



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

# PITRA

Programa de  
Infraestructura  
del Transporte

**DESARROLLO DE SOFTWARE DE  
ANÁLISIS Y DISEÑO DE PAVIMENTOS  
PARA COSTA RICA [LM-PI-UMP-057-R2](#)**

**PREPARADO POR**

Christopher Trejos-Castillo, José Pablo Aguiar-Moya, Luis

Guillermo Loría-Salazar



programa de infraestructura  
del transporte

PITRA

**San José, Costa Rica**

**Diciembre, 2016**

**UMP**

Unidad de  
Materiales y Pavimentos

# DESARROLLO DE SOFTWARE DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA COSTA RICA LM-PI-UMP-057-R2

Trejos-Castillo, Christopher<sup>1</sup>; Aguiar-Moya, José Pablo<sup>2</sup>; Loría-Salazar, Luis Guillermo<sup>3</sup>

1. Investigador, Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA-Lanamme UCR
2. Coordinador, Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA-Lanamme UCR
3. Coordinador General Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), Lanamme UCR

**Palabras Clave:** CR-ME, Mecanicista, Pavimento Flexible, Análisis y diseño

**Resumen:** Los conceptos mecanísticos - empíricos de pavimentos son la tendencia actual a nivel mundial para el análisis y diseño de pavimentos flexibles y rígidos. La parte mecanística de estas técnicas se encuentra en la determinación analítica-numérica de las respuestas de los pavimentos ante solicitaciones mecánicas específicas. Para el caso de los pavimentos flexibles, normalmente se emplea la solución analítica de multicapa elástica para obtener estas respuestas, a saber: esfuerzos, deformaciones y deflexiones.

CR-ME es la herramienta informática de la primera guía de diseño mecanística-empírica de Costa Rica, la cual permitirá mejorar la calidad de los diseños de estructuras de pavimentos en el país. Este software incluye características que sólo es posible encontrar en software de diseño de pavimentos flexibles con un alto costo. Considera las principales variables que afectan el diseño de pavimentos, tales como el clima, el tránsito y las características de los materiales.

El software incluye modelos calibrados para el país, incluyendo la investigación realizada en el LanammeUCR en materia de pavimentos para el diseño eficiente de las estructuras de pavimento, minimizando fallas prematuras que producen un sobre costo en los proyectos. El software está desarrollado en Visual Basic 6.0 y puede ser utilizado en sistemas operativos Windows de 32 y 64 bits.

Se pretende con este software, proveer a los ingenieros de carreteras de una aplicación fácil de utilizar como complemento de la guía de diseño mecanístico de pavimentos de Costa Rica y que les permita realizar diseños duraderos utilizando los principales avances en ingeniería de pavimentos.

---

## Referencias

1. Burmister, D. M. (1945). The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. Journal of Applied Physics , 89-94.
2. Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis and Desing. United States of America: Pearson Prentice Hall.
3. Trejos Castillo, Christopher. (2015) Proyecto final de graduación. Herramienta de cálculo complementaria a la Nueva Metodología de Diseño Mecanístico Empírico de Pavimentos Flexibles de Costa Rica. Universidad de Costa Rica.
4. Vargas Hernández, José Pablo. (2013) Proyecto final de graduación. Elementos fundamentales para el desarrollo de una guía de diseño de pavimentos empírico mecanística para Costa Rica. Universidad de Costa Rica.

# DEVELOPMENT OF A PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN TOOL FOR COSTA RICA [LM-PI-UMP-057-R2](#)

Trejos-Castillo, Christopher<sup>1</sup>; Aguiar-Moya, José Pablo<sup>2</sup>; Loría-Salazar, Luis Guillermo<sup>5</sup>

1. Researcher, Materials and Pavements Division, PITRA-Lanamme UCR
2. Researcher, Materials and Pavements Division, PITRA-Lanamme UCR
3. General Coordinator, Transport infrastructure Program (PITRA), Lanamme UCR

**Keywords:** CR-ME, Mechanistic, Flexible Pavement, Analysis and design

**Abstract:** The mechanistic-empirical approach for pavements analysis is the current trend worldwide for flexible and rigid pavements. The mechanistic part of these techniques refers to the analytical determination of the pavement responses associated to environmental and traffic loads. For flexible pavements, the analytical solution is typically based on the multilayer elastic theory, which helps in computing stresses, strains and deflections.

CR-ME is the computational tool associated to the mechanistic empirical flexible pavement design guide for Costa Rica, which will allow for a quality improvement in the national pavements. This software includes features available only in very expensive pavement design computational tools. It considers the main variables affecting the design, such as the climatic conditions, traffic and the material characterization.

The software includes calibrated models for the country, based on the research performed at LanammeUCR, to accomplish an efficient design of the pavement structures, minimizing the possibility of premature failures. The software was developed with Visual Basic 6.0 and it can be used with Windows 32 or 64 bits operating systems.

