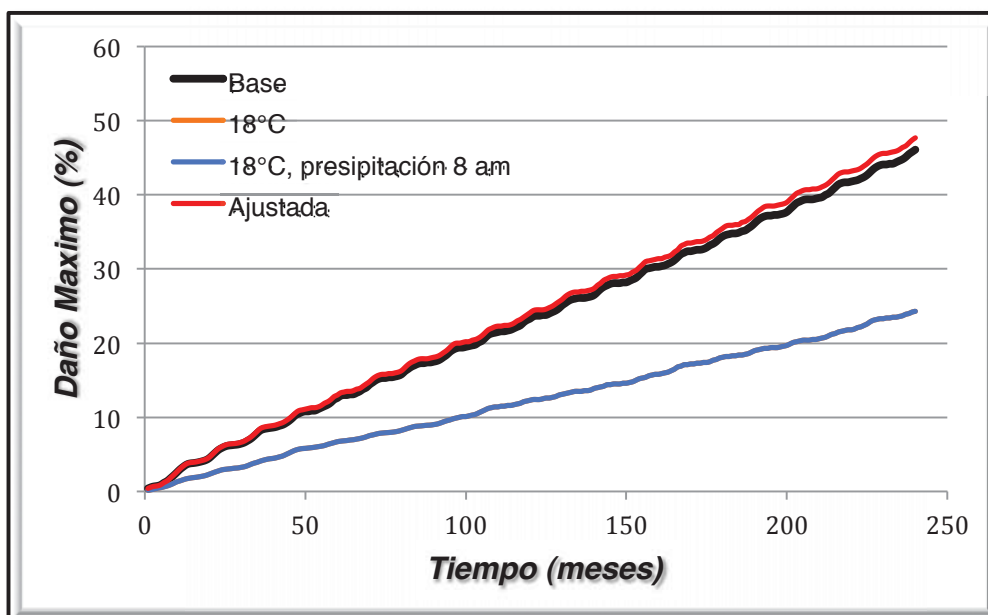


Figura 2.13 Agrietamiento longitudinal presentado debido a la temperatura en clima cálido-húmedo con estación en Miami.

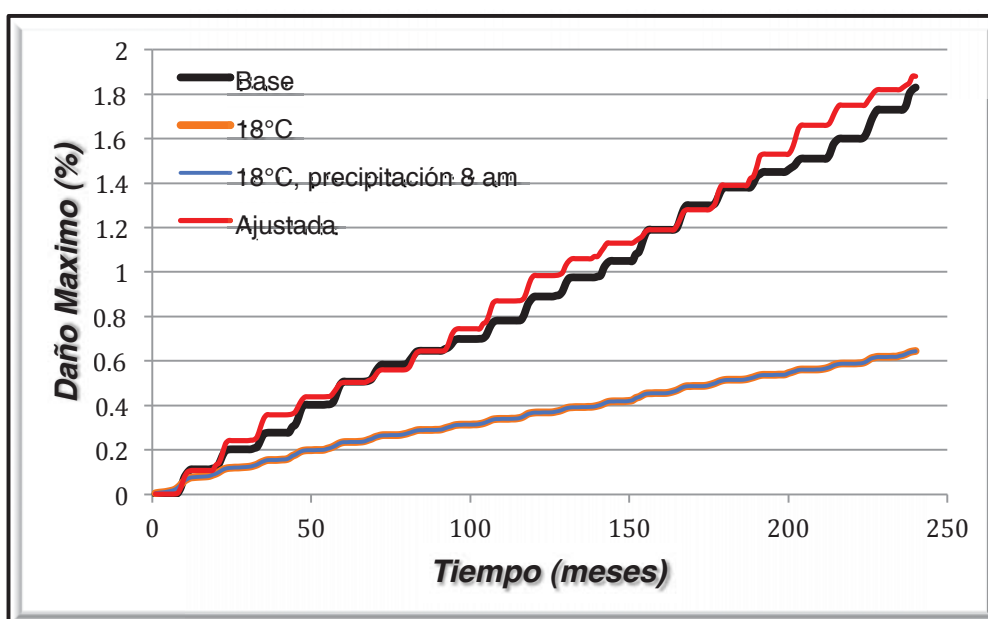


Figura 2.14 Agrietamiento longitudinal presentado debido a la temperatura en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

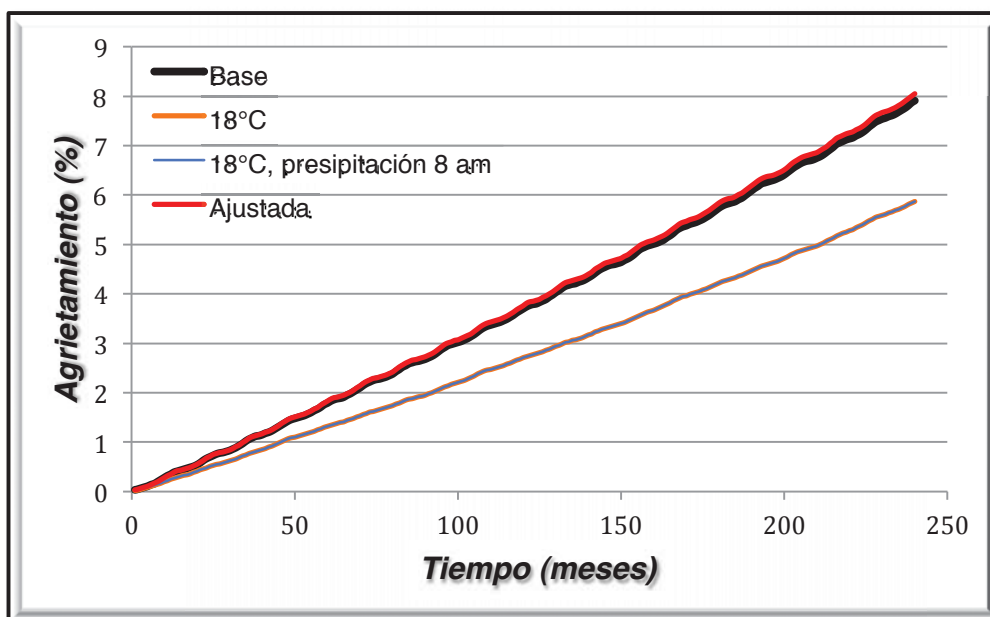


Figura 2.15 Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la temperatura en clima cálido-húmedo con estación en Miami.

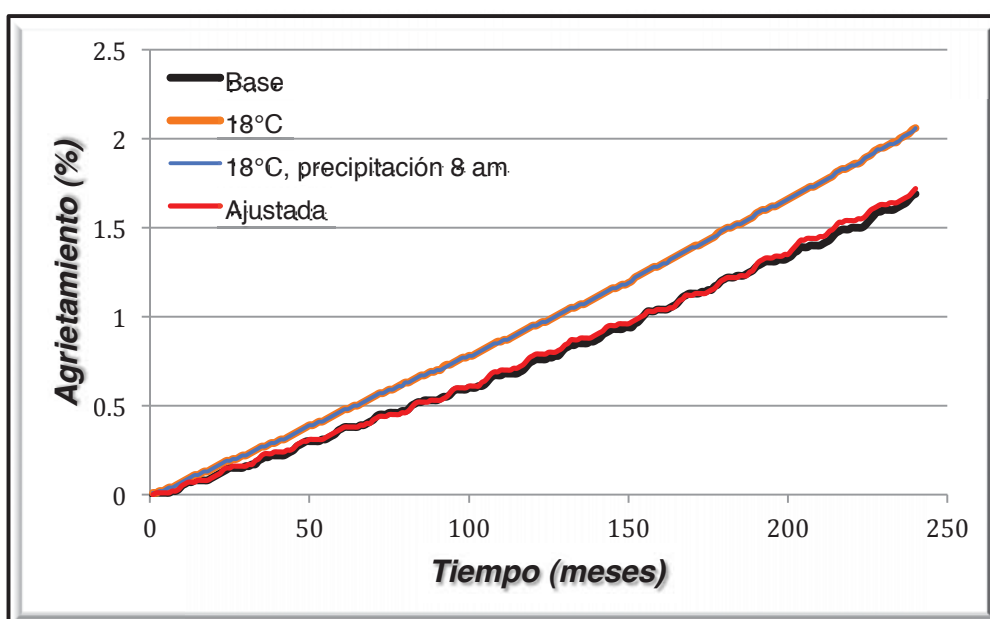


Figura 2.16 Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la temperatura en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

Tabla 2.5 Agrietamiento longitudinal (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por temperatura.

<i>Estación</i>	<i>Caso base</i>	<i>18°C</i>	<i>18°C, precipitación 8 am</i>	<i>Ajustada</i>
Birmingham	6.36	1.36	1.09	6.18
Miami	46.1	24.3	24.3	47.7
Phoenix	53.9	24.3	24.3	52.5
Portland	1.83	0.645	0.644	1.88

Tabla 2.6 Agrietamiento en cocodrilo (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por temperatura.

<i>Estación</i>	<i>Caso base</i>	<i>18°C</i>	<i>18°C, precipitación 8 am</i>	<i>Ajustada</i>
Birmingham	3.03	2.56	1.68	2.99
Miami	7.91	5.87	5.87	8.05
Phoenix	7.11	5.87	5.87	7.05
Portland	1.69	2.06	2.06	1.72

b) IRI

El análisis sobre el IRI debido a la variación de la temperatura nos muestra una correlación tolerable para el cambio de datos realizado, comportándose de mejor manera para el ajuste de temperatura que se realizó. El clima que presentó una diferencia mayor respecto a los demás, tomando como ensayo el ajuste de temperatura fue el clima seco con análisis en Phoenix, pero el cuál mostró una diferencia de 0.02 mm/m (figura 2.18) respecto al caso base el cual al final del pronóstico arroja 2.32 mm/m. Los demás climas presentaron variaciones de 0.01 mm/m al finalizar el análisis, destacando el caso de la región cálido-húmedo con estación en Birmingham ya que esta presentó variación dentro de los resultados para

cada uno de diferente análisis (figura 2.17), siendo menor el daño cuando la precipitación se concentra en una hora. La tabla 2.7 muestra el resumen de los valores finales para los diferentes estudios en las estaciones analizadas.

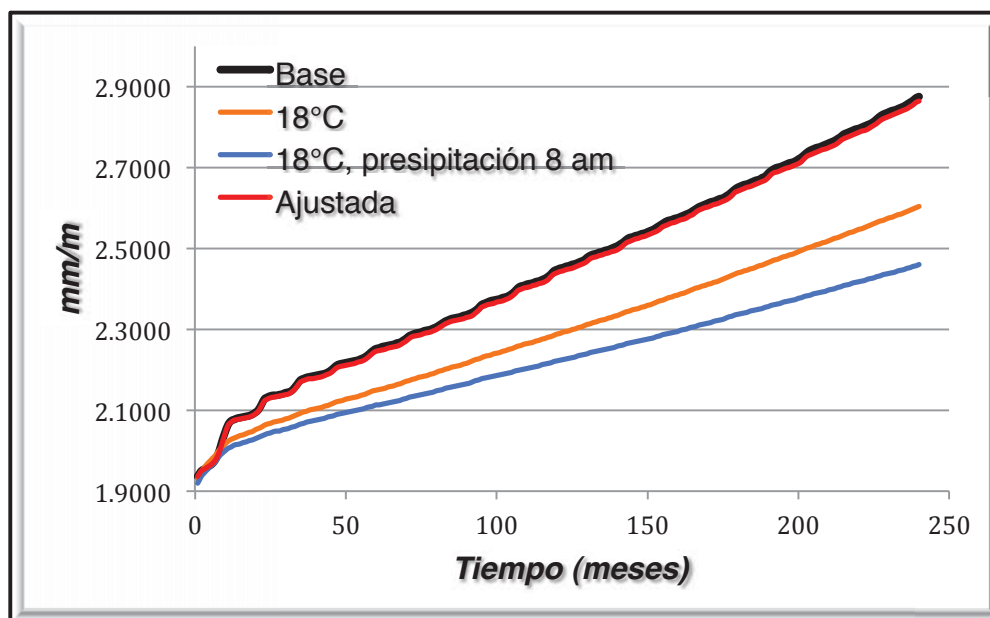


Figura 2.17 Iri presentado debido a la temperatura en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham.

Tabla 2.7 Rugosidad (iri) (mm/m) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por temperatura.

Estación	Caso base	18°C	18°C, precipitación 8 am	Ajustada
Birmingham	2.87	2.6	2.46	2.86
Miami	1.9	1.88	1.88	1.91
Phoenix	2.32	1.88	1.88	2.3
Portland	2.65	2.55	2.55	2.64

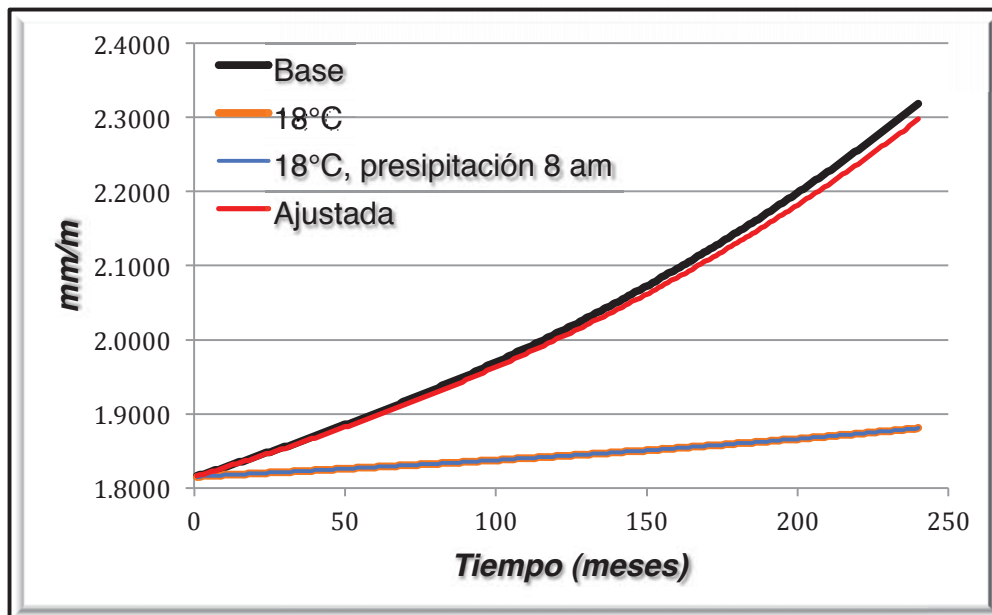


Figura 2.18 Iri presentado debido a la temperatura en clima seco con estación en Phoenix.

c) Roderas

Las deformaciones permanentes (roderas) presentaron un comportamiento adecuado a la variación de los datos de temperatura, siendo los valores del ajuste de temperatura los que presentan mejor comportamiento a lo largo del análisis. El clima templado lluvioso es el que presenta una mejor correlación hacia el ajuste que se realizó (figura 2.19) ya que este además de tener al finalizar el análisis una diferencia de 0.01 cm, pero para lo cual el caso base presentó una deformación de 1.60 cm. De igual manera el clima cálido-húmedo presenta buena correlación hacia el ajuste de temperatura que se realizó, en contraparte hacía los otros análisis y fue el que presentó mayor variación (figura 2.20). La tabla 2.8 nos muestra el resumen al finalizar el periodo de análisis para la deformación permanente.

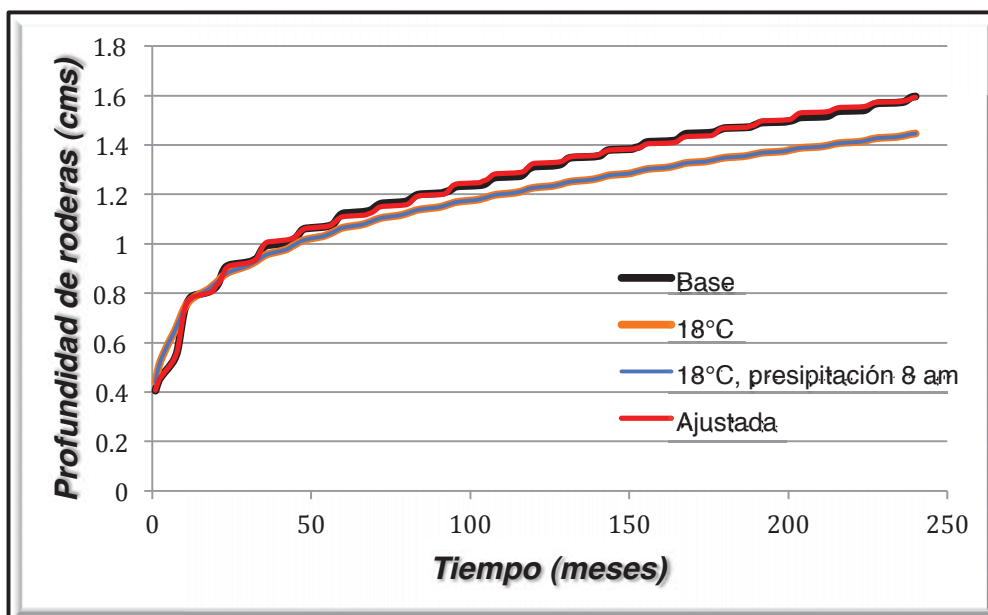


Figura 2.19 Roderas finales presentadas debido a la temperatura en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

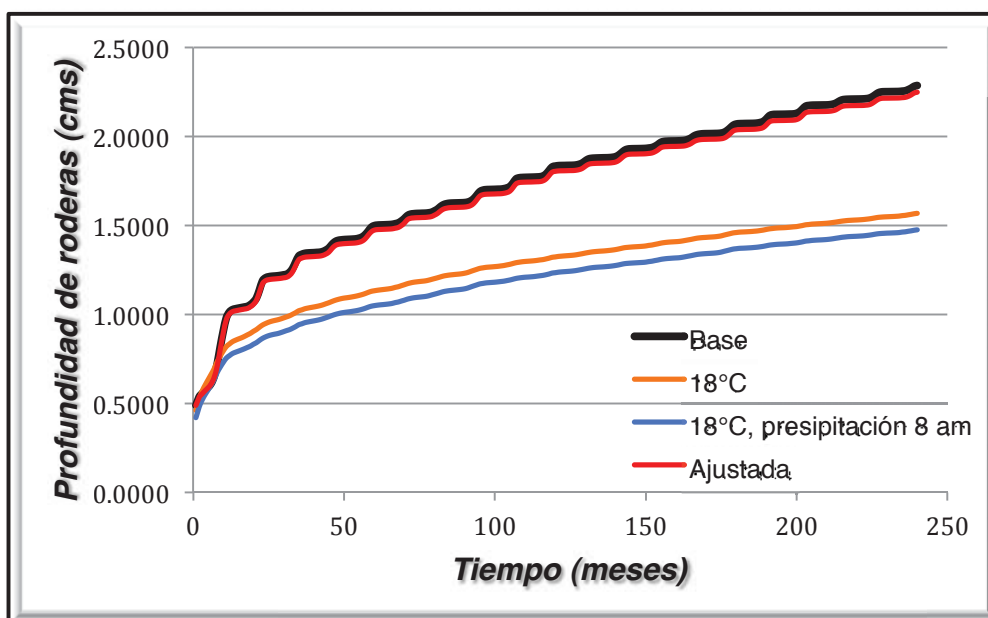


Figura 2.20 Roderas finales presentadas debido a la temperatura en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham.

Tabla 2.8 Deformaciones permanentes (roderas) (cm) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por temperatura.

<i>Estación</i>	<i>Caso base</i>	<i>18°C</i>	<i>18°C, precipitación 8 am</i>	<i>Ajustada</i>
Birmingham	2.29	1.57	1.48	2.25
Phoenix	1.16	0.67	0.67	1.13
Portland	1.6	1.45	1.45	1.59

d) Módulos

En este análisis se puede apreciar la importancia de la variación de temperatura a lo largo del día, ya que en todos los pronósticos que se realizaron, los módulos proyectaron un comportamiento completamente diferente con la variación de datos hacia temperatura constante. Por el otro lado el ajuste de temperatura se comporto de manera mucho mas aceptable a lo largo de los análisis. Los diferentes climas mostraron un comportamiento adecuado, se muestra como ejemplo el clima cálido-húmedo (figura 2.21), donde se aprecia la correlación que se tuvo con el caso base. Por otro lado el caso que presentó mayor diferencia fue el análisis en el clima templado-lluvioso, sin embargo siguió el comportamiento del caso base (figura 2.22).

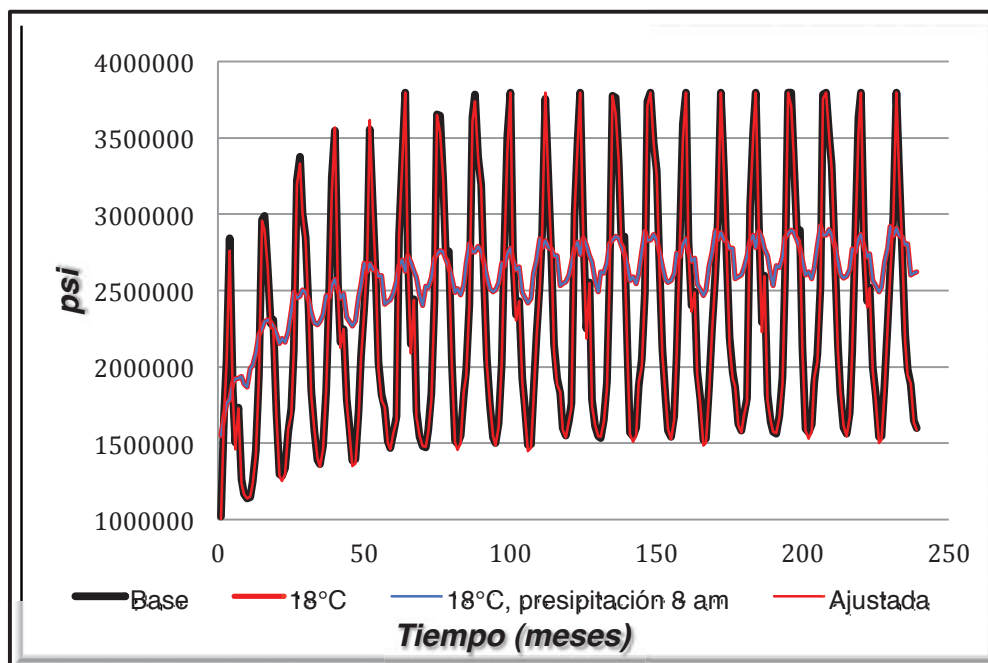


Figura 2.21 Módulos presentados debido a la temperatura en clima cálido-húmedo con estación en Miami.

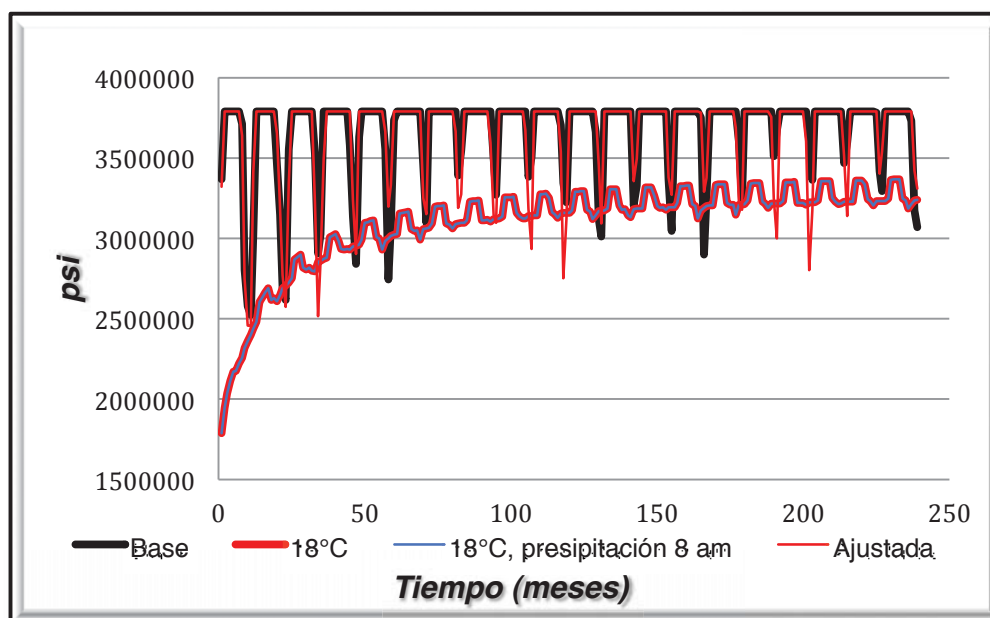


Figura 2.22 Módulos presentados debido a la temperatura en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

2.6.3. Velocidad del viento

La velocidad tiene un impacto sobre el asfalto de manera conjunta con la temperatura, sin embargo se analizó el impacto que tendría al modificar solamente el factor viento, como se ha venido haciendo en los parámetros anteriores. Los análisis de sensibilidad que se realizaron fueron: eliminar el viento, como si no hubiera corrientes de viento en la zona, además de tomar la velocidad máxima continua que se observaba en la estación a estudiar y se distribuyó a lo largo de las 24 horas, finalmente se consideró la velocidad de viento promedio a lo largo del día y se distribuyó de igual manera a lo largo del día. Estos análisis se compararon con el caso base que se realizó sobre cada estación.

a) Agrietamientos

El análisis de sensibilidad para los agrietamientos mantuvo su comportamiento para los diferentes climas, el cual se considera aceptable cuando se utiliza el promedio de la velocidad del viento, ya que se puede observar como para el clima cálido-húmedo con estación en Birmingham la diferencia respecto al caso base es de 0.02% dentro del agrietamiento longitudinal, para el cual, el caso base es de 6.36% (figura 2.23) al finalizar el análisis, y para el agrietamiento de cocodrilo presenta una diferencia de 0.10% de diferencia en el mismo clima de estudio respecto al caso base, siendo 3.03% (figura 2.25) para este. Por otro lado, el clima seco presentó un comportamiento muy diferente a lo que se venía observando en los casos anteriores, ya que para el agrietamiento longitudinal el cual en el caso base es de 81.8% como pronóstico final, pero para el cual, el análisis de velocidad de viento promedio es de 36.7% menor al del caso base (figura 2.24); por otro lado el agrietamiento en piel de cocodrilo presenta en el mismo clima diferencia a lo que se venía mostrando con anterioridad, pero no tan considerable como el agrietamiento longitudinal, siendo de 1.69% menor al del caso base, donde este es de 9.5% (figura 2.26). La tabla 2.9 muestra el resumen de valores finales para el agrietamiento longitudinal y la tabla 2.10 para el agrietamiento de cocodrilo.

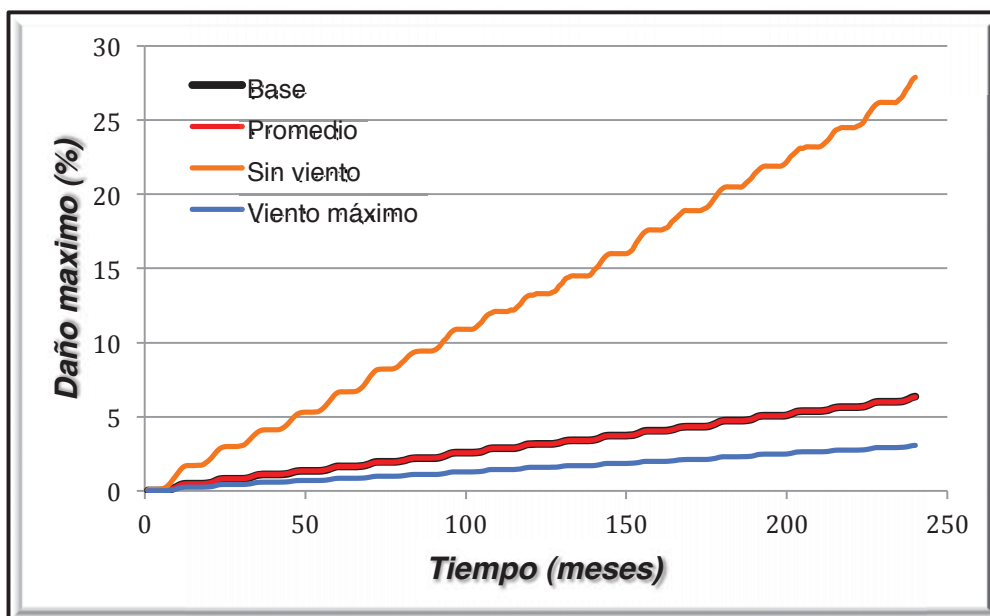


Figura 2.23 Agrietamiento longitudinal presentado debido a la velocidad del viento en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham.

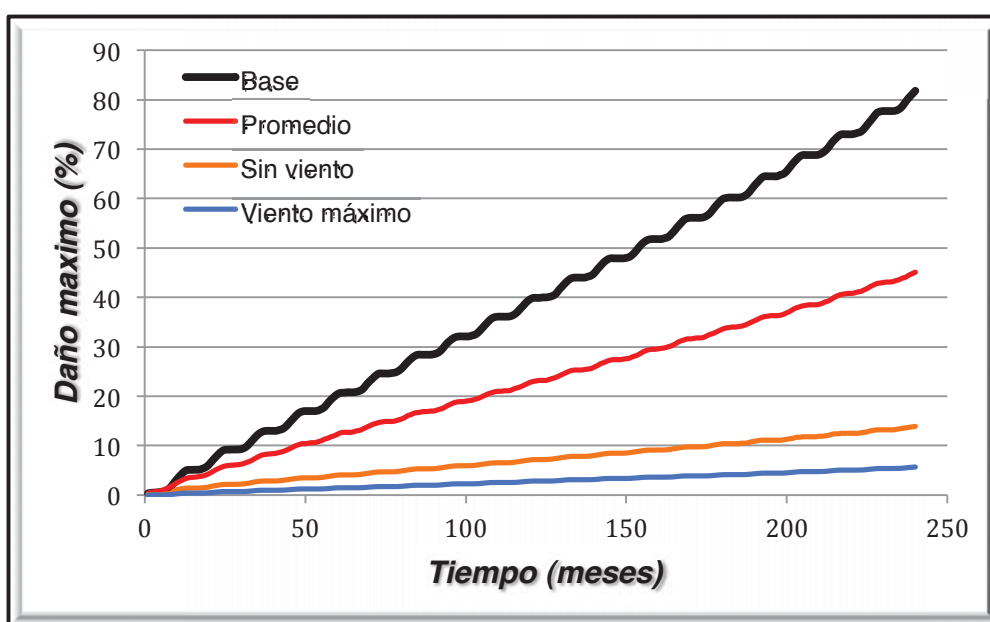


Figura 2.24 Agrietamiento longitudinal presentado debido a la velocidad del viento en clima seco con estación en Phoenix.

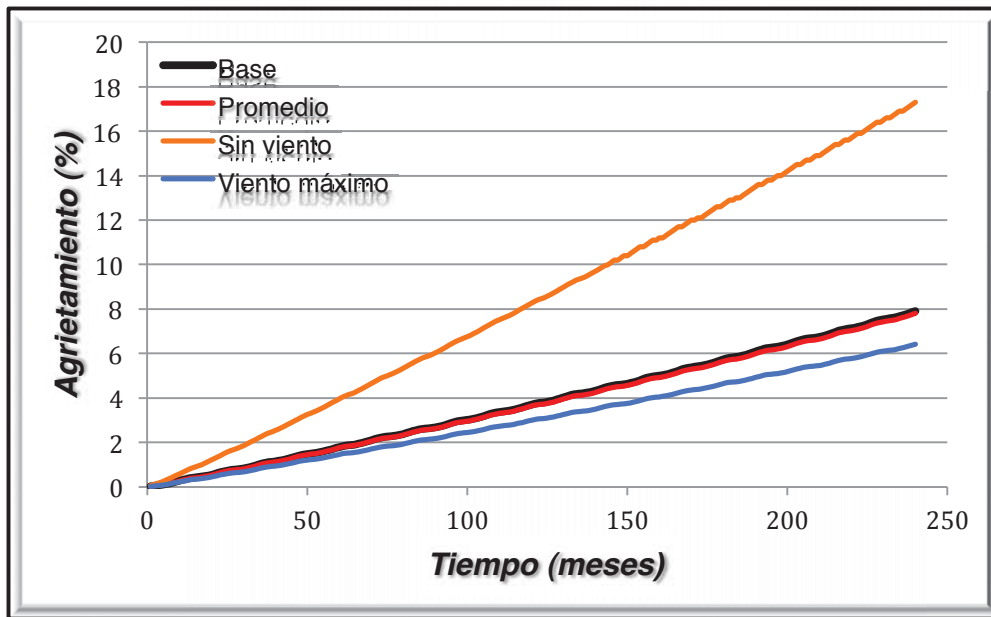


Figura 2.25 Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la velocidad del viento en clima cálido-húmedo con estación en Miami.

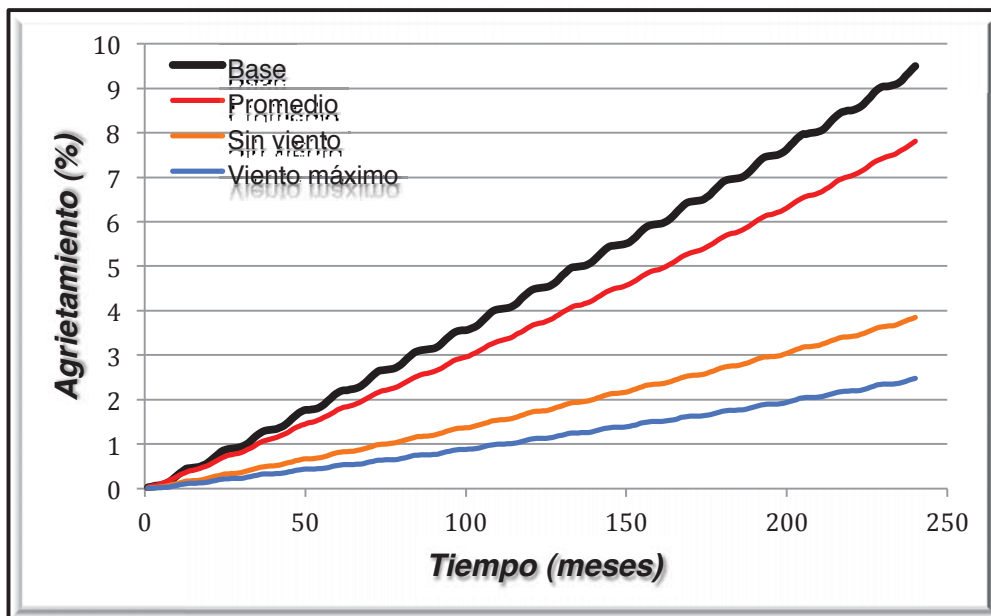


Figura 2.26 Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la velocidad del viento en clima seco con estación en Phoenix.

Tabla 2.9 Agrietamiento longitudinal (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por velocidad del viento.

<i>Estación</i>	<i>Caso base</i>	<i>Viento promedio</i>	<i>Viento nulo</i>	<i>Viento máximo</i>
Birmingham	6.36	6.34	27.9	3.07
Miami	46.1	45.1	0.0196	29.2
Phoenix	81.8	45.1	13.9	5.68
Portland	1.83	1.74	0.698	16.3

Tabla 2.10 Agrietamiento en cocodrilo (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por velocidad del viento.

<i>Estación</i>	<i>Caso base</i>	<i>Viento promedio</i>	<i>Viento nulo</i>	<i>Viento máximo</i>
Birmingham	3.03	3.05	6.1	2.38
Miami	7.91	7.81	17.3	6.42
Phoenix	9.5	7.81	3.85	2.48
Portland	1.69	1.64	1.26	4.33

b) IRI

Las variaciones del IRI causadas por los cambios a los datos de velocidad del viento, nos indica una buena correlación a la modificación de interés, la cuál es, la aceptabilidad del EICM al utilizar la velocidad de viento promedio distribuida a lo largo del día, ya que en el caso más crítico que fue en el clima seco la diferencia respecto al caso base fue de 0.17 mm/m cuando el valor del caso base es de 3.21 mm/m (figura 2.28). En cuanto a los demás análisis la diferencia es de 0.01 mm/m (tabla 2.11). La figura 2.27 muestra el caso del clima templado-lluvioso donde además el comportamiento a lo largo del análisis es muy similar.

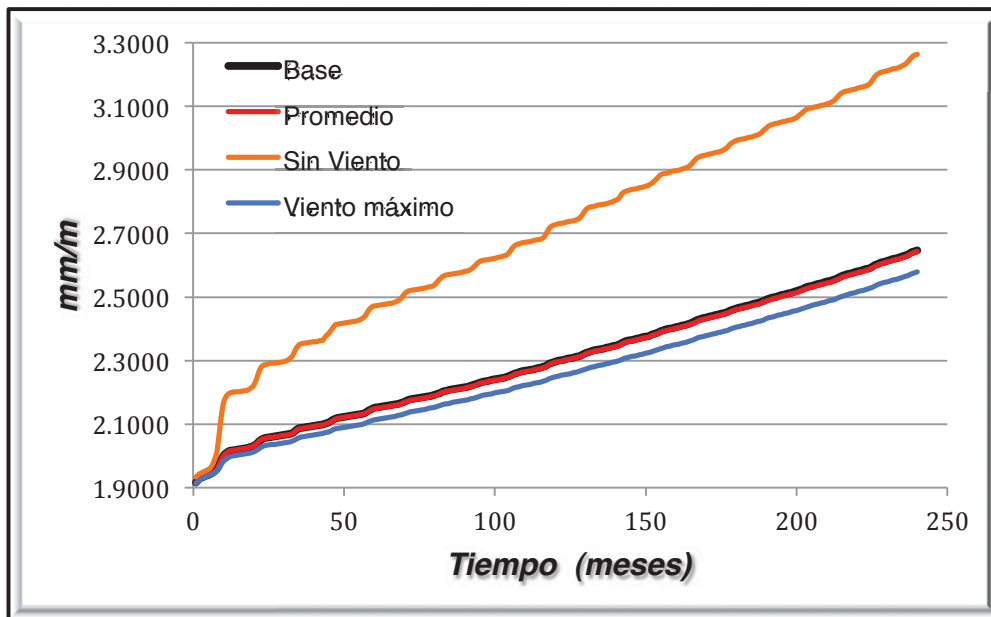


Figura 2.27 Iri presentado debido a la velocidad del viento en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

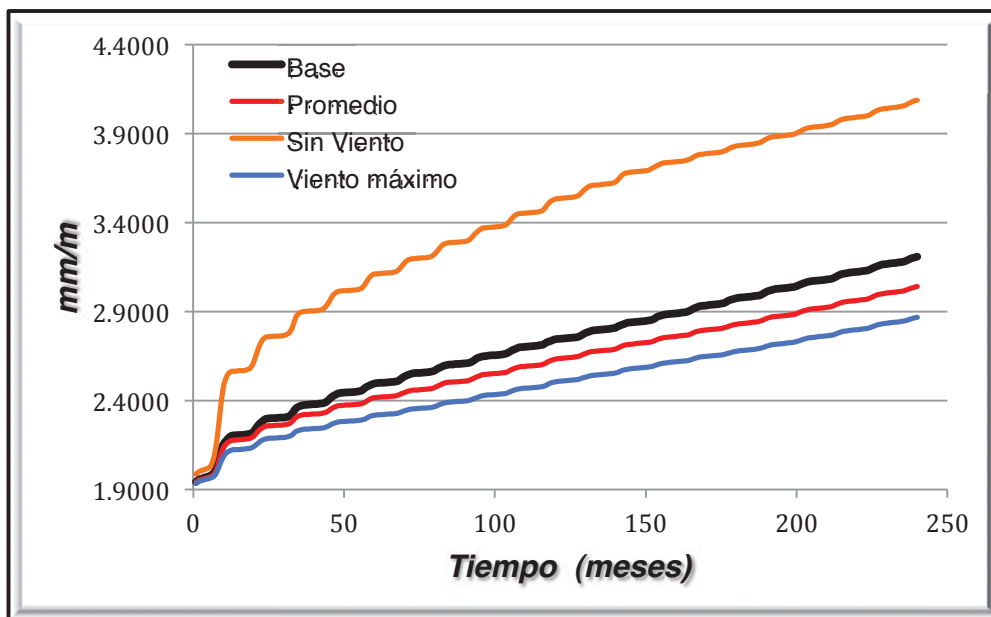


Figura 2.28 Iri presentado debido a la velocidad del viento en clima seco con estación en Phoenix.

Tabla 2.11 Rugosidad (iri) (mm/m) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por velocidad del viento.

<i>Estación</i>	<i>Caso base</i>	<i>Viento promedio</i>	<i>Viento nulo</i>	<i>Viento máximo</i>
<i>Birmingham</i>	2.88	2.87	3.68	2.75
<i>El Paso</i>	2.32	2.32	2.38	2.31
<i>Phoenix</i>	3.21	3.04	4.09	2.87
<i>Portland</i>	2.65	2.64	3.26	2.58

c) Roderas

Las deformaciones permanentes (roderas) presentaron un comportamiento regular al análisis de sensibilidad dado por la velocidad de viento promedio, ya que llega a presentar variaciones de 0.02 cm respecto al caso base, como se puede apreciar en el clima templado-lluvioso (figura 2.29), aunado a esto el clima seco es el que nos presenta una variación mayor siendo esta de 0.47 cm en la estación de Phoenix, cuando el caso base es de 4.11 cm (figura 2.30), por lo cual se puede apreciar la importancia de la velocidad del viento para mantener a la estructura del pavimento en una temperatura adecuada. En la tabla 2.12 podemos observar el resumen de la predicción al final del análisis.

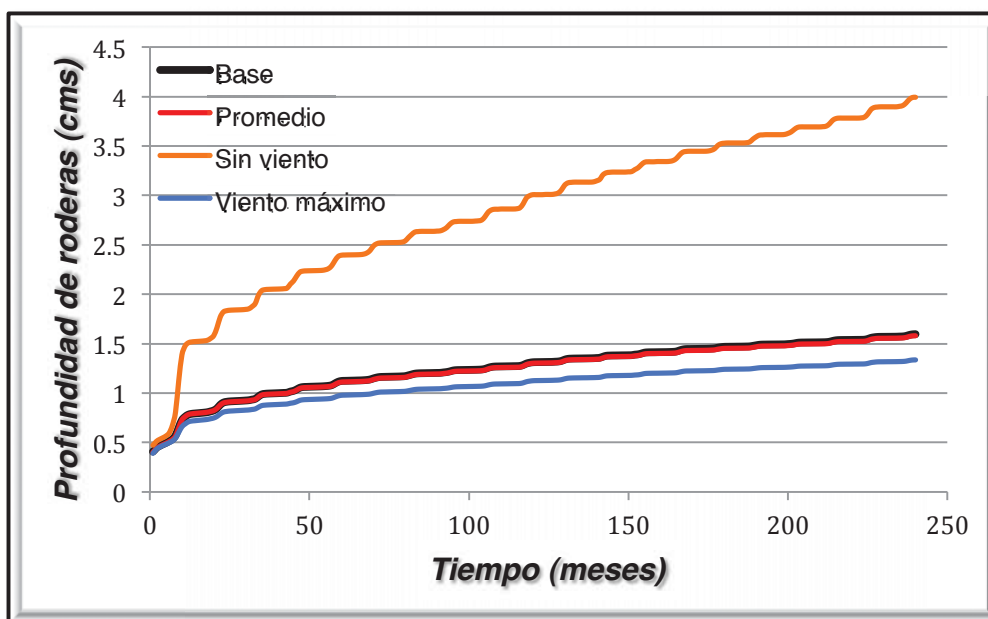


Figura 2.29 Roderas finales presentadas debido a la velocidad del viento en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

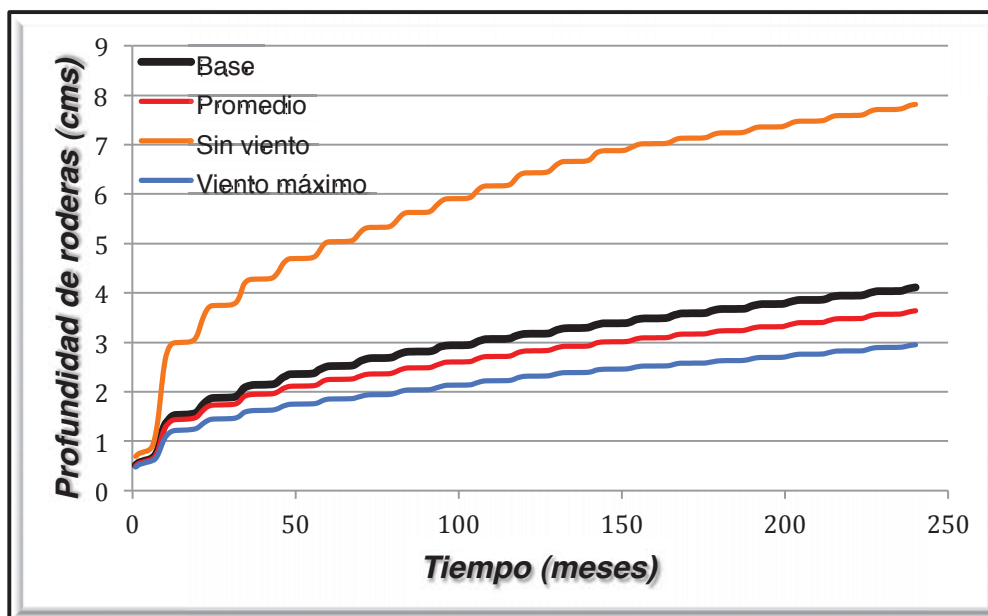


Figura 2.30 Roderas finales presentadas debido a la velocidad del viento en clima seco con estación en Phoenix.

Tabla 2.12 Deformaciones permanentes (roderas) (cm) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por velocidad del viento.

<i>Estación</i>	<i>Caso base</i>	<i>Viento promedio</i>	<i>Viento nulo</i>	<i>Viento máximo</i>
Birmingham	2.29	2.27	5.4	1.83
Miami	2.27	2.24	8.31	1.85
El Paso	1.16	1.07	3.64	0.85
Phoenix	4.11	3.64	7.82	2.95
Portland	1.6	1.58	3.99	1.33

d) Módulos

El análisis de los módulos nos indica la factibilidad de utilizar la velocidad de viento promedio para llevar a cabo los análisis, ya que como se puede apreciar en las gráficas, la variación de los módulos a viento promedio nos presenta una buena correlación respecto al caso base (figura 2.31). La figura 2.32 nos muestra la importancia que tiene la velocidad de viento sobre los módulos de la carpeta asfáltica, ya que se aprecia la gran variación que tienen cuando no hay viento en la zona.

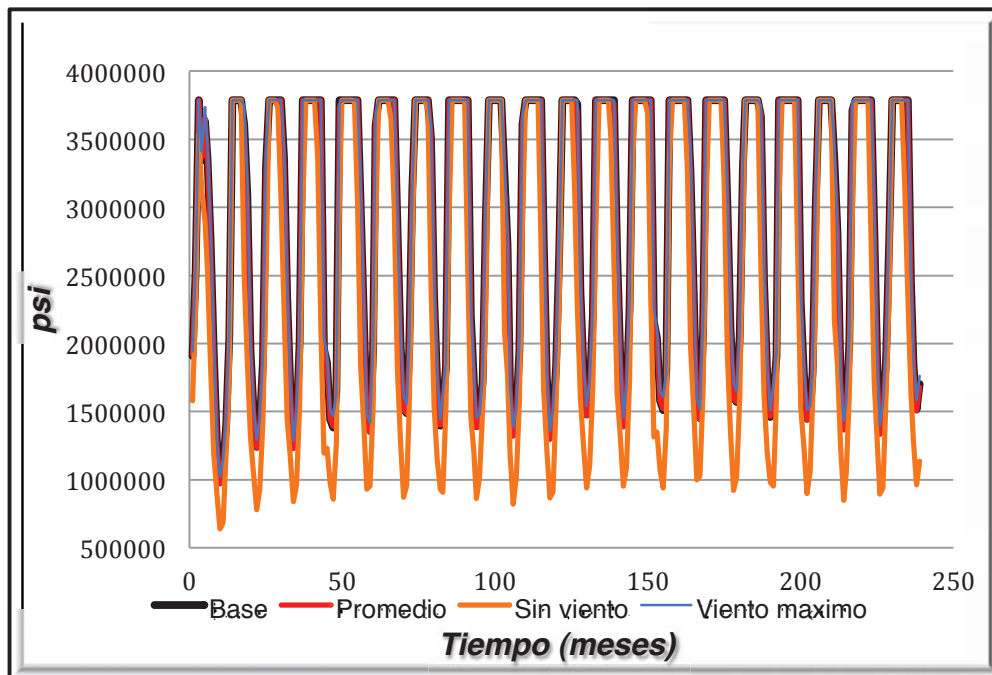


Figura 2.31 Módulos presentados debido a la velocidad del viento en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

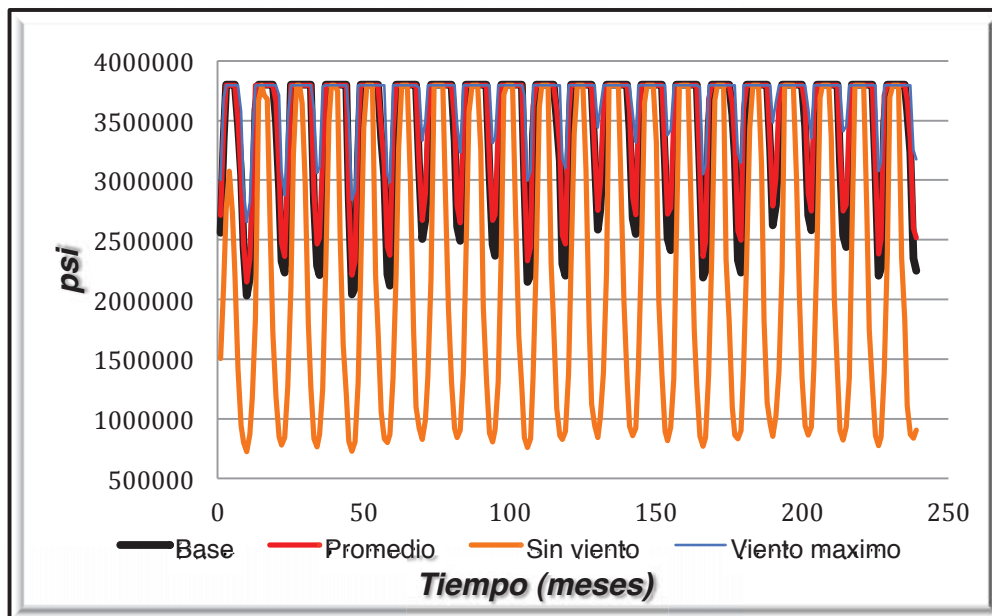


Figura 2.32 Módulos presentados debido a la velocidad del viento en clima seco con estación en El Paso.