The intention of the software is to provide pavement engineers with an easy-to-use tool as a complement to the mechanistic empirical pavement design guide for Costa Rica, allowing them to make durable designs, based on current understanding of materials and pavement behavior.

---

## References

1. Burmister, D. M. (1945). The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. *Journal of Applied Physics*, 89-94.
2. Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. United States of America: Pearson Prentice Hall.
3. Trejos Castillo, Christopher. (2015) Proyecto final de graduación. Herramienta de cálculo complementaria a la Nueva Metodología de Diseño Mecánico Empírico de Pavimentos Flexibles de Costa Rica. Universidad de Costa Rica.
4. Vargas Hernández, José Pablo. (2013) Proyecto final de graduación. Elementos fundamentales para el desarrollo de una guía de diseño de pavimentos empírico mecánica para Costa Rica. Universidad de Costa Rica.

---

Trejos-Castillo, C., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. G. (2016). *Desarrollo de Software de Análisis y Diseño de Pavimentos para Costa Rica LM-PI-UMP-057-R2*. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

# Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

REPORTE: LM-PI-UMP-057-R2

## **DESARROLLO DE SOFTWARE DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA COSTA RICA**

Preparado por:

Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica

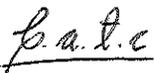
Diciembre, 2016

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-  
LanammeUCR [christopher.trejoscastillo@ucr.ac.cr](mailto:christopher.trejoscastillo@ucr.ac.cr)



Información técnica del documento

<b>1. Informe</b> LM-PI-UMP-057-R2		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> DESARROLLO DE SOFTWARE DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA COSTA RICA		<b>4. Fecha del Informe</b> Diciembre, 2016
<b>7. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>8. Notas complementarias</b>		
<b>9. Resumen</b>  <p><i>Los conceptos mecanísticos - empíricos de pavimentos son la tendencia actual a nivel mundial para el análisis y diseño de pavimentos flexibles y rígidos. La parte mecanística de estas técnicas se encuentra en la determinación analítica-numérica de las respuestas de los pavimentos ante sollicitaciones mecánicas específicas. Para el caso de los pavimentos flexibles, normalmente se emplea la solución analítica de multicapa elástica para obtener estas respuestas, a saber: esfuerzos, deformaciones y deflexiones.</i></p> <p><i>CR-ME es la herramienta informática de la primera guía de diseño mecanística-empírica de Costa Rica, la cual permitirá mejorar la calidad de los diseños de estructuras de pavimentos en el país. Este software incluye características que sólo es posible encontrar en software de diseño de pavimentos flexibles con un alto costo. Considera las principales variables que afectan el diseño de pavimentos, tales como el clima, el tránsito y las características de los materiales.</i></p> <p><i>El software incluye modelos calibrados para el país, incluyendo la investigación realizada en el LanammeUCR en materia de pavimentos para el diseño eficiente de las estructuras de pavimento, minimizando fallas prematuras que producen un sobre costo en los proyectos. El software está desarrollado en Visual Basic 6.0 y puede ser utilizado en sistemas operativos Windows de 32 y 64 bits.</i></p> <p><i>Se pretende con este software, proveer a los ingenieros de carreteras de una aplicación fácil de utilizar como complemento de la guía de diseño mecanístico de pavimentos de Costa Rica y que les permita realizar diseños duraderos utilizando los principales avances en ingeniería de pavimentos.</i></p>		
<b>10. Palabras clave</b> CR-ME, MECANICISTA, PAVIMENTOS FLEXIBLES, ANÁLISIS Y DISEÑO	<b>11. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>12. Núm. de páginas</b> 63
<b>13. Preparado por:</b> Ing. Christopher Trejos Castillo Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos  	<b>14. Revisado por:</b> Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  	<b>15. Aprobado por:</b> Ing. Luis Guillermo Loria Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  
Fecha: 14 / 12 / 16	Fecha: 14 / 12 / 16	Fecha: 14 / 12 / 16



## TABLA DE CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>8</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>2. INTERFAZ PRINCIPAL DEL CR-ME.....</b>	<b>11</b>
1.1 BARRA DE MENÚ.....	11
1.2 PROYECTO .....	12
1.3 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO .....	13
1.4 DATOS DE ENTRADA .....	14
<b>2. INTERFAZ TRÁNSITO.....</b>	<b>15</b>
2.1 VENTANA PRINCIPAL .....	15
2.2 INTERFAZ EJES EQUIVALENTES DE CARGA.....	16
2.3 INTERFAZ ESPECTRO DE CARGA SIN SERIES HISTÓRICAS.....	18
2.4 INTERFAZ ESPECTRO DE CARGA SIN SERIES HISTÓRICAS .....	20
<b>3. INTERFAZ DE CLIMA.....</b>	<b>22</b>
<b>4. INTERFAZ DE MATERIALES.....</b>	<b>23</b>
4.1 INGRESO DE DATOS DE LA CARPETA ASFÁLTICA .....	24
4.1.1 NIVEL 3 DE INGRESO DE DATOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA .....	25
4.1.2 NIVEL 2 DE INGRESO DE DATOS.....	26
4.1.3 NIVEL 1 DE INGRESO DE DATOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA .....	27
4.2 INGRESO DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO.....	28