2.6.4. Radiación solar (Nubosidad)

El análisis sobre la radiación solar se basó en que no se contara con dicho valor o que se contara con un valor diario que fuera el promedio que se presento en el día. Los análisis que se realizaron para comparación con el caso base fueron: eliminar el valor de radiación sobre la zona, para lo cual se distribuyó el valor de 0 a lo largo del periodo de datos con que se cuenta, otros de los análisis fueron sustituyendo los valores por 75 y 100, para finalizar con el valor promedio que se presentará a lo largo del día distribuido a lo largo de las 24 horas.

a) Agrietamientos

El análisis de sensibilidad para el agrietamiento longitudinal mostró diferencias notables respecto a los estudios anteriores, empezando por que el valor que venía mostrando una buena correlación que era el promedio del valor analizado en este estudio no se apego de la manera que lo venía haciendo al caso base, aun así se considera que el valor del promedio sigue siendo la opción más viable debido a lo mostrados en los casos anteriores. La tabla 2.13 nos muestra el resumen de los valores al finalizar el tiempo de análisis. En esta tabla se muestra como para el caso de Phoenix todos los análisis se dispersan al valor base, sin embargo se puede apreciar como dejando de lado el caso de Phoenix, ya que la otra estación analizada en clima seco (El Paso) presentó buena correlación hacia los valores del promedio, esto se puede apreciar en los demás estudios como por ejemplo, el clima cálido-húmedo con estación en Birmingham presenta una diferencia al valor promedio de 0.88% más respecto al caso base que es de 6.36% (figura 2.33). La figura 2.34 muestra la gráfica de resultados para el clima templado-lluvioso con estación en Portland.

El agrietamiento en piel de cocodrilo mejora el comportamiento hacia el valor de la radiación promedio, aunado a esto los valores sobre el porcentaje de daño son menores a los observados en el agrietamiento longitudinal. Entre estos valores se puede apreciar el caso del clima templado-lluvioso con estación en Portland la cual

tiene una diferencia respecto al caso base de 0.05% menor, cuando el caso base presenta un valor de 1.69% (figura 2.35). Se puede apreciar también uno de los valores con mayor diferencia el cual es el del clima cálido-húmedo donde esta diferencia es de 0.53% mayor al caso base cuando este presenta 7.91% al finalizar el estudio (figura 2.36). En la tabla 2.14 se observa como nuevamente el valor del clima seco con base en Phoenix se vuelve a salir de los parámetros.

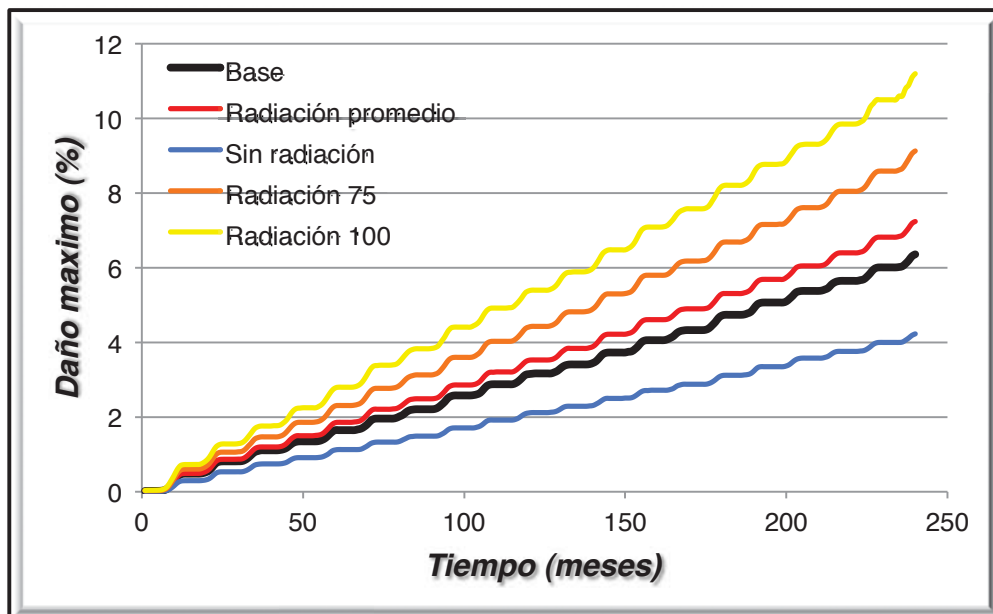


Figura 2.33 Agrietamiento longitudinal presentado debido a la nubosidad en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham.

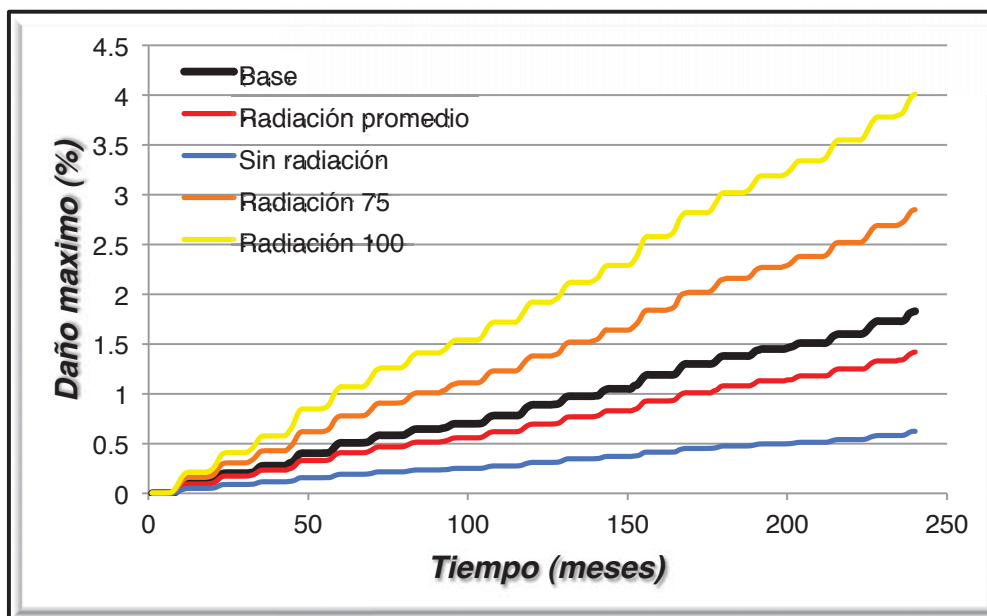


Figura 2.34 Agrietamiento longitudinal presentado debido a la nubosidad en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

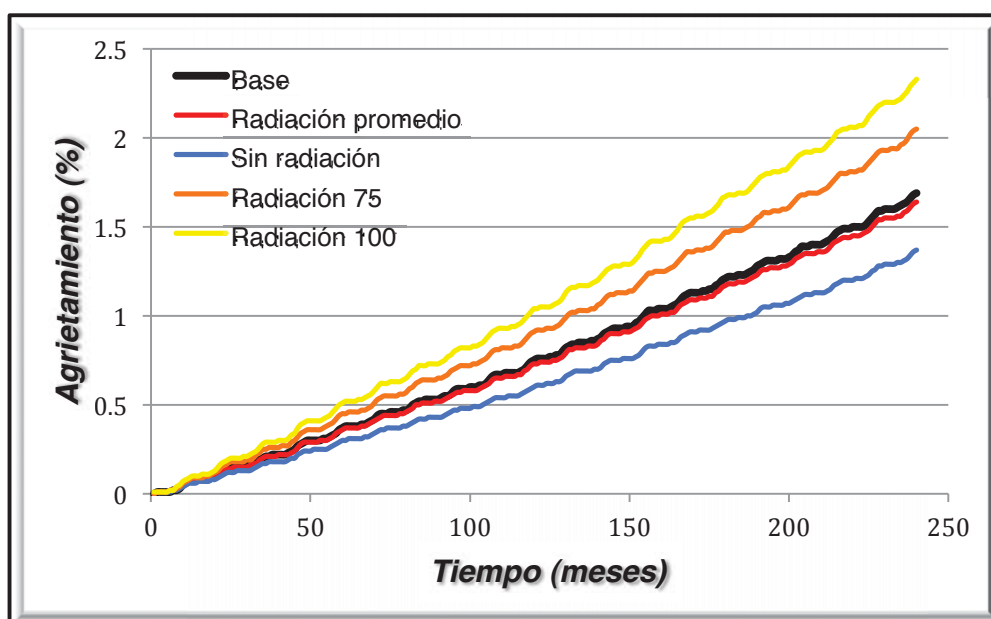


Figura 2.35 Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la nubosidad en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

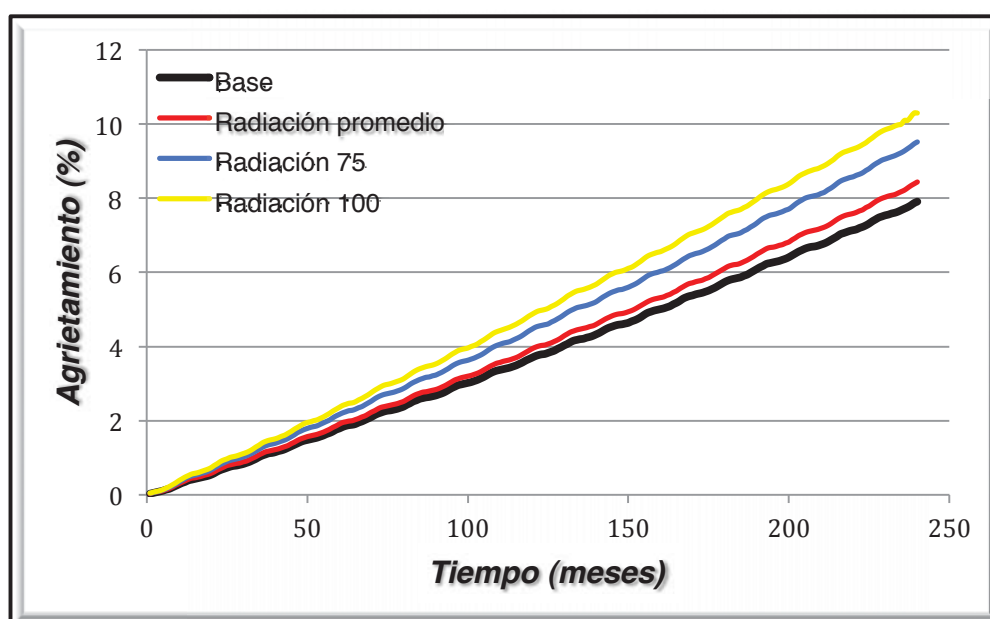


Figura 2.36 Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la nubosidad en clima cálido-húmedo con estación en Miami.

Tabla 2.13 Agrietamiento longitudinal (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por nubosidad.

Estación	Caso base	Radiación 0	Radiación 75	Radiación 100	Radiación promedio
Birmingham	6.36	4.23	9.13	11.2	7.24
Miami	46.1		70.2	82.8	53.8
El Paso	53.9		60.7	70.9	56.3
Phoenix	81.8	5.44	7.6	8.34	7.18
Portland	1.83	0.623	2.85	4.01	1.42

Tabla 2.14 Agrietamiento en cocodrilo (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por nubosidad.

<i>Estación</i>	<i>Caso base</i>	<i>Radiación 0</i>	<i>Radiación 75</i>	<i>Radiación 100</i>	<i>Radiación promedio</i>
Birmingham	3.03	2.81	3.51	3.82	3.2
Miami	7.91		9.52	10.3	8.44
El Paso	7.11		7.64	8.46	7.28
Phoenix	9.5	2.6	2.85	3	2.78
Portland	1.69	1.37	2.05	2.33	1.64

b) IRI

Las variaciones del IRI debidas a la modificación de la radiación solar presentaron un comportamiento adecuado casi para todos los casos, para los cuales, la variación en el clima cálido-húmedo presentó una buena adaptación como se puede ver en el caso de la estación de Miami donde la variación del análisis con radiación promedio fue de 0.01 mm/m comparado con el caso base que fue de 1.90 mm/m (figura 2.37). Por otro lado el caso del clima seco con estación en Phoenix presentó un resultado nada esperado ya que el promedio no fue el que se comportó de mejor manera (figura 2.38). La tabla 2.15 muestra un resumen de resultados al finalizar el análisis en donde se aprecia que el clima templado-lluvioso sigue presentando una buena correlación.

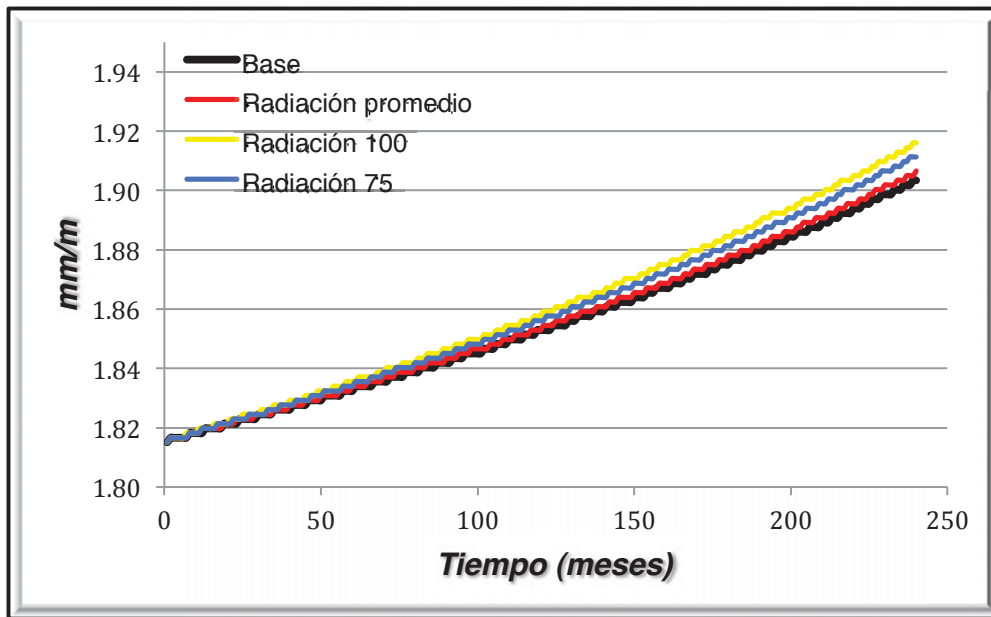


Figura 2.37 Iri presentado debido a la nubosidad en clima cálido-húmedo con estación en Miami.

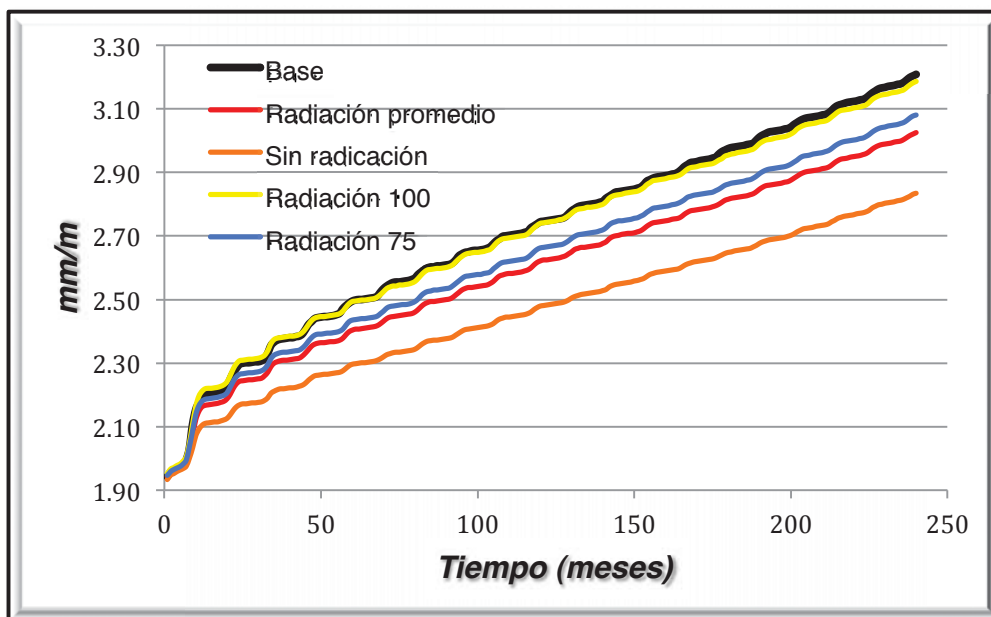


Figura 2.38 Iri presentado debido a la nubosidad en clima seco con estación en Phoenix.

Tabla 2.15 Rugosidad (iri) (mm/m) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por nubosidad.

<i>Estación</i>	<i>Caso base</i>	<i>Radiación 0</i>	<i>Radiación 75</i>	<i>Radiación 100</i>	<i>Radiación promedio</i>
Birmingham	2.88	2.8	2.97	3.04	2.9
Miami	1.9		1.91	1.92	1.91
Phoenix	3.21	2.83	3.08	3.19	3.03
Portland	2.65	2.58	2.69	2.74	2.63

c) Roderas

Las deformaciones permanentes (roderas) siguieron con el patrón de comportamiento de la radiación solar (nubosidad), el cual es, resultados aceptables para la mayoría de los casos, exceptuando el clima seco con estación en Phoenix la cual siguió los resultados que se vienen presentando en los otros factores de falla, en la tabla 2.16 se muestra un resumen de resultados para los diferentes análisis. En contra parte la estación que presentó mejor comportamiento hacia el valor promedio de la radiación es la ubicada en El Paso, clima seco también (figura 2.39), en la cual la diferencia es de 0.02 cm respecto al caso base. Se aprecia como nuevamente el clima templado-lluvioso presenta una correlación tolerable en la cual su diferencia con el caso base es de 0.09 cm (figura 2.40).

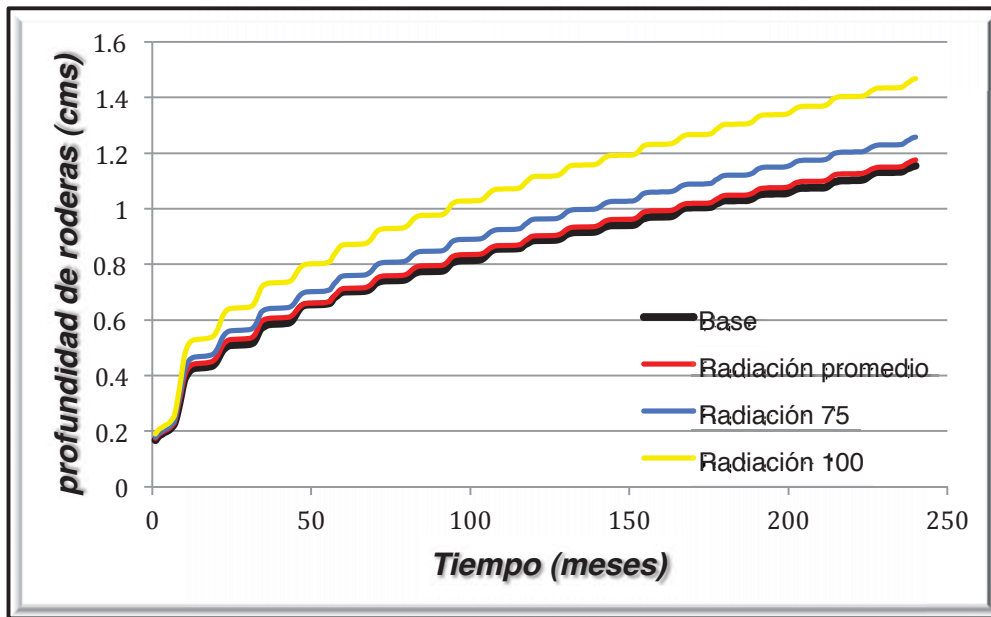


Figura 2.39 Roderas finales presentadas debido a la nubosidad en clima seco con estación en El Paso.

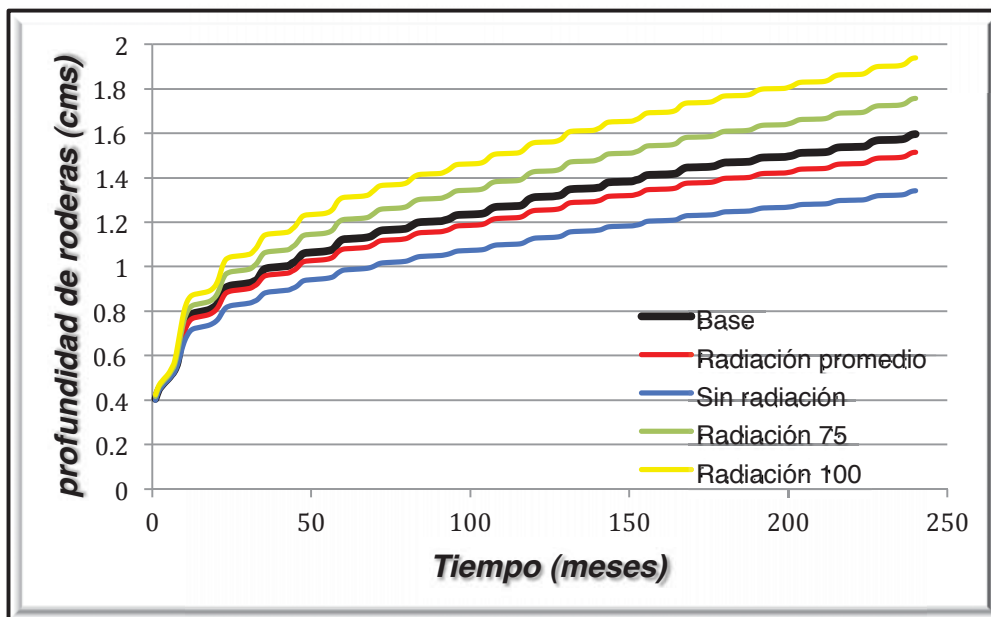


Figura 2.40 Roderas finales presentadas debido a la nubosidad en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

Tabla 2.16 Deformaciones permanentes (roderas) (cm) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por nubosidad.

Estación	Caso base	Radiación 0	Radiación 75	Radiación 100	Radiación promedio
Birmingham	2.29	1.98	2.64	2.93	2.37
Miami	2.27	5.03	2.99	3.44	2.48
El Paso	1.16	N. E.	1.26	1.47	1.18
Phoenix	4.11	2.81	3.79	4.21	3.57
Portland	1.6	1.34	1.76	1.94	1.51

d) Módulos

El análisis de los módulos nos indica la factibilidad de utilizar la radiación solar promedio para llevar a cabo los análisis, aunado a esto fue el que presentó variaciones menores en casi todos los análisis, se muestra en la figura 2.41 el comportamiento admisible de la estación en Phoenix. Además la figura 2.42 muestra el comportamiento de los módulos de la carpeta asfáltica en el clima cálido-húmedo.

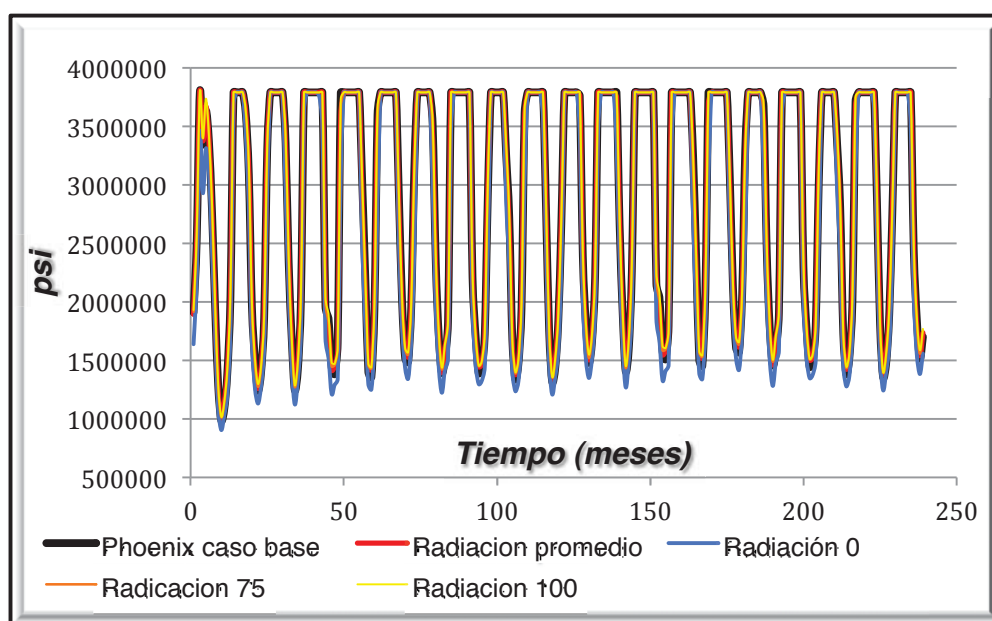


Figura 2.41 Módulos presentados debido a la nubosidad en clima seco con estación en Phoenix.

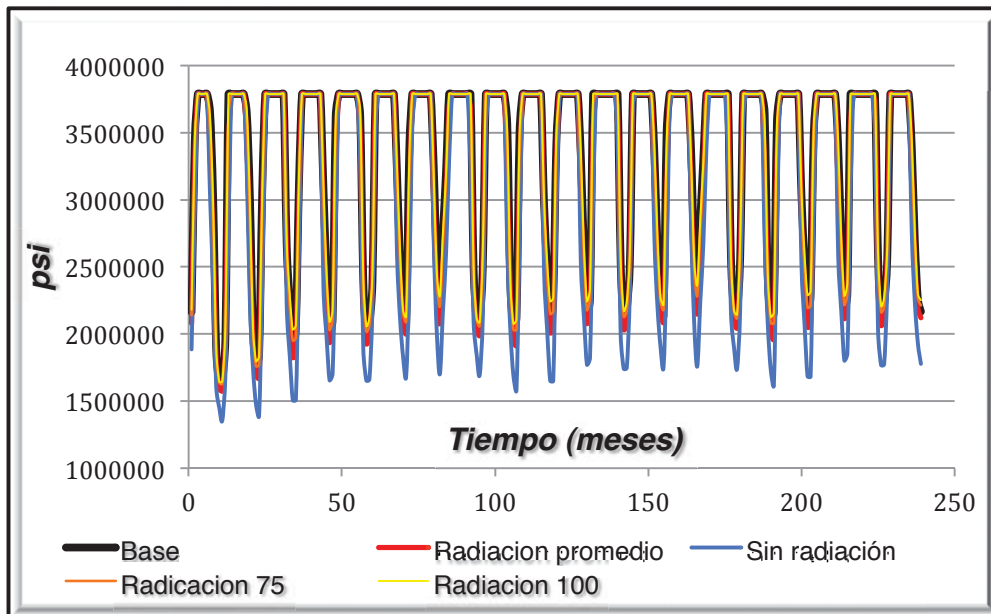


Figura 2.42 Módulos presentados debido a la nubosidad en clima cálido-húmedo con estación en Birmingham.

2.6.5. Humedad relativa

Los análisis sobre humedad relativa que se llevaron a cabo fueron tres diferentes, los cuales se realizaron considerando que no se llegará a contar con este valor, entonces suponer cierto valor de humedad para el lugar. Los valores que se propusieron fueron humedad relativa de 25%, 50% y 75%, con estos se siguió el mismo procedimiento que se ha venido realizando, sustituir los valores de la base de datos por alguno de estos a lo largo de las 24 horas.

Los resultados arrojados debido a la humedad relativa son los mismos para la mayoría de los casos en donde no se presenta variación alguna por el cambio en la variable analizada, exceptuando la estación de Phoenix la cual nos presenta una discrepancia respecto al valor del caso base, pero la cual no presenta el mismo resultado para los otros análisis. De este caso en el clima seco queda fuera el análisis de los módulos, el

cual se comporta como los demás estudios, el mismo resultado para todas las variaciones.

Se presentan dos gráficas sobre cada causa de falla estudiada, las cuales representan el clima templado-lluvioso con base en la ciudad de Portland y sobre el clima seco en Phoenix. Además se agrega una tabla con los valores finales de los diferentes análisis de las gráficas mostradas.

a) Agrietamientos

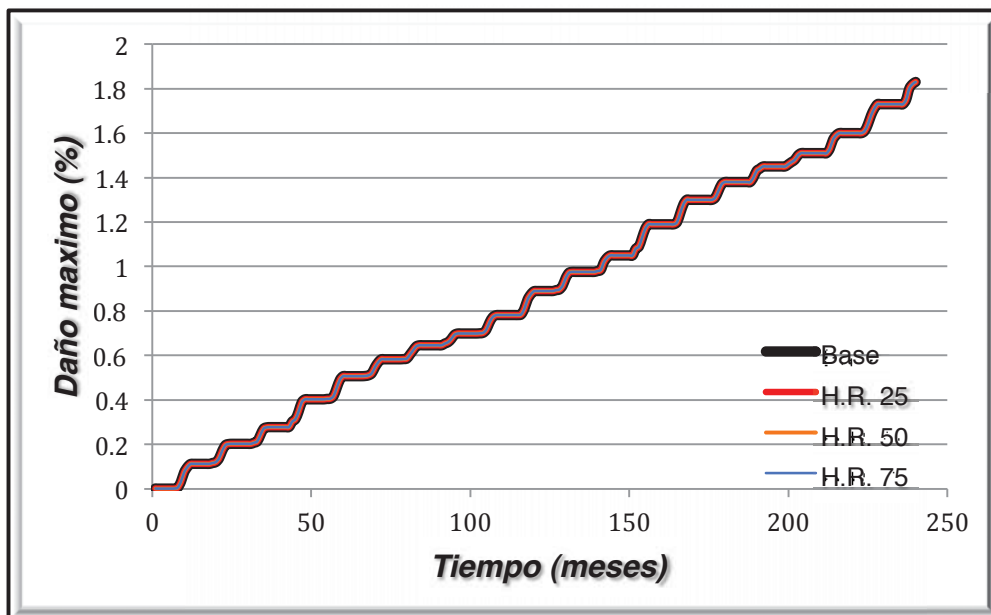


Figura 2.43 Agrietamiento longitudinal presentado debido a la humedad relativa en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

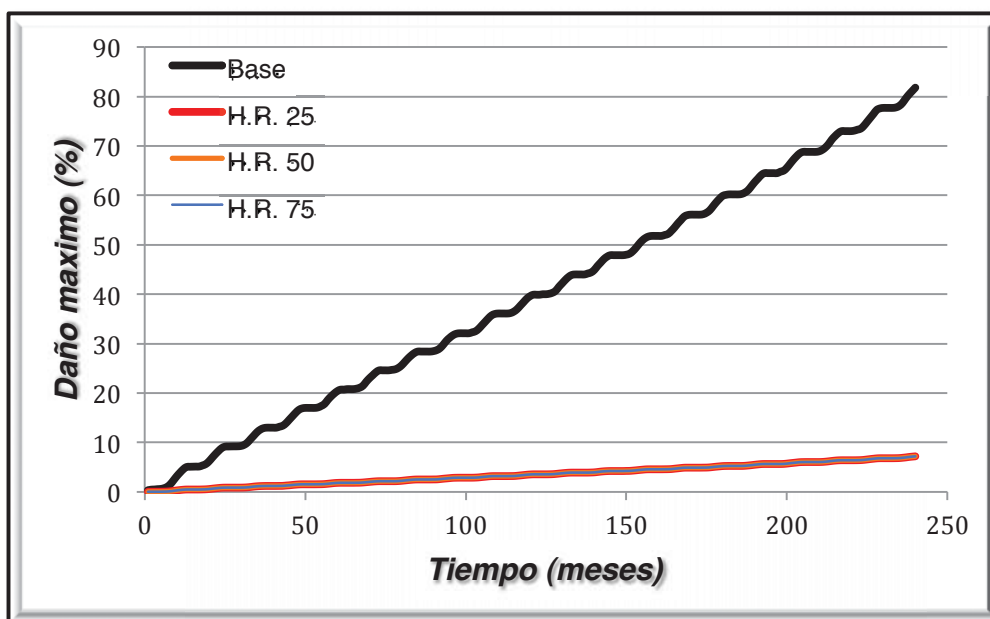


Figura 2.44 Agrietamiento longitudinal presentado debido a la humedad relativa en clima seco con estación en Phoenix.

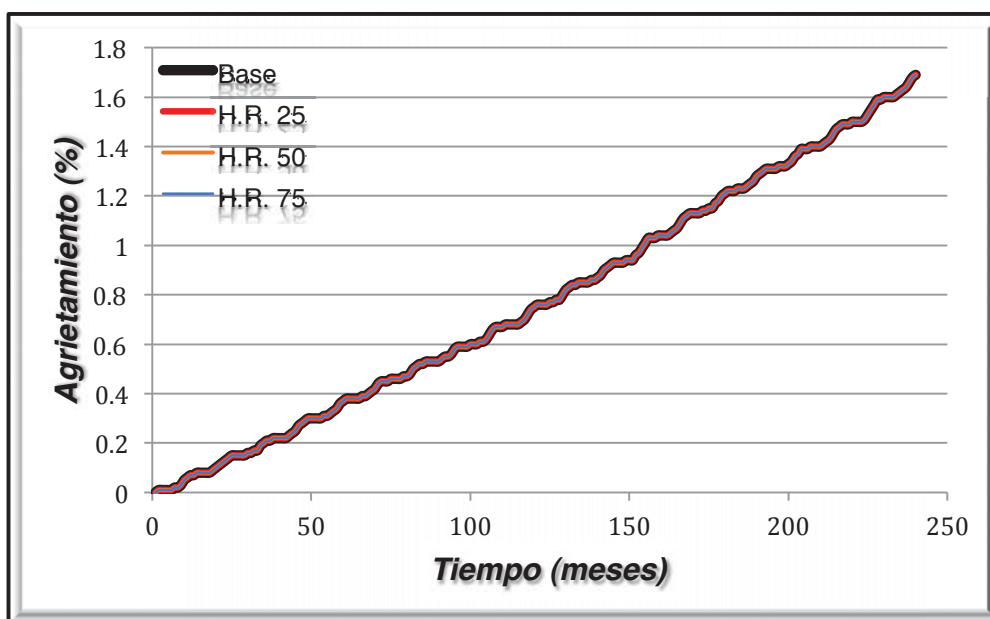


Figura 2.45 Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la humedad relativa en lima templado-lluvioso con estación en Portland.

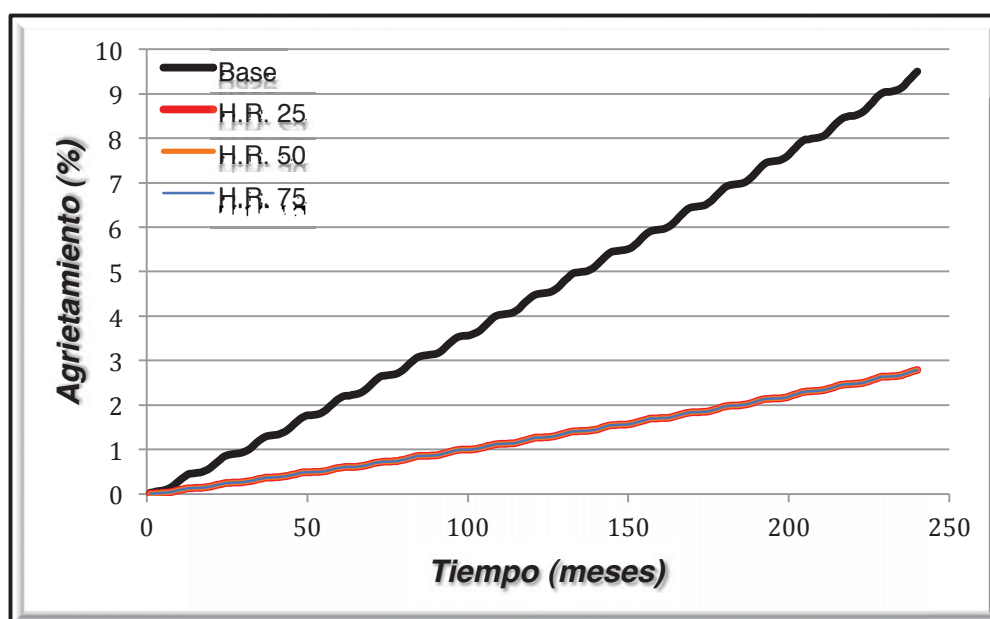


Figura 2.46 Agrietamiento en cocodrilo presentado debido a la humedad relativa en lima seco con estación en Phoenix.

Tabla 2.17 Agrietamiento longitudinal (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por humedad relativa.

Estación	Caso base	H.R.25	H.R.50	H.R.75
Phoenix	81.8	7.2	7.2	7.2
Portland	1.83	1.83	1.83	1.83

Tabla 2.18 Agrietamiento en cocodrilo (%) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por humedad relativa.

Estación	Caso base	H.R.25	H.R.50	H.R.75
Phoenix	9.5	2.79	2.79	2.79
Portland	1.69	1.69	1.69	1.69

b) Iri

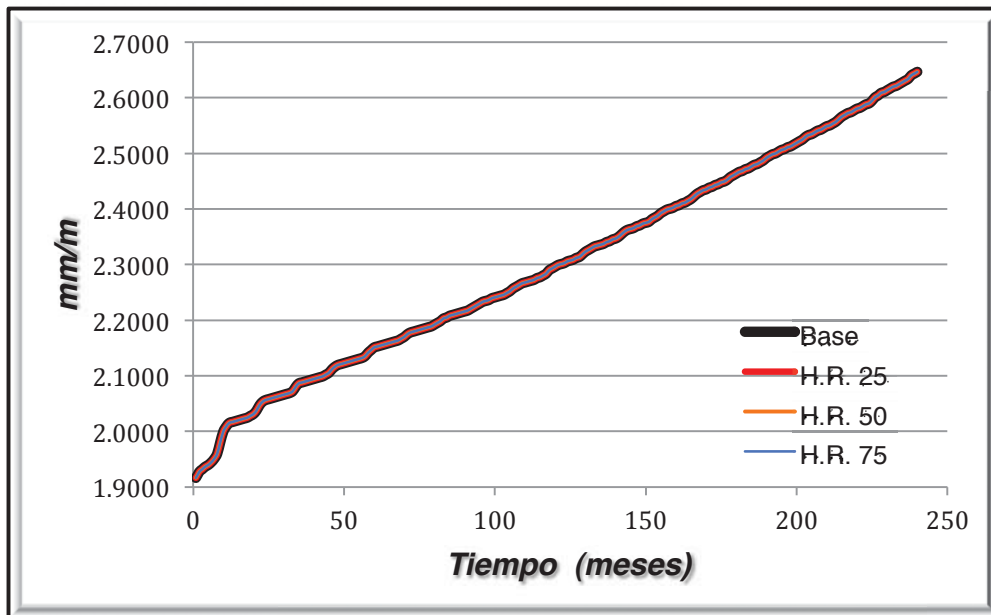


Figura 2.47 Iri presentado debido a la humedad relativa en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

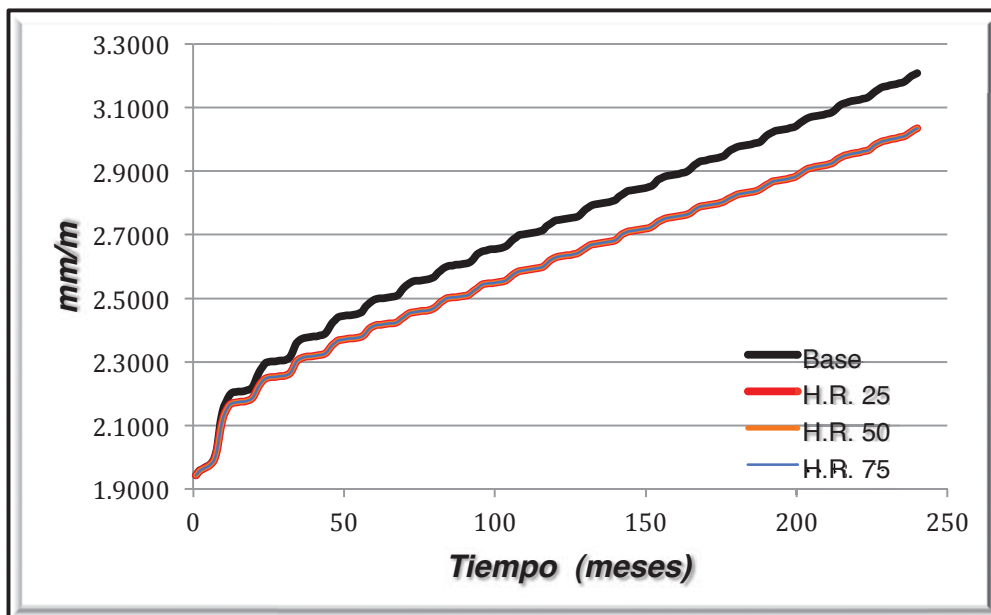


Figura 2.48 Iri presentado debido a la humedad relativa en clima seco con estación en Phoenix.

Tabla 2.19 Rugosidad (iri) (mm/m) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por humedad relativa.

Estación	Caso base	H.R.25	H.R.50	H.R.75
Phoenix	3.21	3.03	3.03	3.03
Portland	2.65	2.65	2.65	2.65

c) Roderas

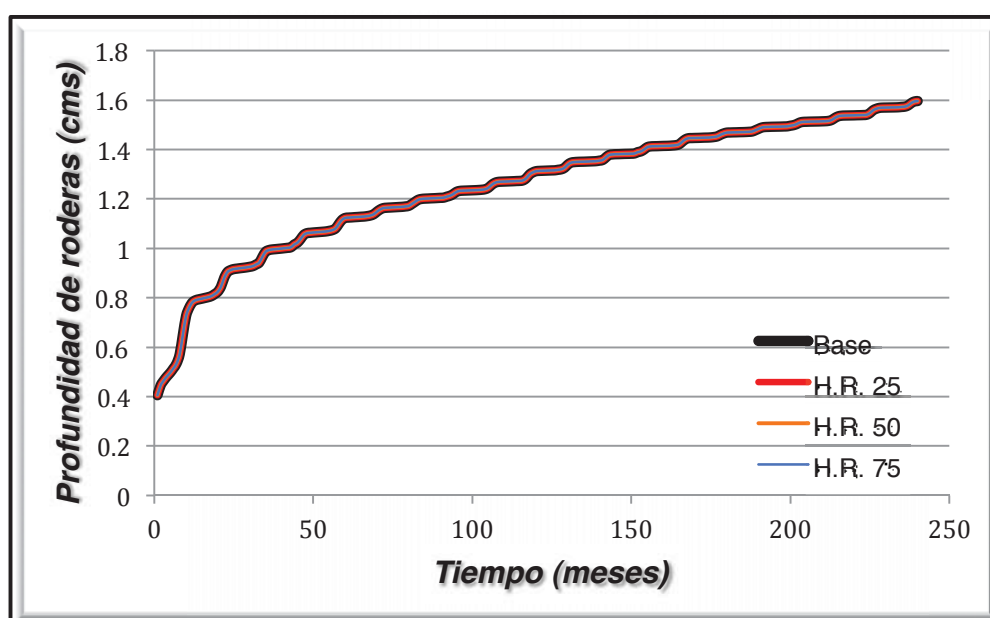


Figura 2.49 Roderas finales presentado debido a la humedad relativa en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

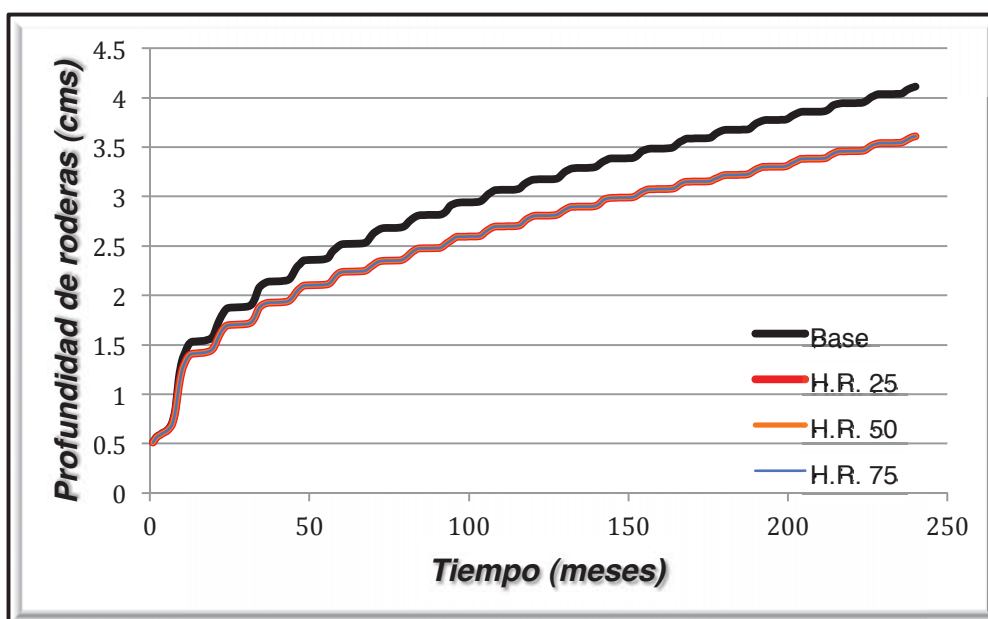


Figura 2.50 Roderas finales presentado debido a la humedad relativa en lima seco con estación en Phoenix.

Tabla 2.20 Deformaciones permanentes (roderas) (cm) al finalizar el periodo de análisis debido a la sensibilidad por humedad relativa.

Estación	Caso base	H.R.25	H.R.50	H.R.75
Phoenix	4.11	3.61	3.61	3.61
Portland	1.6	1.6	1.6	1.6

d) Módulo

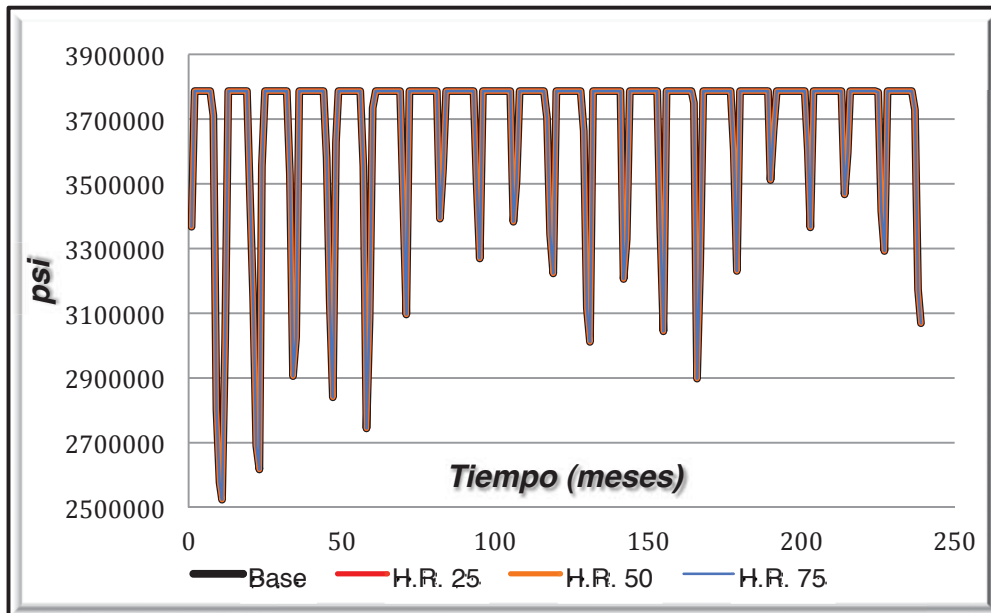


Figura 2.51 Módulos presentados debido a la humedad relativa en clima templado-lluvioso con estación en Portland.

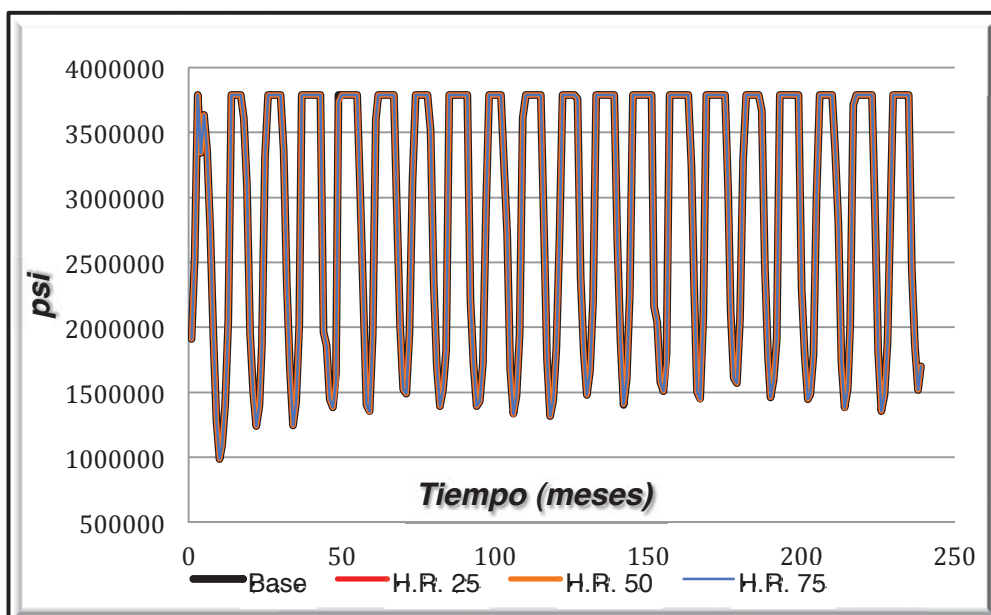


Figura 2.52 Módulos presentados debido a la humedad relativa en clima seco con estación en Phoenix.

2.7. Análisis de resultados.

El EICM es un programa muy extenso que se compone de varios programas que transfieren resultados entre si para de esta forma proporcionarle a la Guía de Diseño de Pavimentos E-M algunos de los datos que requiere como son: los contenidos de humedad, temperatura, presión de poro y el empuje por deshielo en la estructura. Al igual que la guía E-M el EICM realiza análisis mecanicistas, pero estos en función del calor y el flujo de humedad, esto simula los cambios en el comportamiento y características del pavimento y capas de material inducidos por los factores climáticos.