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 3 de 63
--------------------------	---	----------------



4.2.1	NIVEL 3 DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO .....	28
4.2.2	NIVEL 2 DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO .....	29
4.2.3	NIVEL 1 DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO .....	30
4.2.4	CURVA MAESTRA.....	31
<b>5.</b>	<b>BASE Y SUBBASE.....</b>	<b>32</b>
5.1.1	BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO.....	33
5.1.2	BASE ESTABILIZADA CON LIGANTE.....	34
5.1.3	BASE Y SUBBASE GRANULAR NIVEL 3.....	34
5.1.4	BASE Y SUBBASE GRANULAR NIVEL 2.....	36
5.1.5	BASE Y SUBBASE NIVEL 1 .....	37
<b>6.</b>	<b>SUBRASANTE.....</b>	<b>39</b>
<b>7.</b>	<b>MODELOS DE PREDICCIÓN DEL DAÑO Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE .....</b>	<b>40</b>
<b>8.</b>	<b>SALIDA DEL SOFTWARE.....</b>	<b>46</b>
8.1	MÓDULOS.....	46
<b>9.</b>	<b>TEORIA DE MULTICAPA ELÁSTICA .....</b>	<b>50</b>
<b>10.</b>	<b>EJEMPLO CON CR-ME.....</b>	<b>53</b>
10.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	53
10.1.1	TRÁNSITO.....	53
10.1.2	CLIMA .....	54
10.1.3	CAPA ASFÁLTICA.....	55
10.1.4	BASE GRANULAR.....	56

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 4 de 63
--------------------------	---	----------------



10.1.5 SUBBASE..... 56

10.1.6 SUBRASANTE..... 57

10.2 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA ..... 57

**11. AVANCE DEL PROYECTO ..... 62**

**12. BIBLIOGRAFÍA..... 63**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

FIGURA 1. INTERFAZ PRINCIPAL ..... 11

FIGURA 2. VISTA DE LA BARRA DE MENÚ ..... 12

FIGURA 3. INFORMACIÓN DEL PROYECTO ..... 12

FIGURA 4. CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO ..... 13

FIGURA 5. DATOS DE ENTRADA ..... 14

FIGURA 6. INTERFAZ PRINCIPAL MÓDULO TRÁNSITO ..... 15

FIGURA 7. MENÚ PARA EL NIVEL 2 DE LA VARIABLE TRÁNSITO ..... 15

FIGURA 8. INTERFAZ EJES EQUIVALENTES DE CARGA..... 16

FIGURA 9. ALERTA EN QUE SE ESPECIFICA SI SE DESEA GUARDAR LOS DATOS EN UN ARCHIVO ..... 18

FIGURA 10. INTERFAZ ESPECTRO DE CARGA SIN SERIES HISTÓRICAS..... 19

FIGURA 11. ESPECTRO DE CARGA CON SERIES HISTÓRICAS ..... 21



FIGURA 12. VENTANA DE DATOS CLIMÁTICOS.....	23
FIGURA 13. SELECCIÓN DE LA CANTIDAD DE CAPAS.....	24
FIGURA 14. INGRESO DE LAS PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN EL NIVEL 3 .....	25
FIGURA 15. NIVEL 2 DE INGRESO DE DATOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA .....	26
FIGURA 16. NIVEL 1 DE CONOCIMIENTO DE LOS DATOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	27
FIGURA 17. NIVEL 3 DE INGRESO DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO .....	29
FIGURA 18. NIVEL 2 DE INGRESO DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO .....	30
FIGURA 19. NIVEL 1 DE INGRESO DE DATOS DEL LIGANTE ASFÁLTICO .....	31
FIGURA 20. CURVA MAESTRA.....	32
FIGURA 21. BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO .....	34
FIGURA 22. BASE ESTABILIZADA CON LIGANTE .....	34
FIGURA 23. VENTANA DE INGRESO NIVEL 3 BASE GRANULAR .....	36
FIGURA 24. NIVEL 2 DE INGRESO DE DATOS PARA BASES Y SUBBASES .....	37
FIGURA 25. NIVEL 1 DE INGRESO DE DATOS PARA BASE Y SUBBASE GRANULAR ...	38
FIGURA 26. DATOS DE ENTRADA MODELO UNIVERSAL.....	39
FIGURA 27. DATOS DE INGRESO SUBRASANTE PARA NIVELES 1, 2 Y 3 .....	40
FIGURA 28. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN .....	42