El análisis de sensibilidad realizado nos sirvió para saber si podíamos, o no, contar con las estaciones climatológicas convencionales para los análisis que se fueran a realizar en la Guía de Diseño de Pavimentos E-M, hay que tener en cuenta que las estaciones convencionales solamente nos proporcionan una mínima cantidad de datos comparadas con las estaciones automatizadas, pero también esta red de estaciones es la mas grande a nivel nacional, asimismo debemos tener en cuenta que estas estaciones no proporcionan todos los datos que requiere la guía E-M, ya que solamente cuentan con precipitación, temperatura máxima y mínima, la nubosidad la maneja en una forma que se podría interpretar como 100%, 50% ó 0%, pero no cuentan con el valor de velocidad del viento y tampoco humedad relativa.

A pesar de las limitaciones que ofrecen las estaciones convencionales comparadas con las automatizadas, podrían ser consideradas como opción de análisis, principalmente porque en la guía E-M la parte relacionada al análisis climático lo maneja solamente en un nivel 3 sin darnos opción a modificarlo, esto quiere decir que se considera con poca certeza ya que el clima no se comporta siempre de la misma manera, tiende a presentar ciclos de altas y bajas pero no es nada seguro. Por lo tanto se considera que se podrían llegar a utilizar los valores de estas estaciones ya sea para complementar datos faltantes de las estaciones automatizadas principalmente, para realizar interpolaciones con otras estaciones, o de igual manera, que sean estas las que provean de valores al hcd. Se debe considerar que para

emplear los valores de las estaciones convencionales hay que conseguir valores de velocidad de viento promedio en la zona de análisis así como de humedad relativa.

Con lo realizado en el análisis podríamos recapitular lo siguiente respecto a como utilizar los valores de las estaciones convencionales:

- Los valores que se tienen de precipitación se manejarán a las 8 am o en alguna hora que cada analista considere adecuado, lo que interesa es ingresarle al EICM el dato de precipitación que se presentó en el día.
- La temperatura requiere de un trabajo mas complejo ya que se tiene que realizar el ajuste que se mencionó para así poder obtener perfiles aproximados en el día.
- Para los valores de velocidad del viento, a pesar de que no se cuenta con ellos en las estaciones convencionales, se puede emplear el promedio que se presenta diario en la zona de estudio, para lo cual habrá que investigar los valores que se necesitan.
- En cuanto a los valores de nubosidad, algunas estaciones manejan datos como 0, 1 ó 2, los cuales se podrían interpretar como 0%, 50% y 100%, para fines del análisis. En caso de que no se cuente con ellos emplear valores de 25% a 50% dependiendo de la zona donde se lleve a cabo el estudio.
- Finalmente para el caso de los valores de humedad relativa, estos datos no interfirieron mucho en el análisis de sensibilidad que se realizó, algo que no se entiende del todo ya que una de las funciones del EICM es calcular los perfiles de humedad de la estructura. Para lo cual se recomienda obtener los valores promedios diarios para la zona en estudio.

Con las recomendaciones anteriores no se logrará un análisis como si se tuvieran los datos de estaciones automatizadas que obtienen valores cada 15 min de los parámetros que se necesitan, pero en caso de necesitar algo y no contar con los otros datos puede ser una opción y contemplar que se maneja un margen de error.

CAPÍTULO

3

GENERACIÓN DE LOS ARCHIVOS CLIMÁTICOS PARA MÉXICO

3.1. Estaciones climáticas

En México existen dos clases de estaciones climatológicas: estaciones convencionales y estaciones automatizadas. La red de estaciones convencionales es mucho más grande y más antigua, pero proporciona datos de menos variables ambientales, los cuales se describirán más adelante. Las estaciones automatizadas son más modernas, se cuenta con un número menor a lo largo del territorio nacional y de igual manera la cantidad de datos en años es menor, pero estas proporcionan los datos que se requieren para que la guía funcione adecuadamente.

3.1.1. Estaciones convencionales:

La red de estaciones convencionales es la más grande dentro del país contando con 5270 estaciones climatológicas (tabla 3.1) distribuidas por todo

el país, pero de las cuales en la actualidad se encuentran operando 3255. Dicha base de datos histórica se recopila en la Base de Datos Climatológica Nacional (BDCN) que es administrada en la Unidad del Servicio Meteorológico Nacional (USMN) la cual es una dependencia de la Comisión Nacional del Agua (CNA). Las estaciones climatológicas son responsabilidad de la CNA, la cual está organizada en 13 regiones hidrológicas con autonomía presupuestal y administrada para cada región.

La BDCN se maneja con el programa CLICOM, proporcionado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) que aunque poderoso, no está al alcance de todos los posibles usuarios.

Además del CLICOM, en el país se cuenta con otra herramienta informática para la extracción de datos de las estaciones convencionales, el cual es el Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC), dicho programa es distribuido por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Este programa contiene información del banco de datos histórico nacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Algunas estaciones tienen información desde 1900, aunque la mayoría de los datos (88.4%) corresponden al periodo de 1960 a 2007. Para algunas pocas estaciones se cuenta con información hasta 2008.

Las estaciones climatológicas convencionales miden diariamente a las 8 de la mañana diversos parámetros básicos, siendo los principales: la temperatura a las 8 de la mañana, la temperatura máxima y mínima de las últimas 24 horas y lo acumulado de precipitación y evaporación de las mismas. Además de los parámetros anteriores se toman observaciones como las del estado de nubosidad del cielo, si hubo granizo, helada, tormenta o neblina entre otras. Para medir la temperatura, tanto la ambiente como la máxima y mínima se utiliza un termómetro SIX. La precipitación se mide en pluviómetros ordinarios (de cubeta). La evaporación se mide en un

tanque de evaporación tipo “A”, y un micrómetro con el que se registra la disminución de la altura de la superficie del agua.

A continuación se muestra la tabla con el número de estaciones climatológica convencional por estado.

3.1.2. Estaciones Meteorológicas Automatizadas

Una Estación Meteorológica Automatizada (EMA) es un conjunto de dispositivos eléctricos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de forma automática. Una EMA está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están 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 (exceptuando la precipitación, esta variable es la suma aritmética del acumulado en los 10 minutos). Esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas por estación (SMN, 2010).

Estas estaciones entraron en funcionamiento en México desde mayo de 1999 y son administradas por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN).

Las variables que se pueden obtener de la estación EMA son las siguientes:

- Dir.- El valor dado es el promedio de 10 minutos de la dirección del viento. Esta dirección viene dada en grados, donde 0° es el norte verdadero (0,359).
- WSMDir.- Dirección del viento mas alto en el intervalo de 10 minutos, que haya tenido una duración mayor a 5 segundos, mismas unidades que Dir.
- WSK.- Velocidad de viento promedio de 10 minutos, está dado en Km/h (0.0, 234).

- WSMK.- Velocidad del viento máximo durante el intervalo de 10 minutos, con duración mayor a 5 segundos, está dado en Km/h (0.0, 234).
- AvgTemp.-Temperatura promedio del aire durante el intervalo de 10 minutos, en °C (-60.0, 60.0).
- AvgRh.- Humedad Relativa promedio durante el intervalo de 10 minutos, está dado en porcentaje (0,100).
- AvgBP.- Presión Barométrica promedio durante el intervalo de 10 minutos, está dado en milibares (mbar) (550.0, 1100.0).
- Rain.- Precipitación de lluvia acumulada de los últimos 10 minutos, está dado en mm (0.00, 50.0).
- AvgSR.- Densidad de flujo de energía de radiación solar, llamada también irradiancia, se reportan promedios de 10 minutos, está dado en W/m^2 , se usa un piranómetro marca Kipp&Zonen, modelo CM11, (0,1200), según el proveedor (-20, 1400).

Estos son las variables climatológicas que reportan la mayoría de las estaciones, algunas reportan las dos siguientes cada tres horas.

- Batt.- Batería, está dada en Volts.
- Spanel.- Panel solar, está dada en Volts.

Actualmente el SMN tiene bajo su control 133 estaciones a lo largo del territorio nacional, las cuales se tiene planeado que vayan aumentando a través de los años.

La tabla 3.2 muestra el número de estaciones meteorológicas automatizadas por estado que actualmente se encuentran transmitiendo datos climáticos.

Tabla 3.1 Estaciones convencionales a lo largo de la república Mexicana (Fuente: Elaboración propia con base en <http://smn.cna.gob.mx/modernizacion/modernizacionSMN.pdf>).

ESTADO	OPERATIVAS	NO OPERATIVAS	TOTAL
AGUASCALIENTES	62	22	84
BAJA CALIFORNIA	81	58	139
BAJA CALIFORNIA SUR	128	39	167
CAMPECHE	51	33	84
CHIAPAS	95	44	139
CHIHUAHUA	34	23	57
COAHUILA	156	96	252
COLIMA	90	211	301
DISTRITO FEDERAL	19	44	63
DURANGO	118	40	158
GUANAJUATO	114	44	158
GUERRERO	159	48	207
HIDALGO	170	37	207
JALISCO	157	109	266
MÉXICO	190	156	346
MICHOACÁN	107	100	207
MORELOS	69	15	84
NAYARIT	49	31	80
NUEVO LEÓN	146	19	165
OAXACA	133	209	342
PUEBLA	85	91	176
QUERÉTARO	42	21	63
QUINTANA ROO	42	18	60
SAN LUIS POTOSÍ	156	13	169
SINALOA	60	74	134
SONORA	146	119	265
TABASCO	65	34	99
TAMAULIPAS	168	25	193
TLAXCALA	39	22	61
VERACRUZ	137	172	309
YUCATÁN	61	26	87
ZACATECAS	126	22	148
TOTAL	3255	2015	5270

Tabla 3.2 Estaciones Meteorológicas Automatizadas (Fuente: Elaboración propia con base en <http://smn.cna.gob.mx/emas/catalogoa.html>).

ESTADO	ESTACIONES
AGUASCALIENTES	1
BAJA CALIFORNIA	7
BAJA CALIFORNIA SUR	5
CAMPECHE	6
CHIAPAS	2
CHIHUAHUA	12
COAHUILA	5
DISTRITO FEDERAL	5
DURANGO	5
GUANAJUATO	1
GUERRERO	7
HIDALGO	5
JALISCO	5
MÉXICO	6
MICHOACÁN	3
MORELOS	2
NAYARIT	2
NUEVO LEÓN	1
OAXACA	4
PUEBLA	4
QUERÉTARO	1
QUINTANA ROO	6
SAN LUIS POTOSÍ	3
SINALOA	3
SONORA	7
TABASCO	1
TAMAULIPAS	6
TLAXCALA	1
VERACRUZ	9
YUCATÁN	6
ZACATECAS	2

Además de las EMA's, también se encuentran las Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas (ESIME's), las cuales transmiten vía internet. Las ESIME's obtienen los mismos datos que las EMA's pero a los cuales se le agrega la temperatura del suelo, junto con la del aire a 2 metros sobre el nivel del terreno que se encuentra. De este tipo de estaciones hasta el momento se cuenta con 30 a lo largo de la república.

En la tabla se muestran 3.3 los estados que cuentan con estaciones ESIME's además de la localidad donde se encuentran ubicadas.

Además de las estaciones antes mencionadas en las cuales para obtener sus datos históricos hay que contactar al SMN para que se proporcione la información deseada. En la página del SMN en su sección de estaciones climáticas automatizadas (EMA's) se pueden visualizar estaciones adicionales a las que maneja el SMN, para las cuales respecto a datos históricos hay que contactar a la dependencia que la administra. En la página mencionada se pueden visualizar los valores de los datos que obtienen las estaciones automatizadas para dos días anteriores a la fecha de consulta aproximadamente, junto con el catálogo de estaciones que administra el SMN así como las coordenadas, elevación y fecha en que inició a transmitir datos de la estación.

Además de la página del SMN también se pueden conseguir los datos que se necesitan para realizar diseños en la guía de diseño de pavimentos E-M de la Red Nacional de Estaciones Estatales Agroclimatológicas del Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuarias (INIFAP).

Tabla 3.3 Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automatizadas (Fuente: Elaboración propia con base en <http://smn.cna.gob.mx/emas/catalogoa.html>).

ESTADO	NOMBRE
AGUASCALIENTES	AGUASCALIENTES
BAJA CALIFORNIA	SAN FELIPE
BAJA CALIFORNIA SUR	LORETO
CHIAPAS	ARRIAGA
CHIHUAHUA	NUEVO CASA GRANDES
COAHUILA	MONCLOVA
COAHUILA	PIEDRAS NEGRAS
COAHUILA	TORREÓN
COLIMA	COLIMA
DISTRITO FEDERAL	TACUBAYA
DURANGO	TEPEHUANES
GUANAJUATO	GUANAJUATO
HIDALGO	TULANCINGO
MICHOACÁN	MORELIA
MORELOS	CUERNAVACA
OAXACA	OAXACA
OAXACA	PUERTO ÁNGEL
QUINTANA ROO	FELIPE CARRILLO PUERTO
SAN LUIS POTOSÍ	SAN LUIS POTOSI
SAN LUIS POTOSÍ	TAMUÍN
SINALOA	CHOIX
SINALOA	CULIACAN
SONORA	CIUDAD OBREGÓN
SONORA	ALTAR
TAMAULIPAS	SOTO LA MARÍNA
TAMAULIPAS	CIUDAD VICTORIA
TLAXCALA	TLAXCALA
YUCATÁN	PROGRESO
YUCATÁN	VALLADOLID
ZACATECAS	SOMBRERETE

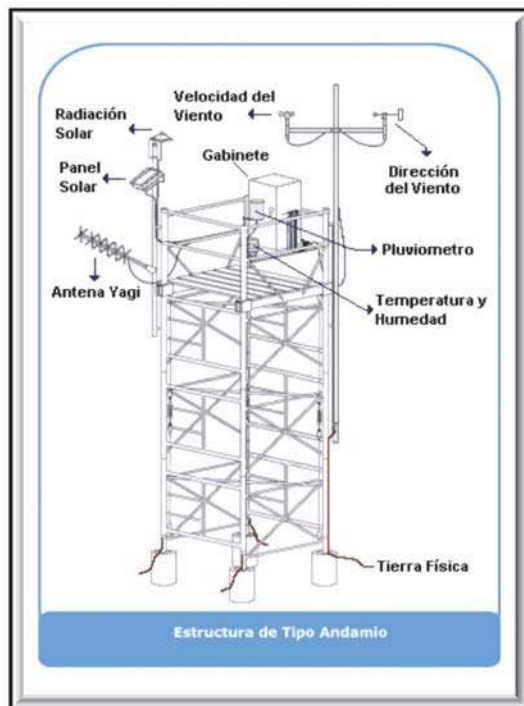


Figura 3.1 Estación automatizada tipo andamio
(Fuente: <http://smn.cna.gob.mx/emas/>).

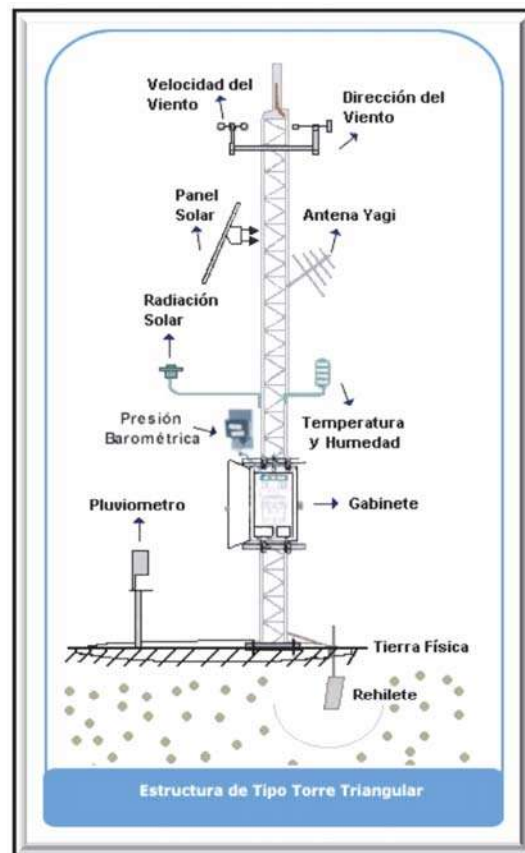


Figura 3.2 Estación automatizada tipo torre triangular
(Fuente: <http://smn.cna.gob.mx/emas/>).

3.2. Generación de estaciones virtuales con variables nacionales

En este apartado explicaremos la creación de los archivos hcd, en el formato que los requiere la Guía de Diseño de Pavimentos E-M con datos de estaciones Mexicanas.

Los datos históricos con los que se realizó este estudio fueron de tres estaciones meteorológicas automatizadas (EMA's) localizadas en regiones climáticas diferentes a lo largo de la república Mexicana. Las estaciones son:

- Estación del Servicio Meteorológico Nacional, México Distrito Federal. La cual está localizada en las coordenadas 19°24'13", -99°11'49" a una elevación de 2320 msnm. Esta estación comenzó a operar el 15 de abril de 1999.
- Estación en la colonia Obrera, Mérida, Yucatán. Localizada en las coordenadas 20°56'47", -89°39'06" a una elevación de 18 msnm. Esta estación comenzó a operar el 16 de abril del 2000.
- Estación de la Secretaría de la Defensa Nacional, Zacatecas. Localizada en las coordenadas 22°44'48", -102°30'22". Estación operando desde el 18 de abril del 2000.

3.2.1. Formato de los archivos climáticos

Los archivos climáticos de las diversas estaciones están almacenados por estación y estas están divididas por meses. La cantidad de datos que se encuentran en cada archivo puede variar ya que pueden contener un mes de datos (de esta forma están almacenados la mayoría), como dos a mas meses. Los archivos se encuentran en formato de Excel (.xls), solamente en algunas estaciones algún archivo se encuentra en formato .txt o .ORD, pero los cuales pueden ser leídos por medio de Excel. El orden dentro del archivo puede contener alguno de los que se muestra en las tablas 3.4 a 3.8.

Tabla 3.4 Formato de archivo climático de una Estación Meteorológica Automatizada la cuál no contiene unidades dentro de la misma (Fuente: Elaboración propia con base en archivos climáticos del Servicio Meteorológico Nacional).

Date	Time	Dir	WSMDir	WSK	WSMK	AvgTemp	AvgRh	AvgBP	Rain	AvgSR	Batt	SPanel
2000 Jun 01	00:00	220	224	12.8	18.9	18	71	776.7	0	63	13.5	13.8
2000 Jun 01	00:10	211	219	12.9	19.5	17.9	69	776.6	0	94		
2000 Jun 01	00:20	215	213	11.6	17.7	18	67	776.6	0	104		
2000 Jun 01	00:30	215	227	11.6	17.2	18.2	65	776.6	0	79		
2000 Jun 01	00:40	218	231	8.9	13.1	18.4	63	776.6	0	47		
2000 Jun 01	00:50	215	210	9	13.1	18.5	60	776.6	0	29		
2000 Jun 01	01:00	213	224	9.7	14.3	18.6	60	776.7	0	16		

Tabla 3.5 Formato de archivo climático de una Estación Meteorológica Automatizada la cuál contiene las unidades dentro de una fila en la misma (Fuente: Elaboración propia con base en archivos climáticos del Servicio Meteorológico Nacional).

Date	Time	Dir	WSMDir	WSK	WSMK	AvgTemp	AvgRh	AvgBP	Rain	AvgSR	Batt	SPanel
		deg	deg	kph	kph	C	%	mbar	mm	W/m^2	V	V
2008 Feb 01	12:00	94	85	3	5.1	-0.3	36	780.5	0	-5	13	0
2008 Feb 01	12:10	37	17	4.4	6.2	-0.1	38	780.5	0	-5		
2008 Feb 01	12:20	352	353	3.5	5.6	0.4	39	780.7	0	-4		
2008 Feb 01	12:30	347	348	3.5	6.2	1	41	780.7	0	-4		
2008 Feb 01	12:40	345	345	1.9	4.5	1.2	43	780.9	0	-5		
2008 Feb 01	12:50	343	343	3.3	6.8	1.1	49	781	0	-5		
2008 Feb 01	13:00	330	329	2.2	5.1	1.4	56	781.1	0	-5		

Tabla 3.6 Formato de archivo climático de una Estación Meteorológica Automatizada la cuál no contiene unidades he incluye el formato de fecha diferente (Fuente: Elaboración propia con base en archivos climáticos del Servicio Meteorológico Nacional).

fecha	DirViento	DirRafaga	RapViento	RapRafaga	TempAire	HumRelativa	PresBarometric	Precipitacion	RadSolar
01/01/09 16:00	285	297	4.3	21.2	16.3	41	780.8	0	451
01/01/09 16:10	305	284	9.4	20	16.5	40	780.8	0	486
01/01/09 16:20	292	284	9.9	19.5	16.6	40	780.7	0	537
01/01/09 16:30	294	287	8.8	20.6	16.6	40	780.8	0	529
01/01/09 16:40	298	309	11.9	26.4	16.4	40	780.7	0	533
01/01/09 16:50	306	291	11.7	20.6	16.8	40	780.6	0	628
01/01/09 17:00	296	294	5.8	17.7	17.2	39	780.5	0	642

Tabla 3.7 Formato de archivo climático de una Estación Meteorológica Automatizada la cuál no contiene unidades he incluye la localidad en los datos dentro de la misma (Fuente: Elaboración propia con base en archivos climáticos del Servicio Meteorológico Nacional).

nombre_estación	fecha	DirViento	DirRafaga	RapViento	RapRafaga	TempAire	HumRelativa	PresBarometric	Precipitacion	RadSolar
URUAPAN. MICH.	01/06/10 13:00	112	91	3.4	4.8	15.5	100	845.3	0	46
URUAPAN. MICH.	01/06/10 13:10	337	77	0.5	1.7	15.5	100	845.4	0	115
URUAPAN. MICH.	01/06/10 13:20	44	85	2.5	4.9	15.6	100	845.5	0	150
URUAPAN. MICH.	01/06/10 13:30	64	88	2.4	5.4	16	100	845.6	0	185
URUAPAN. MICH.	01/06/10 13:40	7	340	1.9	3.1	16.4	100	845.6	0	222
URUAPAN. MICH.	01/06/10 13:50	30	37	2.2	4.6	16.8	100	845.7	0	258
URUAPAN. MICH.	01/06/10 14:00	35	32	2.2	4.2	17	100	845.8	0	295

Tabla 3.8 Formato de archivo climático de una Estación Meteorológica. Automatizada con los datos en formato juliano (Fuente: Elaboración propia con base en archivos climáticos del Servicio Meteorológico Nacional).

Día	juliano:	1															
2	00:00	143	146	4.1	6.5	19.5	56	843.9	0	41							
2	00:10	143	154	4.7	6.3	18.8	56	844	0	21							
2	00:20	143	146	5	7.4	18.1	56	844.1	0	4							
2	00:30	133	143	3.9	5.7	16.8	63	844.2	0	0							
2	00:40	118	128	3.8	4.9	15.9	69	844.3	0	0							
2	00:50	68	97	3.7	6.3	14.8	75	844.3	0	0							
2	01:00	51	32	2.5	3.7	14.1	78	844.4	0	0							

En las tablas anteriores se puede apreciar la diferencia entre archivos, la tabla 3.4 es el formato en el que se encuentra la mayoría de los archivos históricos; notese que la diferencia entre la tabla 3.4 y la tabla 3.5 es que la segunda incluye las unidades en que se encuentran los datos. El formato de las tablas 3.6 y 3.7 es muy similar, conteniendo el mismo orden en los datos que las anteriores pero en estos las leyendas se encuentran en español, junto a esto el formato de la fecha y hora esta contenido en una sola celda. Además en la tabla 3.7 se incluye en la primera columna el lugar donde se encuentra localizada la estación, este formato es en el que la mayoría de los datos del 2010 se encuentran. La tabla 3.8 muestra la fecha en formato juliano, la cual el orden de sus columnas en cuanto a los datos climáticos se refiere es el mismo que en la tabla 3.4.

3.3. Adaptación de datos

En esta sección se tratará de explicar el procedimiento seguido para realizar la adaptación de los datos históricos con que se cuentan en las EMA's, además de las consideraciones a tener en cuenta al momento de generar un archivo con el formato que debe tener el archivo hcd.

Cabe mencionar que debido a la gran cantidad de datos que se tenían por estación (aproximadamente 500,000 filas por estación con 10 años de datos) para realizar este procedimiento nos auxiliamos de dos hojas de cálculo en Microsoft Excel. Los archivos se nombraron “prehcd” & “traslapos y desfases”, en los cuales a grades rasgos se realizó el siguiente procedimiento y consideraciones:

En el archivo “prehcd”.

- i) Concentración de datos.- Primeramente se copiaron los datos de todos los archivos históricos de la estación que se va a estudiar en la pestaña “reducción”, teniendo en cuenta que los datos deben ir ordenados por fecha de acuerdo al dato más antiguo, es decir, si el primer mes que se tenga de la

estación es el 15 de mayo del 2004, ese será el primer mes que vaya en la hoja, y de ahí se seguirán los demás.

- a) Solamente copiar los valores hasta la radiación solar, ya que en varios archivos los otros dos valores no se utilizan, además de que no son de uso en este estudio.
 - b) Debido a que en algunas estaciones no se tienen datos de algún mes ó meses, se debe seguir con el inmediato del que se tenga registro alguno, el relleno de datos faltantes se realizará más adelante.
 - c) El formato de la mayoría de los datos es el que se mencionó anteriormente, así que las hojas están programadas para que realicen las operaciones de acuerdo al orden de las columnas que tienen en la tabla 3.4, debido a que es el más usual en los datos, así que se debe de revisar que el orden sea el correcto.
 - d) En el caso del formato de la tabla 3.6, como este contiene la hora integrada en la columna de la fecha, al momento de pegar los datos en la hoja se debe de dejar el espacio de esa columna el blanco para que los demás valores coincidan en el orden que se tiene en la tabla 3.4, la hoja se encarga de obtener la hora de la primer columna.
 - e) En algunos archivos del 2008 (fue donde se encontró este cambio) la columna de precipitación está intercambiada con la de presión barométrica, entonces solamente pegar la columna de precipitación en la de presión, debido a que la presión para este estudio no tiene efecto alguno.
- ii) Reducción de datos.- Es decir, se tienen datos climáticos cada 10 min, entonces se realiza una reducción para que ahora se encuentren en la hora en punto, pero para esto los valores que se encuentran dentro de una hora se realiza el promedio de estos colocandose en la hora en punto, exceptuando la presipitación ya que de esta se realiza la suma aritmética de la lluvia que se haya presentado en esa hora.

- a) La reducción y acomodo de datos se realizó en la hoja “prehcd”, la pestaña “reducción” realiza la labor anteriormente mencionada, solamente tener en cuenta que la última fila de fórmulas (revisar que sea la última debido a que algunas fórmulas son exclusivas para los primeros valores) arrastrarla hasta el número de filas que se tenga.
 - b) Después se realiza un filtro en la columna “X”, que contiene los valores de fecha, donde se dejan fuera los espacios vacíos, esto para que queden concentrados los valores de la hora en punto con sus respectivos valores climáticos que nos interesan en el estudio.
 - c) De ahí se realizó una macro que copiara los valores a la hoja filtro llamada “filtro_interlineal”, esto debido a que la cantidad de datos que contiene la hoja de cálculo llega a presentar la leyenda indicando que no tiene recursos suficientes para realizar la operación si se intentan copiar todos los valores filtrados, entonces nos ayudamos de una macro que los lleva de la hora reducción a la hoja filtro, tomando valores del filtro de cada 40,000 filas, lo que nos da resultado de aproximadamente 6,500 valores concentrados por hora.
 - d) De aquí se copian los datos a la pestaña “Cálculo”, teniendo en cuenta que el filtro pega los valores cada 10,000 líneas, entonces solamente copiarlos para que queden sin espacio.
- iii) Conversión de unidades.- En cuanto a la conversión de unidades se refiere, se transforman los valores que se encuentren en sistema métrico al inglés (precipitación y temperatura). Respecto a la radiación solar, como la guía requiere porcentaje de nubosidad y nosotros tenemos irradiancia debido a que es el valor que toman las EMA's se realiza una conversión para así tener un porcentaje de nubosidad en el lugar, los otros dos valores se utilizaron como se encuentran en los archivos, ya que se tiene en porcentaje y la Guía de Diseño de Pavimentos E-M lo utiliza de esta manera.

- a) Este procedimiento se realiza en la pestaña “Cálculo”, para eso los valores que debemos tener deben tener el orden de la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Formato de datos climático dentro de la pestaña cálculo (Fuente: Elaboración propia con base en archivo de Excel “prehcd”).

Fecha	Hora	Viento	Temp	Humedad	Lluvia	Radiación
2000 Abr 15	0.9583	1.33	27.65	11.25	0.00	151.25

- b) La hoja realizará la conversión de unidades, pero en cuanto a la radiación se refiere, como las estaciones toman el valor de la radiación en watts/m² y nosotros la necesitamos en porcentaje, se consideraron los valores máximos y mínimos obtenidos por la EMA, es decir, el valor más bajo (-20) como 100% de nubosidad y el más alto (1400) como 0%, de aquí la hoja, realiza una interpolación lineal con este criterio.
- iv) Adaptación de la fecha.- Lo que se realizó aquí fue ajustar el formato de la fecha y hora con el que se encontraban los datos para que pudieran ser leídos por el EICM y de aquí que la Guía de Diseño de Pavimentos E-M pudiera trabajar con él, este formato tenía que ser el siguiente para todos los datos: 2005080621, lo cual indica que es el valor para las 9 pm del seis de agosto del 2005.
- a) Esta parte la realiza la hoja de cálculo, donde en la columna “AB” iniciaran los datos en el formato que los requiere el EICM contenido en la Guía de Diseño de Pavimentos E-M.
- b) Revisar que las celdas con fórmulas comprendan el mismo rango de filas con datos.
- c) En la pestaña “prehcd” copiar los valores de la columna “AB” a la “AG”, en esta pestaña debemos de eliminar con un filtro para facilitar el trabajo los datos de celdas de cada parámetro que no sea numérico, esto debido a que expresiones como “#valor”, “Div/cero” pueden estar presentes debido a que en algunos casos se cuenta con la fila de dato pero falta algún valor

climático. Los espacios restantes se recomienda llenarlos con el promedio de valores que se tenga de cada columna, es decir, valores faltantes de temperatura completarlos con el promedio de la temperatura de los valores que se tiene.

En el archivo “traslapes y desfases”.

Este archivo contiene 7 “pestañas” de las cuales 5 realizan algún procedimiento y las otras dos están con el propósito de mantener datos, una mantiene los valores como provienen del archivo anterior (“prehcd”) y la otra, que de hecho es la última donde pondremos los valores finales para de ahí exportar a formato “csv”, debido a que este formato es requerido como mencionaré más adelante. El procedimiento seguido es el siguiente:

- i) Se copian los datos de la pestaña “prehcd” del archivo con el mismo nombre en la pestaña del actual archivo del nombre mencionado. Estos datos no se modificaran ya que estarán de respaldo y así no vernos en la necesidad de abrir el archivo anterior.
- ii) Eliminación de valores repetidos.- Esta parte consistió en borrar los datos que se encontraban repetidos consecutivamente de cierta hora, debido a que hay algunos datos que se encuentran repetidos una o mas veces, como puede ser que se hallan anotado dos veces los valores para las 7:20 am. Esto se realizó en la pestaña “prehcd2” donde copiamos los datos del anterior paso y ejecutamos la macro “quitarepetidos”, esta se encargara de realizar el proceso de limpieza de nuestro archivo.
- iii) Debido a que sería muy tedioso buscar elementos faltantes o días repetidos en la serie de datos con que estamos trabajando, se realizó un proceso de

búsqueda para así localizar elementos traslapados (se explica a continuación) y elementos faltantes que se rellenarán también. Esto se realizó de la siguiente manera:

- a) En la pestaña “hoja_trabajo” se pegan los valores de la columna de la fecha solamente, estos deben ir a partir de la fila “A2” en adelante, de ahí se pone en la celda “M1” el número de renglones con datos. Ahora en la pestaña “resumen desfases” ejecutamos la macro “comprobar” la cuál realiza un resumen de huecos y traslapes.

Tabla 3.10 Formato de datos en la pestaña resumen desfases (Fuente: Elaboración propia con base en archivo de la hoja Excel traslapes y desfases).

HORA INICIAL		HORA FINAL		tipo	días de desfase	horas de desfase
07:00:00 p.m.	20/04/2000	08:00:00 a.m.	21/04/2000	hueco	0	13
07:00:00 p.m.	25/04/2000	08:00:00 p.m.	26/04/2000	traslape	1	1

- iv) Eliminación de datos traslapados.- Como se mencionó líneas arriba los datos históricos llegan a almacenarse con un desfase de algunas horas o incluso días en algunas ocasiones, es decir, el archivo de julio de 2005 en lugar de terminar su serie de datos el 31, los termina el 2 de agosto a las 5 am. Estos traslapes no llegan a ser muchos como el caso de los huecos, debido a que solamente son de un mes a otro, por lo tanto si no se corrigió esto al momento de copiar los datos en el archivo “prehcd”, entonces una vez que identificamos el número de traslapes y la fecha en que se presentan, los eliminamos manualmente. La eliminación se realiza en los datos de la pestaña “prehcd2” ya que estos datos ya contienen valores repetidos.
- v) Rellenado de datos faltantes.- Este procedimiento lo efectuamos en la pestaña “hcd guía” donde se pegaron los datos después de realizar la eliminación de traslapes. Aquí se utilizó la macro “rellenar”, pero para que funcione adecuadamente, es necesario realizar el proceso de comprobación de datos

faltantes, debido a que no funciona adecuadamente si los datos contienen traslapes. Este procedimiento se realiza ya que como se explicó anteriormente en las estaciones pueden llegar a faltar valores, entonces se tienen que rellenar esos huecos faltantes para que el EICM pueda trabajar, estos valores pueden ser desde unas horas hasta algunos meses. El criterio tomado para este procedimiento fue tomar el valor del día anterior de la hora faltante y rellenar el hueco con dicho dato. En los casos donde nos percatamos con la comprobación que los huecos llegaban a ser de un mes o más, lo que se hizo fue copiar los valores de esas fechas en el año anterior, de aquí solamente se ajusta la fecha.

- vi) Como ayuda para verificar que este procedimiento estuviera bien, se utilizó la pestaña “hoja comprobación” donde los valores de la fecha que ya no contiene huecos se pegan en la primer columna a partir de la celda “A2”, de ahí se utilizó un filtro en la columna “O”, donde, si todos los valores son 0 , el proceso está completo, pero, si hay algún 1, este valor nos indicaba que todavía había alguna anomalía, entonces se puede revisar en esa fecha y así poder corregirla.
- vii) Se guarda la información en formato csv, para lo cual los datos que ya se han tratado se pegan en la pestaña “hcd final”, y de ahí seleccionar el rango de datos a guardar en ese formato. El archivo que se exportará a formato csv para ser leído por la Guía de Diseño de Pavimentos E-M no debe de contener ningún valor de texto dentro de sus datos, es decir, verificar que los datos de las 5 variables climáticas sean todos números.
- viii) Finalmente se debe de considerar que la guía no trabaja con datos mayores a 10 años, entonces, se utilizaran solamente datos de 10 años en estaciones con un información mayor a la mencionada cantidad.

Los pasos mencionados indican lo que se realizó para obtener un archivo en formato csv el cual se utiliza para crear el archivo hcd, que necesita la Guía de Diseño de Pavimentos E-M para generar el archivo icm y de ahí realizar su análisis.

3.4. Generación de archivo “icm”

El archivo icm es generado por la Guía de Diseño de Pavimentos E-M, pero para lo cual en nuestro caso debemos de sustituir los valores climáticos que deseamos analizar en un archivo hcd ya existente en la guía, debido a que no se puede modificar la base de datos de los archivos hcd de la guía, esto hasta la última versión (1.100).

Como nosotros necesitamos archivos icm con los datos de estaciones climáticas mexicanas o por lo menos con la mayor cantidad de datos posibles. Utilizaremos nuestros datos para crear los archivos hcd que requiere la guía, pero como no podemos obtener archivos “icm” directamente de la guía con la información del mismo (datos explicados en el capítulo 2), entonces utilizaremos estaciones que se encuentren en coordenadas similares o por lo menos en cuanto a longitud se refiera y lo mas cercanas respecto a la latitud, para que así de esta forma nos genere los archivos icm con los datos mencionados más acordes a los que tendríamos en las estaciones mexicanas. Las coordenadas de las estaciones que se encuentran en la base de datos del EICM se encuentran en el archivo “Stations.dat”. El procedimiento para generar el archivo icm de México es el siguiente:

- i) Seleccionar una estación climática que se encuentre dentro de la base del EICM con coordenadas similares a las estación en estudio dentro de la república mexicana.
- ii) Sustituir el archivo hcd que se creó con los datos de la estación climática mexicana dentro de la base de datos del EICM (la carpeta hcd dentro del folder

rais de la guía), recordar que el archivo hcd de la estación mexicana debe de tener el número de la estación que seleccionamos en el paso “i”.

- iii) Con el archivo hcd con los datos de la estación mexicana dentro de la base de datos del EICM se procede a generar el archivo icm dentro de la Guía de Diseño de Pavimentos E-M.

Con los pasos anteriores se genera el archivo icm que requiere la guía E-M. Los archivos icm que se generan con este procedimiento no contienen todos los valores que deberían de tener de las estaciones climáticas, ya que no se encuentran en las coordenadas reales, pero por el momento y en la versión que se encuentra la guía no nos permite modificar la base de datos climática o que la misma guía E-M calculara los valores con las coordenadas, esto a expensas de ver las modificaciones que se generen en la versión comercial.

CAPÍTULO

4

LA GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EMPÍRICO- MECANICISTA EN MÉXICO

4.1. Introducción

La Guía de diseño de pavimentos E-M representa el estado del arte en cuanto a las metodologías de diseño norteamericanas, debido a esto y a que es posible su implementación para el territorio mexicano se realizó una comparación sobre los resultados que nos arroja al analizar pavimentos para las mismas condiciones de tránsito así como de características de materiales estructurales, solamente cambiando la región en la que se localizará el pavimento así como los espesores para lograr que nuestra carpeta cumpla con los estándares que marca la guía.

Además de eso se realizó el diseño con Dispav-5 y con la metodología AASHTO '93 para así poder comprender un poco más las variaciones que puede tener implementar esta nueva metodología en México. También se explican los

diferentes parámetros que necesita la Guía de diseño de pavimentos E-M para su funcionamiento así como con lo que se cuenta al momento para las condiciones nacionales.

4.2. Aplicación de la Guía de Diseño de Pavimentos E-M

En esta parte se llevó a cabo la aplicación de la guía sobre condiciones de diseño mexicanas. Para esto se llevaron a cabo análisis con las tres regiones climáticas con que se ha venido trabajando en este proyecto (Distrito Federal, Mérida y Zacatecas). El aforo vehicular utilizado proviene del corredor México-Nogales con estación en La Piedad, Michoacán, y las características de la estructura se llevaron a cabo tomando como base los lineamientos de las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

La pantalla inicial (figura 4.1) contiene los diferentes parámetros que le debemos introducir a la guía para llevar a cabo el análisis, estos valores se desplegarán en ventanas independientes para así poder introducir la información del diseño que se vaya a llevar a cabo. Además de contener la información de entrada así como del proyecto, nos muestra en una columna dividida los resultados de los diferentes parámetros que analiza, así como al momento de estar realizando el análisis muestra en un recuadro el progreso de nuestro análisis, junto con el tiempo restante para que concluya.

Lo primero que introducimos en el programa es la información general del proyecto (figura 4.2), la cual para nuestro caso fue análisis de un nuevo diseño de pavimento flexible. Para este análisis se indica: el periodo de diseño, este es el tiempo en que se desea el camino provea de condiciones óptimas de manejo a los vehículos que transiten por el mismo, esto es indispensable debido a que es el tiempo que la guía utilizará para el análisis; la fecha prevista de la construcción

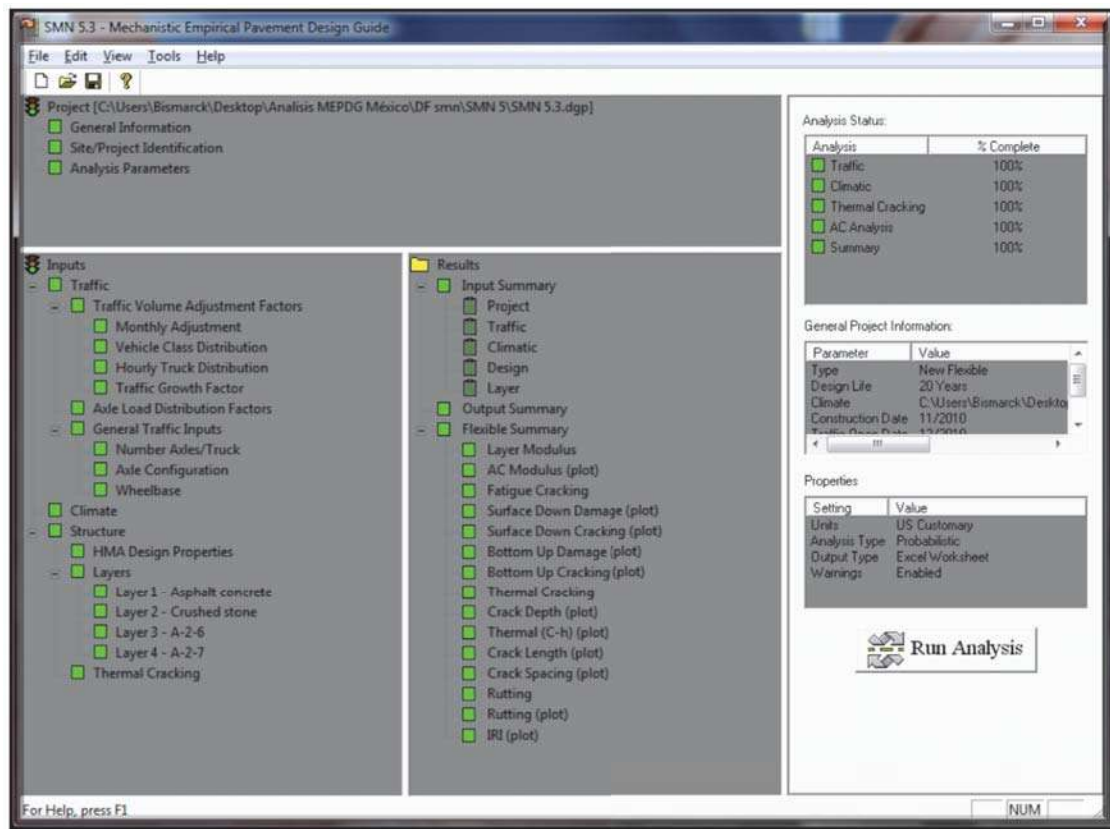


Figura 4.1 Pantalla inicial del programa Mechanical Empirical Pavement Design Guide.

de la base y subrasante, fecha de construcción del pavimento, así como el mes en que se tenga previsto abrirá al tránsito, estos datos se indican en mes y año. Estos datos son importantes debido a que las condiciones ambientales como contenido de humedad o radiación solar en la zona de estudio, influyen en el comportamiento de los materiales al momento de construir el pavimento.

La siguiente ventana es la información del proyecto (figura 4.3), esta información es: localidad donde se llevará a cabo, código de proyecto, código de sección y fecha del análisis. Además de lo anterior, se le indica el formato de la distancia (para la versión que se manejó el formato se encuentra en unidades inglesas, pero se tiene previsto que en la versión comercial DARWIN M-E, se podrá trabajar también con unidades del sistema internacional), el cadenamiento de inicio y fin del camino, así como la dirección del tráfico (Norte, Sur, Este, Oeste).

General Information

Project Name: SMN 5.3

Description:

Design Life (years): 20

Base/Subgrade Construction Month: October Year: 2010

Pavement Construction Month: November Year: 2010

Traffic open month: December Year: 2010

Type of Design

New Pavement

☒ Flexible Pavement ☐ Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) ☐ Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)

Restoration

☐ Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)

Overlay

☐ Asphalt Concrete Overlay ☐ PCC Overlay

OK Cancel

Figura 4.2 Información general del proyecto.

Site/Project Identification

Location: Mexico

Project ID: AC2002

Section ID: AC2002-A

Date: 16/12/2010

Station/milepost format: Miles: 0.000

Station/milepost begin: Feet: 00 + 00

Station/milepost end: Miles: 0.000

Traffic direction: North bound

OK Cancel

Figura 4.3 Información sobre identificación del proyecto.

La última ventana respecto a la información del proyecto (figura 4.4) contiene los parámetros de análisis (estos parámetros se ingresarán en unidades inglesas debido a lo expuesto con anterioridad), estos dependerán del tipo de pavimento que se vaya a analizar (flexible o rígido). El primer parámetro, el cuál no cambiará de acuerdo al tipo de pavimento a analizar es el IRI inicial. En los siguientes parámetros se indicarán los límites que esperamos al finalizar el periodo de diseño, así como la confiabilidad del mismo. Estos valores se utilizaron como se encontraban por defecto, ya que son las limitaciones de AASHTO para caminos de altas especificaciones.

	Limit	Reliability
☒ Terminal IRI (in/mi)	225	80
☒ AC Surface Down Cracking Long Cracking (ft/mi)	1000	80
☒ AC Bottom Up Cracking Alligator Cracking (%)	25	80
☒ AC Thermal Fracture (ft/mi)	1000	80
☒ Chemically Stabilized Layer Fatigue Fracture(%)	25	80
☒ Permanent Deformation - Total Pavement (in)	1.00	80
☒ Permanent Deformation - AC Only (in)	0.25	80

Figura 4.4 Límites de parámetros a analizar.

4.2.1. Tránsito vehicular

El tránsito vehicular es uno de varios factores que se consideran para el diseño de un pavimento, siendo este uno de los principales debido a que es para el cual está diseñado nuestro pavimento. En la Guía de Diseño de Pavimentos E-M se incorpora un nuevo concepto de caracterización de tránsito vehicular como se mencionó en el primer capítulo, este concepto es lo que se conoce como *espectros de carga*, lo cual se explicará mas adelante.

Los análisis que se realizaron se llevaron a cabo para un camino con 2 carriles por sentido teniendo un aforo vehicular de 13,889 vehículos para ambos sentidos de los cuales el 35.87% son vehículos pesados, quedando nuestro aforo vehicular diario promedio anual en vehículos pesados de 4,982 en ambos sentidos, con un factor de crecimiento anual de manera lineal del 2.5%. El porcentaje de vehículos pesados en cada dirección será de 50%, con el 100% de estos sobre el carril de diseño o carril derecho y una velocidad de operación de 60 mph (96.56 kph). Los valores anteriores se introducen en la primer opción de tránsito vehicular (figura 4.5). El ajuste

mensual en cuanto al tránsito se refiere se utilizó como viene por defecto en la guía, así como la distribución horaria.

En la opción que indica los factores sobre ajuste del volumen de tránsito se introduce: los valores respecto al ajuste mensual, esto es las variaciones en cuanto a volumen de tránsito de los diferentes vehículos, es decir, si el número de vehículos que transitan por la zona varían de acuerdo al mes; distribución por clase de vehículos, esta distribución es la que usualmente se ha venido utilizando en México en las diferentes metodologías, la cual consiste en el conteo del tipo de vehículos que pasan por la vialidad; distribución horaria, esta representa el porcentaje de vehículos que pasan en determinadas horas del día; y el factor del crecimiento del tránsito, representa el crecimiento que tendrá el tránsito, este se puede manejar de manera lineal, compuesto o simplemente que no habrá crecimiento, además estos se pueden expresar solamente para cierto tipo de vehículos.

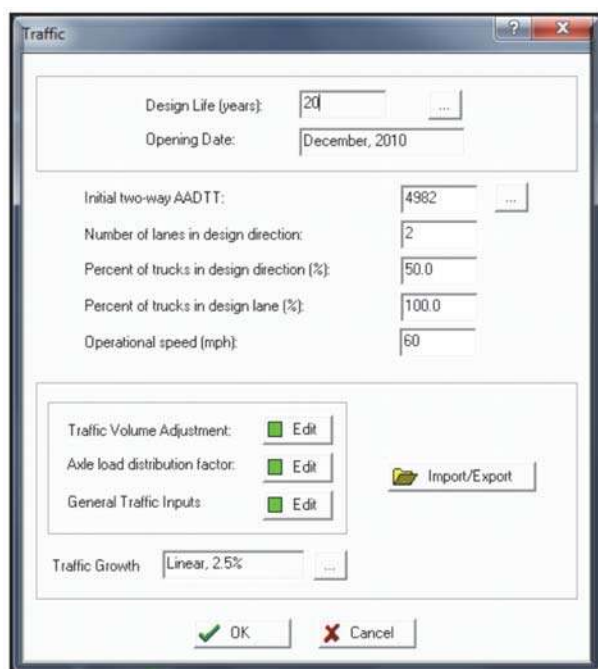


Figura 4.5 Tránsito vehicular.

La información respecto al ajuste mensual del tránsito vehicular (figura 4.6) y la distribución horaria (figura 4.8) se manejó como venia por defecto ya que no contamos con los datos necesarios para poder modificar estos parámetros. En la distribución por clase de vehículo (figura 4.7) agregamos la información que corresponde al aforo vehicular de la estación que venimos utilizando (estación en la Piedad, Michoacán, carretera México-Nogales), para la cuál se debe de considerar que el 100% de los vehículos es, lo que respecta a vehículos pesados, es decir, en el caso de este trabajo, el 35.87% de vehículos pesados ahora representa el 100% para así realizar la distribución de porcentajes que se requiere en este punto, la clasificación de vehículos que se utilizó fue como se indica en la tabla 4.1 y los porcentajes se pueden apreciar en la figura 4.7. Finalmente en esta ventana, el factor de crecimiento anual (figura 4.9) se utilizó de 2.5% en forma lineal para todos los vehículos.

Tabla 4.1 Clasificación vehicular
AASHTO contra SCT.

Clasificación vehicular	
AASHTO	SCT
Clase 4	B3
Clase 5	C2
Clase 6	C3
Clase 9	T3-S2
Clase 10	T3-S3
Clase 13	T3-S2-R4

Traffic Volume Adjustment Factors

Monthly Adjustment | Vehicle Class Distribution | Hourly Distribution | Traffic Growth Factors

Load Monthly Adjustment Factors (MAF)

Level 1: Site Specific - MAF

Level 3: Default MAF

Monthly Adjustment Factors

Month	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8	Class 9	Class 10	Class 11	Class 12	Class 13
January	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
February	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
March	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
April	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
May	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
June	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
July	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
August	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
September	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
October	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
November	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
December	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

OK Cancel

Figura 4.6 Ajuste mensual del tránsito vehicular.

Traffic Volume Adjustment Factors

Monthly Adjustment | Vehicle Class Distribution | Hourly Distribution | Traffic Growth Factors

AADTT distribution by vehicle class

Class	AADTT	Icon
Class 4	20.7	
Class 5	23.2	
Class 6	17.0	
Class 7	0.0	
Class 8	0.0	
Class 9	22.9	
Class 10	10.6	
Class 11	0.0	
Class 12	0.0	
Class 13	5.9	
Total	100.0	

Note: AADTT distribution must total 100%.

Load Default Distribution

Level 1: Site Specific Distribution

Level 2: Regional Distribution

Level 3: Default Distribution

OK Cancel

Figura 4.7 Distribución por clase de vehículos pesados.

Traffic Volume Adjustment Factors

Monthly Adjustment | Vehicle Class Distribution | Hourly Distribution | Traffic Growth Factors

Hourly truck traffic distribution by period beginning:

Period	Value	Period	Value
Midnight	0.8	Noon	5.9
1:00 am	2.3	1:00 pm	5.9
2:00 am	2.3	2:00 pm	5.9
3:00 am	2.3	3:00 pm	5.9
4:00 am	2.3	4:00 pm	4.6
5:00 am	2.3	5:00 pm	4.6
6:00 am	5.0	6:00 pm	4.6
7:00 am	5.0	7:00 pm	4.6
8:00 am	5.0	8:00 pm	3.1
9:00 am	5.0	9:00 pm	3.1
10:00 am	5.9	10:00 pm	3.1
11:00 am	5.9	11:00 pm	3.1

Note: The hourly distribution must total 100%

Total: 100

OK Cancel

Figura 4.8 Distribución horaria para vehículos pesados.

Traffic Volume Adjustment Factors

☒ Monthly Adjustment ☒ Vehicle Class Distribution ☒ Hourly Distribution ☒ Traffic Growth Factors

Opening Date: December, 2010
Design Life (years): 20

AADTT: 4982
% Traffic Design Direction: 50
% Traffic Design Lane: 95

☒ Vehicle-class specific traffic growth

	Rate (%)	Function
Class 4	2.5	Linear
Class 5	2.5	Linear
Class 6	2.5	Linear
Class 7	2.5	Linear
Class 8	2.5	Linear
Class 9	2.5	Linear
Class 10	2.5	Linear
Class 11	2.5	Linear
Class 12	2.5	Linear
Class 13	2.5	Linear

Default Growth Function:
☐ No Growth
☒ Linear Growth
☐ Compound Growth
Default growth rate (%) 2.5

Note: Vehicle-class distribution factors are needed to view the effects of traffic growth.

Figura 4.9 Factor de crecimiento vehicular.

Los espectros de carga representan la distribución de la carga por tipo de eje, es decir, representa la variación de carga que transmiten los ejes de diferentes tipos de vehículos a la carpeta, los cuales son obtenidos por estaciones denominadas Weight In Motion (WIM). Que quiere decir esto, la figura 4.10 muestra el espectro de carga para el eje Tandem de un vehículo clase 13 (T3-S2-R4), el eje X corresponde a la carga y el eje Y al porcentaje de ejes Tandem con esa carga, la línea representa el espectro de carga de dicho eje. Lo anterior se puede ejemplificar de la siguiente manera: del total de los ejes Tandem de los vehículos clase 13 que pasaron por la estación de pesaje, el 7.24% de estos pesaron 15,000 lb (6.8 ton) y el 6.45% pesaron 11,000 lb (4.98 ton), los cuales representan los dos máximos que se encuentran en el espectro de carga. Estas gráficas se obtienen de los valores que se tengan sobre espectros de carga. La guía maneja estos esfuerzos en libras debido a que hasta el momento solamente incluyen el sistema

de unidades inglés. Los rangos de carga que maneja la guía se manejan por tipo de vehículo, y en estos por tipo de eje para cada vehículo. Estos rangos son:

- Eje sencillo.- Inicia en 3,000 lb hasta 40,000 lb con intervalos cada 1,000 lb.
- Eje Tandem.- Inicia en 6,000 lb hasta 80,000 lb con intervalos cada 2,000 lb.
- Eje Tridem.- Inicia en 12,000 lb hasta 102,000 lb con intervalos de 3,000 lb.
- Eje Quad.- Mismo parámetros que el eje Tridem.

En la actualidad en México no se cuenta con los espectros de carga como los requiere la guía de diseño de pavimentos, pero se está realizando un esfuerzo por obtenerlos, para lo cuál ya se ha obtenido información de diversas estaciones WIM que se encuentran en la red federal del país, de las cuales se tienen los espectros de carga para los diferentes ejes (Tabla 4.2), sin embargo, falta realizar un nivel de procesamiento de datos mas a fondo para poder obtener los espectros de carga por tipo de vehículo y por ejes. Debido a esto, en nuestros análisis utilizamos el nivel 3 en cuanto a los espectros de carga, es decir, se manejaron los valores por defecto (figura 4.11).

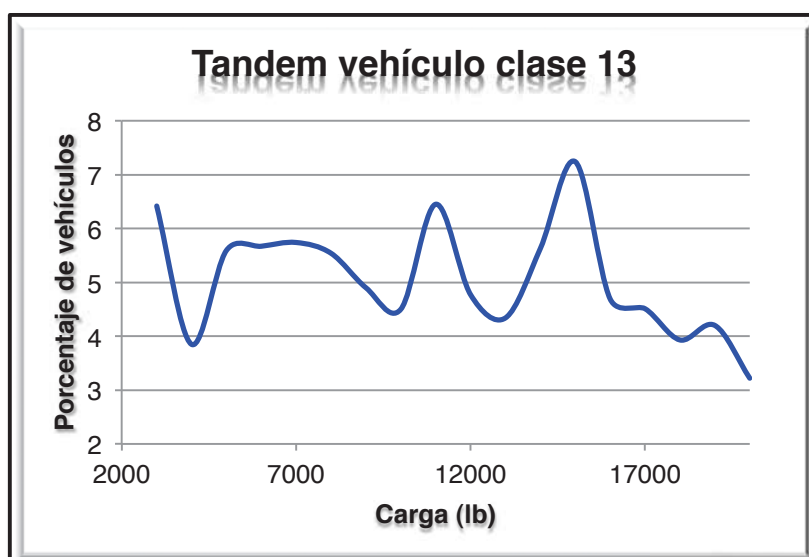


Figura 4.10 Espectro de carga vehículo T3-S2-R4.

Tabla 4.2 Formato en que se tienen los espectros de carga actualmente en México (Fuente: Proporcionada por el Laboratorio de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte).

Estación:058; Corredor: México-Nogales; Carretera: Irapuato-Guadalajara.						
Puente la piedad (libre); Km87.00						
Rango (Klb)	Sencillo	Sencillo Dual C2	Rango (Klb)	Tándem	Rango (Klb)	Trídem T3S3
3	0.20%	0.40%	6	0.20%	12	2.00%
4	1.10%	0.40%	8	0.50%	15	5.90%
5	2.30%	0.30%	10	2.70%	18	12.00%
6	8.70%	0.50%	12	5.30%	21	9.10%
7	10.30%	0.50%	14	6.90%	24	3.30%
8	23.30%	0.70%	16	5.40%	27	1.50%
9	26.00%	2.40%	18	5.10%	30	1.70%
10	12.40%	1.90%	20	4.50%	33	1.30%
11	10.10%	5.90%	22	4.40%	36	1.40%
12	3.80%	5.70%	24	4.30%	39	1.00%
13	1.20%	5.20%	26	3.30%	42	1.20%
14	0.40%	4.30%	28	3.70%	45	1.10%
15	0.10%	4.00%	30	3.20%	48	1.60%
16	0.10%	6.40%	32	3.20%	51	2.90%
17	0.00%	5.30%	34	3.40%	54	3.10%
18	0.00%	7.20%	36	3.60%	57	3.40%
19	0.00%	7.50%	38	3.40%	60	4.50%
20	0.00%	7.80%	40	4.00%	63	6.80%
21	0.00%	5.00%	42	3.90%	66	8.00%
22	0.00%	10.20%	44	4.20%	69	7.90%
23	0.00%	4.20%	46	4.40%	72	6.80%
24	0.00%	3.30%	48	4.10%	75	6.50%
25	0.00%	1.90%	50	4.30%	78	4.00%
26	0.00%	2.20%	52	3.80%	81	2.40%
27	0.00%	1.70%	54	3.10%	84	0.30%
28	0.00%	1.10%	56	2.30%	87	0.20%
29	0.00%	1.20%	58	1.40%	90	0.00%
30	0.00%	0.90%	60	0.60%	93	0.00%
31	0.00%	1.00%	62	0.30%	96	0.00%
32	0.00%	0.40%	64	0.10%	99	0.00%
33	0.00%	0.20%	66	0.10%	102	0.00%
34	0.00%	0.40%	68	0.00%	105	0.00%
35	0.00%	0.10%	70	0.00%	108	0.00%
36	0.00%	0.00%	72	0.00%	111	0.00%
37	0.00%	0.00%	74	0.00%	114	0.00%
TOTALES	100%	100%	TOTALES	100%	TOTALES	100%

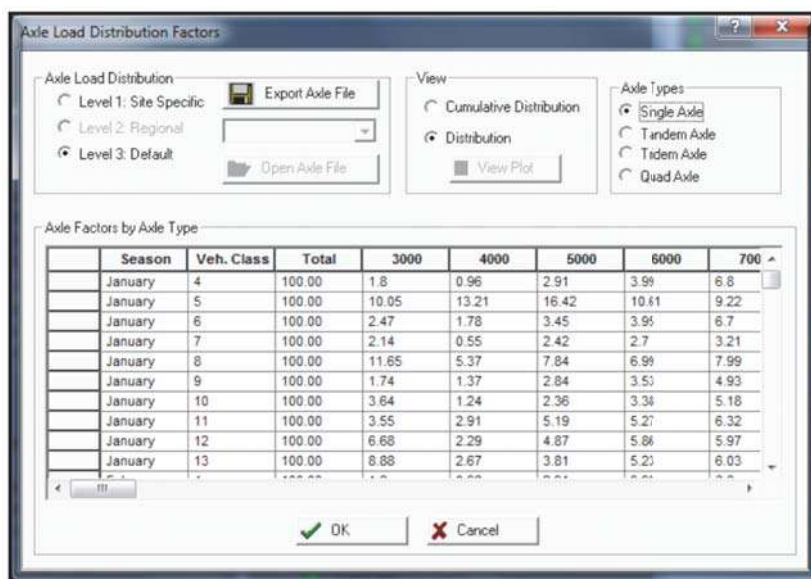


Figura 4.11 Ventana respecto a los espectros de carga.

En lo que respecta a las características generales del tránsito, se emplearon para los análisis del pavimento los valores que el programa indica por defecto, debido a que son valores que AASHTO recomienda. Estos parámetros son: Ancho del carril de diseño, localización promedio de la rodada, así como la desviación de esta. Además en las pestañas nos permite modificar el número de ejes en los camiones de carga (figura 4.12); configuración de los ejes (figura 4.13), la cual contiene el ancho promedio de los ejes, el espaciado entre llantas en ejes duales, la presión de inflado y el espacio que hay entre tipo de ejes; la ultima pestaña contiene el espacio entre la dirección y el primer eje motor, o eje que impulsa a el camión (figura 4.14), la cual contiene el espaciado promedio entre ejes, así como el porcentaje de camiones que contienen ese tipo de ejes.

General Traffic Inputs

Lateral Traffic Wander

Mean wheel location (inches from the lane marking): 18

Traffic wander standard deviation (in): 10

Design lane width (ft): (Note: This is not slab width) 12

☒ Number Axes/Truck ☐ Axle Configuration ☐ Wheelbase

	Single	Tandem	Tridem	Quad
Class 4	1.62	0.39	0	0
Class 5	2	0	0	0
Class 6	1.02	0.99	0	0
Class 7	1	0.26	0.83	0
Class 8	2.38	0.67	0	0
Class 9	1.13	1.93	0	0
Class 10	1.19	1.09	0.89	0
Class 11	4.29	0.26	0.06	0
Class 12	3.52	1.14	0.06	0
Class 13	2.15	2.13	0.35	0

OK Cancel

Figura 4.12 Características de entrada sobre el número de ejes.

General Traffic Inputs

Lateral Traffic Wander

Mean wheel location (inches from the lane marking): 18

Traffic wander standard deviation (in): 10

Design lane width (ft): (Note: This is not slab width) 12

☐ Number Axes/Truck ☒ Axle Configuration ☐ Wheelbase

Average axle width (edge-to-edge outside dimensions ft): 3.5

Dual tire spacing (in): 12

Tire Pressure (psi): 120

Axle Spacing (in)

Tandem axle: 51.6

Tridem axle: 49.2

Quad axle: 49.2

OK Cancel

Figura 4.13 Configuración de los ejes.

General Traffic Inputs

Lateral Traffic Wander

Mean wheel location (inches from the lane marking): 18

Traffic wander standard deviation (in): 10

Design lane width (ft): (Note: This is not slab width) 12

☐ Number Axes/Truck ☐ Axle Configuration ☒ Wheelbase

Wheelbase distribution information for JPCP top-down cracking. The wheelbase refers to the spacing between the steering and the first device axle of the truck-tractors or heavy single units.

Average Axle Spacing (ft): Short 12 Medium 15 Long 18

Percent of trucks (%): Short 33.0 Medium 33.0 Long 34.0

OK Cancel

Figura 4.14 Espacio entre ejes.

4.2.2. Condiciones ambientales

La parte que se refiere al efecto climático es manejada por el Enhanced Integrated Climatic Model (EICM), el cual es el encargado de calcular los contenidos de humedad, temperatura, presión de poro y el empuje por deshielo en la estructura. El EICM es otra de las innovaciones de esta metodología, y se incorpora debido a que las condiciones climáticas tienen un efecto importante en el desempeño de los pavimentos.

En esta parte del análisis es donde utilizamos los archivos *hcd* creados en el capítulo anterior, para aquí generar los archivos *icm* de cada estación climática que se utilizó para el proyecto. Ya con las estaciones de la base de datos norteamericanas seleccionadas y el archivo *hcd* con los datos climáticos de las estaciones mexicanas procedimos a generar los archivos *icm*. Esta ventana (figura 4.15) nos da la opción de generar o importar la estación (para esto tiene que estar en formato *icm*), en lo cual para generar el archivo *icm* se introduce la profundidad promedio anual del nivel freático. Esta ventana contiene la opción para interpolar las estaciones climática siempre y cuando tengan valores de 6 estaciones cercanas, pero como esta versión de la guía no nos permite la opción para modificar la base de datos de sus estaciones, se generaron los archivos *icm* con el procedimiento anteriormente explicado.

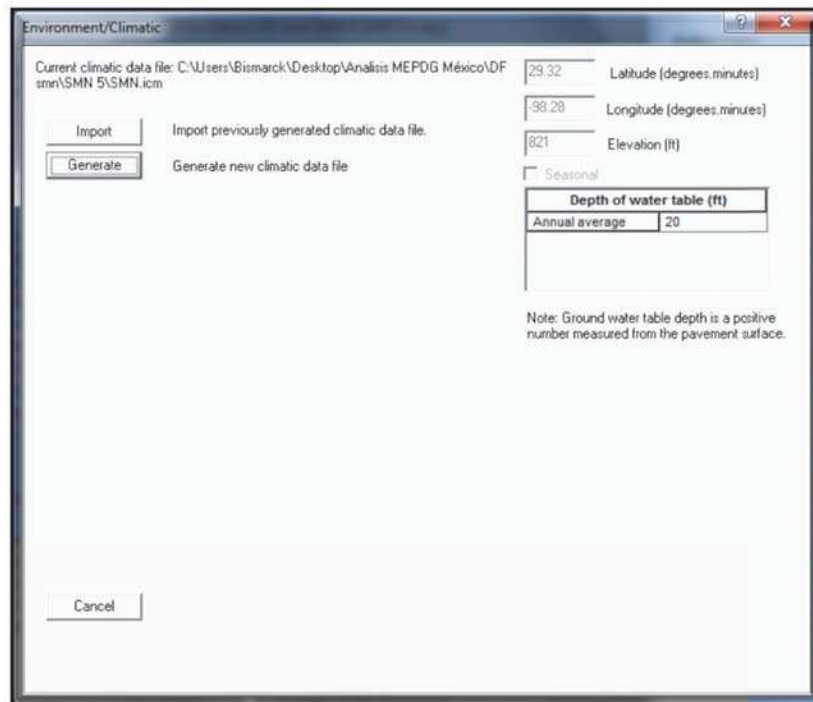


Figura 4.15 Ventana del Enhanced Integrated Climatic Model.

4.2.3. Estructura

En lo que respecta a la estructura del pavimento debemos de recordar que la Guía de Diseño de Pavimentos E-M es una herramienta de análisis, esto quiere decir que nosotros debemos de indicarle las características de los materiales, las capas que conformaran la estructura y su espesor. Esto último es una de las principales diferencias respecto a las antiguas metodologías, ya que anteriormente los métodos de diseño nos proporcionaban los espesores de la carpeta, tal es el caso del DISPAV-5 o la guía AASHTO '93.

El número de capas que contendrá nuestro pavimento, así como sus características (materiales y espesor) se indican en la ventana principal de la estructura (figura 4.16), en el caso del estudio que se realizó se utilizó el

mismo número de capas y tipo de materiales en cada uno de los análisis, para lo cual solamente se modificó el espesor para lograr que el análisis cumpliera con los parámetros en las diferentes regiones climáticas. La estructura empleada consta de 3 capas estructurales, las cuales son: carpeta asfáltica, base granular y subrasante, siendo la última capa el terreno natural. Las características de los materiales estructurales que se emplearon en los análisis cumplen con la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), y para algunos casos se emplearon valores de los materiales dados por defecto para cumplir con las características marcadas por AASHTO.

En cuanto a la carpeta asfáltica se utilizaron diversos materiales asfálticos, de los cuales se inició con un asfalto comúnmente utilizado en México, el asfalto AC 20, el cual pertenece a la clasificación de materiales con viscosidad dinámica. El asfalto AC 20 no se utilizó para el diseño definitivo de este trabajo debido a que no presentó un comportamiento adecuado respecto a las deformaciones en la mezcla, por lo cual el estudio se continuó con asfaltos clasificados de acuerdo a su grado PG. El asfalto que se empleó al inicio del estudio fue de acuerdo a la normativa de la SCT, utilizando un asfalto PG-76, pero el cuál presentó espesores mayores para con el siguiente que contempla la guía, el asfalto PG grado 82 (figura 4.17). El asfalto grado PG 82 presentó diferencias de hasta 3 centímetros para el Distrito Federal en comparación al anteriormente mencionado, por lo cual se decidió utilizar este asfalto en las otras dos regiones climáticas.

Surface short-wave absorptivity: 0.85

Layers

Layer	Type	Material	Thickness	Interface
1	Asphalt	Asphalt concrete	9.4	1
2	Granular Base	Crushed stone	13.4	1
3	Subgrade	A-2-5	17.7	1
4	Subgrade	A-2-7	Semi-infinite	n/a

Insert Delete Edit

Opening Date: December, 2010 Design Life (years): 20 OK Cancel

Figura 4.16 Estructura del pavimento.

Level: 3 Asphalt material type: Asphalt concrete Layer thickness (in): 9.44

☒ Asphalt Mix ☐ Asphalt Binder ☐ Asphalt General

Options

☒ Superpave binder grading
☐ Conventional viscosity grade
☐ Conventional penetration grade

High Temp (°C)	Low Temp (°C)						
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46
46							
52							
58							
64							
70							
76							
82							

A: 9.2090 VTS: -3.0190

OK Cancel View HMA Plots

Figura 4.17 Propiedades del material asfáltico.

En cuanto a las características del material pétreo, así como del asfalto, nos apegamos nuevamente a la normativa de la SCT, de esta forma analizaríamos las estructuras acorde a los lineamientos vigentes (figuras

4.18 y 4.19), pero para lo cual en la granulometría del material pétreo utilizamos materiales con tamaño máximo de agregado de una pulgada.

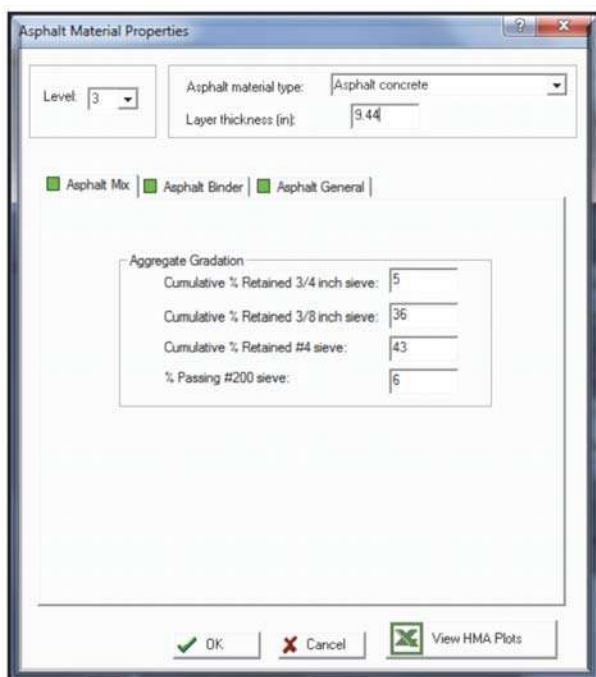


Figura 4.18 Granulometría de la mezcla asfáltica.

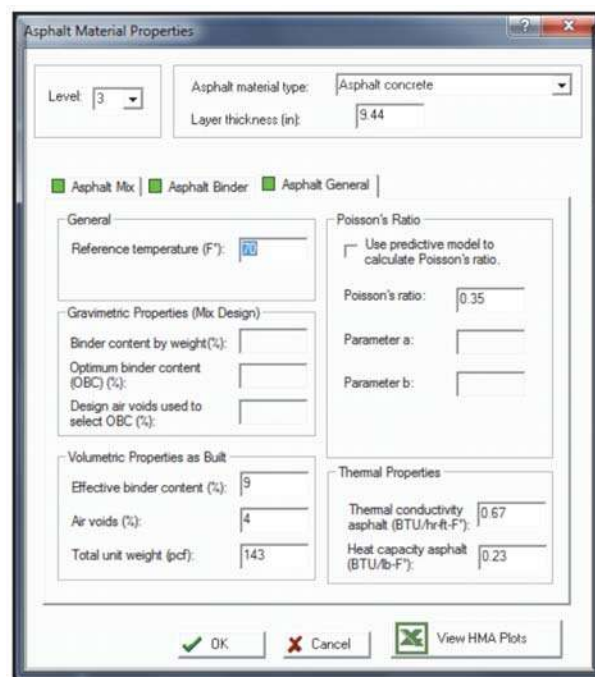


Figura 4.19 Propiedades generales del asfalto.

Las características de la base granular de igual manera fueron de acuerdo a las normas de la SCT, en la cual se menciona que se utilizó un nivel 2 (figura 4.20), esto para que se pudiera emplear el CBR, el cual se utilizó con un valor de 100, debido a que es lo que la norma indica, así como Límite Líquido (LL) de 6 y Límite Plástico (LP) de 25, la granulometría que se utilizó (figura 4.21) fue una media de los rangos que marca la norma N-CMT-4-02-002/04, la cual es la norma para materiales de bases hidráulicas.

Figura 4.20 Propiedades de la capa de base.

Sieve	Percent Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	3
#100	6
#80	
#60	8
#50	
#40	12
#30	
#20	19
#16	
#10	28
#8	
#4	40
3/8"	52
1/2"	
3/4"	73
1"	85
1 1/2"	100
2"	100
2 1/2"	
3"	100
3 1/2"	0

Figura 4.21 Granulometría de la capa de base.

Las otras dos capas (subrasante y terracería) se seleccionaron de acuerdo a la clasificación de materiales de AASHTO, pero para lo cual utilizamos los rangos que utilizan las normas de la SCT para características de los materiales de subrasante y para materiales de terracerías (norma N-CMT-1-03/02 y N-CMT-1-01/02 respectivamente). Para la capa de subrasante (figuras 4.22 y 4.23) se utilizó el material A-2-6 el cual cumple los rangos que marca la normativa, donde el LL debe ser 40 y el LP 12, y un CBR no menor a 20. El material de terracería (figuras 4.24 y 4.25) será un A-2-7, el cual de igual manera se encuentra dentro de los rangos de la norma para LL y CBR, donde el LL es 50 en la norma y el CBR debe de ser mínimo de 5 y este material lo ubica en 10.

Unbound Layer - Layer #3

Unbound Material: A-2.6 Thickness(in): 17.71 Last layer

☒ Strength Properties ☒ ICM

Input Level:
☐ Level 1:
☒ Level 2:
☐ Level 3:

Poisson's ratio: 0.35
 Coefficient of lateral pressure, Ko: 0.5

Analysis Type:
☒ ICM Calculated Modulus
☐ ICM Inputs
☐ User Input Modulus
☐ Seasonal input (design value)
☐ Representative value (design value)

Material Property:
☐ Modulus (psi)
☒ CBR: 20
☐ R-Value
☐ Layer Coefficient - ai
☐ Penetration DCP (psi)
☐ Based upon PI and Gradation

AASHTO Classification:
 Unified Classification:
 Modulus (calculated) (psi): 17380

View Equation Calculate >>

OK Cancel

Figura 4.22 Propiedades de la capa subrasante.

Unbound Layer - Layer #3

Unbound Material: A-2.6 Thickness(in): 17.71 Last layer

☒ Strength Properties ☒ ICM

☐ Range ☒ Mean

Export Import Update

Sieve	Percent Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	24.8
#100	
#80	32.4
#60	
#50	
#40	43.5
#30	
#20	
#16	
#10	59.4
#8	
#4	67.2
3/8"	78.8
1/2"	83.3
3/4"	90.4
1"	94.5
1 1/2"	97.7
2"	99.4
2 1/2"	
3"	
3 1/2"	99.9

Plasticity Index (PI): 12
 Liquid Limit (LL): 40
 Compacted Layer: ☒ Yes

Index Properties from Sieve Analysis:

% Passing #200	24.8
% Passing #40	43.5
% Passing #4	67.2
D10 (mm)	0.001443
D20 (mm)	0.02083
D30 (mm)	0.1527
D60 (mm)	2.138
D90 (mm)	18.56

User Overridable Index Properties:

Maximum Dry Unit Weight(pcf)	122.5
Specific Gravity, Gs	2.70
Sat. Hydraulic Conductivity(ft/hr)	2.5e-006
Optimum gravimetric water content(%)	10.0
Degree of Saturation at Optimum(%)	72.1

User Overridable Soil Water Characteristic Curve:

af	68.25
bf	1.004
cf	0.4796
hr	500

OK Cancel

Figura 4.23 Granulometría de la capa subrasante.

El último parámetro a modificar dentro de la estructura y de todo el proceso de análisis es el agrietamiento termal. El modelo del agrietamiento termal predice la cantidad o frecuencia del agrietamiento termal en función del tiempo. Estos valores se manejaron con un nivel 3, quedando como se muestra en la figura 4.26.

Figura 4.24 Propiedades de la terracería.

Figura 4.25 Granulometría de la terracería.

Loading Time sec	Creep Compliance (1/psi)		
	Low Temp (°F) -4	Mid Temp (°F) 14	High Temp (°F) 32
1	3.92013e-007	4.99621e-007	6.40725e-007
2	4.18468e-007	5.66934e-007	7.80673e-007
5	4.56198e-007	6.70032e-007	1.01365e-006
10	4.86984e-007	7.60304e-007	1.23505e-006
20	5.19848e-007	8.62739e-007	1.50481e-006
50	5.66719e-007	1.01963e-006	1.95389e-006
100	6.04963e-007	1.157e-006	2.38066e-006

Figura 4.26 Ventana sobre el agrietamiento termal.

Lo explicado anteriormente es a grandes rasgos como operar la Guía de Diseño de Pavimentos E-M, así como a que se refieren algunos parámetros. Junto a la explicación se fueron indicando los valores que se utilizaron para los tres diferentes análisis realizados en este trabajo, los cuales como se explicó anteriormente corresponden a tres regiones climáticas diferentes. Los resultados obtenidos se indicarán mas adelante junto a los espesores que nos arrojó el DISPAV-5 y la metodología AASHTO '93.

4.3. Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM (DISPAV-5)

Este diseño tiene las siguientes propiedades iniciales:

- Se considera en camino tipo A con el 100% del tránsito por el carril de diseño, un crecimiento del 2.5% anual para un periodo de diseño de 20 años.
- 70% de camiones cargados.
- 15 y 90 cm para diseño por fatiga y deformación permanente, respectivamente.
- Debido a que es un camino principal y de importancia en la red carretera federal al ser parte del corredor México-Nogales, se diseñará para ser un camino de altas especificaciones el cual deberá conservar un nivel de servicio alto al final de su vida de proyecto con deformaciones en la rodada de 1.2 cm y agrietamientos de ligeros a medios.
- El tránsito por el carril principal es de un TDPA de 6,944.5, con una distribución vehicular como se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Distribución vehicular utilizado en el DISPAV-5.

A	64.1
B2	5.8
B3	5.8
C3	10.2
T3S2	8.2
T3S3	3.8
T3S2R4	2.1

La distribución anterior transformada en millones de ejes equivalentes de 8.2 ton sería:

- Por fatiga en las capas estabilizadas: 81.0
- Por deformación en capas no estabilizadas: 97.8

La estructura tendrá las siguientes características:

Tabla 4.4 Características estructurales de diseño DISPAV-5 en el corredor México-Nogales en el km 89.1.

Capa	Espesor (cm)	VRSz (%)	E (kg/cm ²)	Modulo de Poisson	Vida previsible	
					Def	Fatiga
Carpeta	24.5		30,000	0.35		113.0
Base granular	34	100	3,265	0.35	>150	
Subrasante	45	20	2,010	0.45	>150	
Terracería	Semi-inf	5	652	0.45	104.9	

La estructura se diseñó con un nivel de confianza del 85% para la cual el diseño fue apropiado a la vida previsible debido a deformación.

Tabla 4.5 Comparativa de tránsito previsible contra tránsito de proyecto en el Dispav-5.

	Tránsito previsible	Tránsito proyecto
<i>Deformación</i>	104.9	97.8
<i>Fatiga</i>	113.0	81.0

4.4. Diseño estructural de pavimentos flexibles con el Método AASHTO '93.

En el diseño bajo la metodología AASHTO en su versión 1993 se consideraron las siguientes propiedades iniciales:

- Para este análisis se considerará un periodo de diseño de 20 años, mismo periodo que se consideró para las evaluaciones realizados bajo la guía de diseño de pavimentos E-M y con la metodología del DISPAV-5, además de que este periodo de diseño cumple con las recomendaciones de la guía AASHTO '93 para caminos interurbanos con altos volúmenes de tránsito.
- Se considerará un camino con 2 carriles por sentido en el cuál el 100% de los vehículos se tomarán para el carril de diseño, optando solamente al carril izquierdo para realizar adelantamientos.
- El TDPA que se utilizará fue el mismo que se ha venido manejando en las metodologías anteriores siendo este de 13,889 vehículos en ambos sentidos, distribuyendo el transito de manera equitativa en ambos carriles.
- En cuanto a la distribución del tránsito vehicular se manejó de la misma forma que en el DISPAV-5, la cuál se aprecia en la tabla 4.3.
- La desviación estándar global debida al tránsito que es requerida para obtener el número estructural del método se manejó con un valor de 0.45, debido a que es el valor recomendado para pavimentos flexibles.
- El cambio o pérdida en la calidad de servicio que la carretera proporcionará al usuario se maneja como la diferencia entre los índices de servicio inicia y el final, el cual se utilizó con un valor de ΔPSI igual a 1.2.

El índice de servicio inicial se utilizó de 4.2 debido a que es el índice recomendado para pavimentos flexibles y el índice de servicio final de 3.0, esto debido a que se recomienda para caminos principales.

- Se consideró un terreno con capacidad de drenaje bueno y el porcentaje de tiempo en que la estructura estaría en niveles próximos a la saturación mayor a 25%. Con lo anterior se obtiene el valor del índice “ m_i ” de 1.00.
- El coeficiente estructural de la carpeta “ a_1 ” se obtuvo mediante gráfica la cual nos da un valor de 0.42. El módulo elástico del concreto asfáltico se consideró de 30,000 kg/cm².
- El coeficiente de capa “ a_2 ” en bases granulares se obtuvo mediante el CBR, el cual se consideró de 100, ya que es lo que marca la normativa de la SCT. Con esto el coeficiente es de 0.138.
- Finalmente el coeficiente de capa “ a_3 ” en base granular se obtuvo nuevamente mediante el CBR (en el diseño que se ha venido manejando no se considera subbase, en cambio se maneja la estructura del terraplén, por lo tanto se utilizará el CBR del terraplén para manejarlo como subbase debido a la falta de esta capa en el diseño inicial). El valor del CBR para esta capa se utilizó de 20, con lo que este coeficiente de capa quedó con un valor de 0.093.

Con la distribución de tránsito vehicular anterior y el TDPA mencionado el número de ejes sencillos equivalentes (ESALS) de 8.2 ton es de 74.2 millones. Los ESALS fueron calculados mediante la aplicación para pavimentos proporcionada por CEMEX, la cuál se calculó en su página de internet. Los cálculos de los ESALS quedaron como se muestra en la figura 4.26.

El número estructural se obtuvo mediante la gráfica de diseño para estructuras de pavimentos flexibles el cual corresponde, para este caso, a un valor de 5.6. Con lo anterior y en base a la fórmula $SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3$ se obtuvo la estructura que se muestra en la tabla 4.5.

Ejes Sencillos Equivalentes (ESALS) Calculados					
Tipo	Peso Kips	Nº en el 1er. año	Nº en la vida útil	FEC	ESALS
Sencillo	2.2	3249540	83008387	0.000267	22177
Sencillo	7.7	58806	1502179	0.027136	40762
Sencillo	8.8	305183	7795795	0.047034	366668
Sencillo	12.1	545984	13946974	0.179741	2506845
Sencillo	15.4	58806	1502179	0.507191	761891
Sencillo	22	88209	2253269	2.40983	5429995
Tandem	7.04	21292	543897	0.003335	1814
Tandem	7.26	21292	543897	0.003727	2027
Tandem	7.7	21292	543897	0.004618	2512
Tandem	8.8	226099	5775622	0.007586	43814
Tandem	9.9	103417	2641752	0.011875	31370
Tandem	17.6	58806	1502179	0.119051	178837
Tandem	30.8	88209	2253269	1.281506	2887577
Tandem	39.6	590088	15073596	3.817506	57543540
Tridem	11	38528	984185	0.006655	6549
Tridem	49.5	57792	1476277	2.964009	4375698
Total					74202076

Figura 4.27 Ejes sencillos equivalentes (Fuente: Imagen obtenida a partir de la aplicación de la metodología AASHTO en la página para diseño de pavimentos de CEMEX.
http://www.cemexmexico.com/co/co_pa_dp.html).

Tabla 4.6 Características estructurales de diseño AASHTO '93 en el corredor México-Nogales en el km 89.1.

Capa	Espesor (cm)	CBR (%)	E (kg/cm ²)
Carpeta	19.0		30,000
Base granular	25	100	
Subrasante	31	20	
Terracería	Semi-inf	5	

4.5. Resultados de los análisis realizados en la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista.

Los resultados obtenidos de los análisis realizados en la Guía de Diseño de Pavimentos E-M muestran la variación que se tiene en la estructura de un pavimento flexible solamente por realizar el análisis en diferente zona climática. Cabe recordar que tanto el tránsito vehicular, como las características de los materiales que componen la estructura se mantuvieron estables para los tres

análisis, en los que solamente se modificó el espesor de las diferentes capas para que los análisis del pavimentos cumplieran con los parámetros que se especificaron.

4.5.1. Análisis realizado con datos climáticos de la estación localizada en el Sistema Meteorológico Nacional.

El distrito federal presentó un comportamiento adecuado para el análisis del pavimento, en el cuál los espesores de las capas de la estructura tienen una configuración similar a lo que estamos acostumbrados, yendo de menor a mayor espesor, partiendo de la carpeta hacía la subrasante. Los espesores de la estructura que presentaron un comportamiento dentro de los parámetros especificados debido a las deformaciones tanto en la carpeta como en la estructura del pavimento se muestran en la tabla 4.7. En la tabla 4.8 se muestra el resumen de confiabilidad que presentó la guía para este análisis.

Tabla 4.7 Espesores estructurales para la ciudad de México.

Capa	Espesor (in)	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica	11.81	30
Base granular	17.82	45
Subrasante	22.83	58

Tabla 4.8 Resumen de confiabilidad de la ciudad de México.

Criterio de desempeño	Objetivo	Confiabilidad objetivo	Predicho	Confiabilidad predicha	Análisis
IRI Final (in/mi)	225	80	153.8	96.25	Pass
Agrietamiento Longitudinal (ft/mile)	1000	80	0	99.999	Pass
Agrietamiento de cocodrilo (%)	25	80	0	99.999	Pass
Agrietamiento transversal (ft/mi)	1000	80	1	99.999	Pass
Falla por fatiga, capa estabilizada	25	80			N/A
Deformaciones en la carpeta asfáltica (in)	0.2	80	0.14	86.91	Pass
Deformaciones en la estructura (in)	0.5	80	0.42	83.77	Pass

4.5.2. Análisis realizado con datos climáticos de la estación localizada en la ciudad de Zacatecas, Zacatecas.

La ciudad de Zacatecas fue el segundo análisis realizado, la cual como se mencionó en capítulos anteriores presenta condiciones semi desérticas, presentado calor en verano y con frío extremo en invierno para las condiciones Mexicanas. En este análisis se puede ver como la capa mas exigida es la carpeta asfáltica ya que presenta un espesor mayor al de la base granular que es su capa inmediata, lo cual se entiende debido a las condiciones climáticas adversas que presenta la ciudad. La tabla 4.9 contiene los espesores que cumplieron con los criterios del análisis, estos criterios se muestran en el resumen de confiabilidad que se muestra en la tabla 4.10.

Tabla 4.9 Espesores de la estructura en la ciudad de Zacatecas.

Capa	Espesor (in)	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica	14.17	36
Base granular	11.81	30
Subrasante	17.82	45

Tabla 4.10 Resumen de confiabilidad de la ciudad de Zacatecas.

Criterio de desempeño	Objetivo	Confiabilidad objetivo	Predicho	Confiabilidad predicha	Análisis
IRI Final (in/mi)	225	80	154.8	95.97	Pass
Agrietamiento Longitudinal (ft/mile)	1000	80	0	99.999	Pass
Agrietamiento de cocodrilo (%)	25	80	0	99.999	Pass
Agrietamiento transversal (ft/mi)	1000	80	1	99.999	Pass
Falla por fatiga, capa estabilizada	25	80			N/A
Deformaciones en la carpeta asfáltica (in)	0.2	80	0.14	86.86	Pass
Deformaciones en la estructura (in)	0.5	80	0.41	86.27	Pass

4.5.3. Análisis realizado con datos climáticos de la estación localizada en la ciudad de Mérida, Yucatan.

Finalmente la ciudad de Mérida, la cual presenta un clima tropical con altos índices de humedad todo el año. Esta ciudad debido a sus condiciones climáticas, no presentó un comportamiento como en los análisis anteriores, ya que aunque en los dos análisis anteriores se presentan espesores considerables, los materiales lograron que la estructura cumpliera los parámetros indicados, cosa que no se logró

para el análisis en esta ciudad. La tabla 4.11 muestra la estructura que presentó un mejor comportamiento en este análisis, cabe mencionar que con espesores menores y mayores al que se muestra aquí las deformaciones que la guía pronosticó fueron mas grandes que las indicadas en la tabla 4.12, la cual muestra el resumen de confiabilidad para este análisis.

Tabla 4.11 Espesores de la estructura en la ciudad de Mérida.

Capa	Espesor (in)	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica	16.00	40.64
Base granular	20.00	50.8
Subrasante	25	63.5

Tabla 4.12 Resumen de confiabilidad de la ciudad de Mérida.

Criterio de desempeño	Objetivo	Confiabilidad objetivo	Predicho	Confiabilidad predicha	Análisis
IRI Final (in/mi)	225	80	154.8	95.97	Pass
Agrietamiento Longitudinal (ft/mile)	1000	80	0	99.999	Pass
Agrietamiento de cocodrilo (%)	25	80	0	99.999	Pass
Agrietamiento transversal (ft/mi)	1000	80	1	99.999	Pass
Falla por fatiga, capa estabilizada	25	80			N/A
Deformaciones en la carpeta asfáltica (in)	0.2	80	0.24	28.8	Fail
Deformaciones en la estructura (in)	0.5	80	0.47	60.58	Fail

4.6. Análisis de resultados.

El diseño de las estructuras de pavimentos flexibles consta de diversas metodologías, las cuales nos llevarán a resultados diferentes ya que, aunque se busca el mismo objetivo como fin, cada método de diseño maneja diferentes parámetros o la información la manejan de forma diferente, tal es el caso simplemente de las características de tránsito, en donde, las tres metodologías utilizadas para este trabajo lo tratan diferente, desde el mas simple que es el Método AASHTO '93, donde se transforma el tránsito a ejes sencillos equivalentes de 8.2 toneladas, pasando por la metodología del Instituto de Ingeniería de la UNAM, que lo utiliza también como ejes equivalentes, pero en el cual, dependiendo el tipo de tránsito vehicular será distinto el daño para diferentes profundidades y finalmente la Guía de Diseño de Pavimentos E-M, la cual introduce el concepto de espectros de carga, mencionado anteriormente, además de que esta última también integra el factor ambiental al análisis que realiza.

Se puede apreciar como de las tres metodologías empleadas la que nos presentó espesores de capas de menor tamaño fue la metodología AASHTO '93.

La diferencia de los espesores de la estructura que proporciona la Guía de Diseño de Pavimentos E-M con sus predecesores, es claramente notoria, siendo la guía E-M lo último en metodologías de diseño de pavimentos en Norteamérica, la cual de inicio nos presenta espesores de capa mayores a las otras metodologías, pero de igual manera nos presenta diferencias de la estructura con la misma guía en diferentes regiones de México. De manera similar a los resultados proporcionados por la guía E-M, los datos de ingreso para realizar algún análisis con dicha metodología es diferente a los métodos anteriores, manejando algunos parámetros de manera similar a la guía AASHTO '93, pero muchos más requieren una obtención y procesamiento de datos mayor y preciso.

Las diferencias que existen en cuanto a los espesores entre los diferentes análisis realizados con la guía E-M se debe únicamente a la variación climática, llevándonos desde espesores de carpeta asfáltica de 30 cm para el caso de la ciudad de México, hasta estructuras que no cumplen con los lineamientos para ser consideradas en caminos de altas especificaciones, como fue en el caso del análisis realizado en la ciudad de Mérida. En el análisis realizado en la ciudad de Mérida se puede apreciar además de la diferencia en cuanto a espesores de la estructura, como en ciertas zonas del país utilizar las estructuras y configuraciones del pavimento que comúnmente se han venido empleando no nos llevan a diseños óptimos, lo cual nos llevaría a implementar diferentes configuraciones estructurales a las que hemos venido empleando.

La guía de diseño de pavimentos empírico – mecanicista nos muestra una perspectiva diferente respecto al diseño de pavimentos, en donde nos muestra todas las variables que pueden influenciar para la durabilidad de la estructura, así como la gran variación en cuanto a algunos parámetros de entrada, lo cual se puede apreciar claramente en el tránsito vehicular, ya que este contiene variables que van desde el tipo de vehículo que pasa y la carga que contenga hasta la hora del día en que pasan. Lo anterior va de la mano a la otra inclusión, el clima, se pudo apreciar notablemente la importancia de este en los diferentes análisis realizados ya que esto nos llevó desde tener una estructura que cumpliera con los parámetros que se le indicaron y características similares a lo que acostumbramos (pero que contiene espesores considerables, lo cual nos puede llevar a realizar una calibración de los modelos que utiliza la guía para las condiciones Mexicanas), así como a tener estructuras que no cumplieran los parámetros necesarios.

La guía E-M es una excelente herramienta de análisis, y eso lo puede respaldar el costo que se ha llevado generarla, además de los años de investigación que se ha tomado para su implementación. Lamentablemente en México y tal vez en muchos

países de Latinoamérica no contamos todavía con la cantidad de información necesaria para llevar a cabo análisis de la manera mas precisa, falta mucho trabajo por realizar, desde obtener los espectros de carga que se necesitan, las variaciones de tránsito diarias y mensuales por mencionar algunas características referente al tránsito vehicular, ademas de implementar una red de estaciones climáticas mas extensa a lo largo del país, por mencionar algunas observaciones. Es un trabajo que llevará tiempo pero que en su momento nos llevará a poder implementar metodologías mas precisas para las condiciones en donde se llevará a cabo el diseño.

CONCLUSIONES

El diseño de las estructuras que conforman las carreteras de un país se ha vuelto cada vez mas importante, debido a que por ellas se mueve una gran parte de la economía, ya sea como transporte de personas o como movimiento de cargas. Es por esto que se busca emplear adecuadamente las metodologías que representen el estado del arte del diseño de pavimentos, pero que también se adecue a las condiciones en las que se encuentre el país.

Debido a la investigación realizada sobre la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico – Mecanicista nos percatamos que no solamente México presenta problemas con la implementación de dicha metodología, ya que la cantidad de datos que se requieren sobrepasan lo que usualmente las agencias estatales recaudan, además de que los modelos que utiliza la guía no están calibrados para la mayoría de las zonas donde se piensa implementar.

La Guía de Diseño de Pavimentos E-M nos presenta un gran avance en cuanto a los métodos de diseño tradicionales, debido a que deja atrás las ecuaciones basadas en resultados empíricos para dar paso a metodologías empírico – mecanicistas. Además de incorporar el uso de software como herramienta de análisis, de esta forma el proyectista

podrá modificar las características en base a los recursos que se tengan en la zona donde se llevará a cabo la estructura.

Nos pudimos percatar de la importancia del EICM, primeramente en el análisis de sensibilidad, donde se realizaron poco mas de 100 análisis en tres regiones climáticas diferentes de México, para entender el impacto que tienen las 5 variables ambientales en los resultados que nos arroja la Guía de Diseño de Pavimentos E-M y de esta forma considerar el uso de las estaciones convencionales para propósitos de diseños de los pavimentos. Al realizar esto nos dimos cuenta de que se pueden utilizar dichas estaciones, siempre y cuando no se tengan estaciones automatizadas en las cercanías con las cuales realizar el análisis. Con las estaciones convencionales se debe tener en cuenta que el análisis puede presentara un error debido a la falta de datos como los requiere la Guía E-M.

Debido a las limitaciones que ofrecen las estaciones convencionales para diseñar con ellas, se utilizarán las estaciones meteorológicas automatizadas (EMA's), ya que estas proporcionan la información requerida en la guía. No obstante que el número de EMA's a nivel nacional no se compara para nada con las estaciones convencionales o con la cantidad de estaciones automatizadas que tienen en los Estados Unidos de América, nuestro número de estaciones en cuanto a kilómetros cuadrados por cada una de ellas es de 13,095 km² comparado con los 11,372 km² por estación en el país del norte. Lo anterior no nos dice que estamos bien con las estaciones que tenemos, pero si es un aliciente a que se esta trabajando con la información meteorológica en México para colocarnos a la altura de países con mayor capacidad adquisitiva.

Utilizando datos de las estaciones automatizadas se pudo observar la importancia que tiene el clima en el desempeño de un pavimento, ya que en los análisis realizados para las tres diferentes regiones ambientales se marcaron diferencias en cuanto a los espesores de la estructura requerida, hasta que se necesitaban diferentes materiales estructurales para que cumpliera con los requerimientos. Notando el impacto que tiene construir en una región con

altas temperaturas y elevados índices de humedad, siendo la zona de Mérida la que presentó las condiciones mas críticas en cuanto al análisis de la estructura y la ciudad de México fue la que presentó un clima menos agresivo para la estructura.

Sin embargo en cuanto a la parte de tránsito vehicular se necesita trabajar un poco mas en México para poder tener los espectros de carga, ya que a pesar de que ya se están tomando las mediciones que se requieren, se necesita trabajar un poco mas con dicha información para tenerla como se necesita en la Guía de Diseño de Pavimentos E-M y así nos presente análisis con valores que representen en su mayoría las condiciones nacionales.

En resumen, la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico – Mecanicista es una excelente herramienta de diseño y análisis, sin embargo habría que ser cautelosos con los resultados que nos arroja hasta el momento con los datos que tenemos en México, ya que comparándose con las metodologías utilizadas hasta ahora presenta diferencias considerables en cuanto a espesores estructurales, aunado principalmente a que nos se han calibrado los modelos utilizados en la Guía E-M para las condiciones nacionales, además de la falta de algunos datos.

Bibliografía

- Cemex, <http://www.cemexmexico.com/co/co_pa_dp.html>, Enero 2011.
- Huang, Yang H. Pavement Analysis and Design. Second edition. Upper Saddle River, NJ, EUA. Prentice Hall, 2004.
- McCartney, John S. (et al). Evaluation of the Enhanced Integrated Climatic Model for the Arkansas State Highway and Transportation Department. University of Colorado, Boulder, U.S.A., June 2010.
- NCHRP (National Cooperative Highway Research Program). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Champaign, Illinois, EUA, 2004.
- Ongel, J. Harvey. Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures using the Enhanced Integrated Climatic Model (EICM). University of California, Davis, U.S.A., August 2004.
- Quintero, Natalia M. Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model (EICM) for the Ohio SHRP Test Road at U.S. 23. Tesis (Master of Science). Athens, OH. U.S.A. Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, November 2007.

- Sharpe, Gary W. Distribution of the Recommended Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide (NCHRP proyect 1-37 A). Frankfort, Kentucky, U.S.A. June 2004.
- Sistema Meteorologico Nacional, <<http://smn.cna.gob.mx/emas/>>, Octubre 2010
- Sistema Meteorologico Nacional, <http://smn.cna.gob.mx/modernizacion/modernizacionSMN.pdf>, Octubre 2010.
- Witczac, Matthew W., Zapata, Claudia E., Houston, William N. Models incorporated into the current Enhanced Integrated Climatic Model NCHRP 9-23 proyect finding and additional changes after version 0.7. Tempe, Az, U.S.A. Arizona State University, December 2006.