FIGURA 29. MODELO DE ESTIMACIÓN DE LAS REPETICIONES PERMITIDAS POR FATIGA DE ABAJO HACIA ARRIBA ..... 42

FIGURA 30. MODELO DE ESTIMACIÓN DE LAS REPETICIONES PERMITIDAS POR FATIGA DE ABAJO HACIA ARRIBA ..... 43

FIGURA 31. MODELO DE AHUELLAMIENTO ..... 43

FIGURA 32. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA..... 44

FIGURA 33. AHUELLAMIENTO EN LA BASE..... 45

FIGURA 34. AHUELLAMIENTO EN LA SUBRASANTE. .... 45

FIGURA 35. FATIGA EN BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO..... 46

FIGURA 36. MÓDULOS RESILIENTES MENSUALES PARA LAS CAPAS NO LIGADAS Y MÓDULO DINÁMICO MENSUAL DE LA CARPETA ASFÁLTICA..... 47

FIGURA 37. MÓDULOS RESILIENTES DE LAS CAPAS NO LIGADAS EN FUNCIÓN DE LA CARGA Y MÓDULO DINÁMICO MENSUAL DE LA CARPETA ASFÁLTICA ..... 48

FIGURA 38. DAÑO POR FATIGA, ÁREA AGRIETADA Y AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL ..... 49

FIGURA 39. AHUELLAMIENTO EN CADA CAPA ..... 49

FIGURA 40. MÓDULOS RESILIENTES DE LAS CAPAS NO LIGADAS ..... 58

FIGURA 41. DAÑO POR FATIGA..... 59

FIGURA 42. ÁREA AGRIETADA ..... 60

FIGURA 43. AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL..... 60

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 7 de 63
--------------------------	---	----------------



FIGURA 44. AHUELLAMIENTO EN CADA CAPA ..... 61

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PORCENTAJE Y FACTOR DAÑO DE CADA TIPO DE VEHÍCULO..... 54

TABLA 2. DATOS CLIMÁTICOS..... 55

TABLA 3. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES..... 62



## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de CR-ME se enmarca dentro del objetivo final de obtener la primera guía de diseño mecanística-empírica de pavimentos para Costa Rica, labor en ejecución por parte del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme) de la Universidad de Costa Rica (UCR).

Al ser la estructura de pavimentos flexibles la más utilizada en el país para la construcción de carreteras y ser el asfalto el material ingenieril más utilizado, es de gran importancia contar con un software que permita diseñar las estructuras de pavimento asfáltico de manera más eficiente y permitir un ahorro al país en la construcción de carreteras que tengan una vida útil mayor.

CR-ME es un programa informático de análisis de pavimentos flexibles, que permite calcular el desempeño del pavimento a las cargas aplicadas por los vehículos, basados en la teoría de multicapa elástica y en modelos de predicción del desempeño de pavimentos desarrollados gracias a investigación del LanammeUCR. Para esto el ingeniero diseñador deberá colocar valores de espesores iniciales para valorar si soportan el tránsito pronosticado para el proyecto e iterar hasta obtener el diseño óptimo.

Este software es muy sencillo de utilizar, con una interfaz muy amigable que permite fácilmente calcular la deformación permanente en las capas de la estructura, además de calcular el daño por fatiga y el agrietamiento en la carpeta asfáltica.

Para la estimación de los módulos resilientes de las capas que conforman la estructura, el software utiliza modelos predictivos en función de las condiciones climáticas para variar este valor. Además de permitir al usuario utilizar modelos que consideren la propiedad esfuerzo-dependiente de los materiales granulares.

El tránsito esperado en el proyecto se puede estimar utilizando el enfoque de ejes equivalentes de carga o puede utilizarse espectros de carga, siendo este último una manera más específica

Reporte LM-PI-Ump-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 9 de 63
--------------------------	---	----------------



de tomar en cuenta la variable tránsito, la cual es una de las más importantes al realizar el diseño de la estructura.

Esta herramienta utiliza la teoría de multicapa elástica, basado en la teoría de Burmister (1943) y ampliada por Huang (1967). El software obtiene la respuesta del pavimento en puntos de interés para el diseño y luego utiliza estos valores obtenidos dentro de los modelos predictivos para calcular el daño que se producirá a lo largo de la vida útil esperada del proyecto, tanto por fatiga como por deformación permanente.

La presente versión es de prueba, es decir está en fase de verificación de los resultados obtenidos por el programa. Algunas mejoras posteriores se realizarán a la interfaz y a algunas funcionalidades.



## 2. INTERFAZ PRINCIPAL DEL CR-ME

Al iniciar el programa se desplegará la interfaz principal del programa. En la Figura 1 se muestra las principales características del programa.

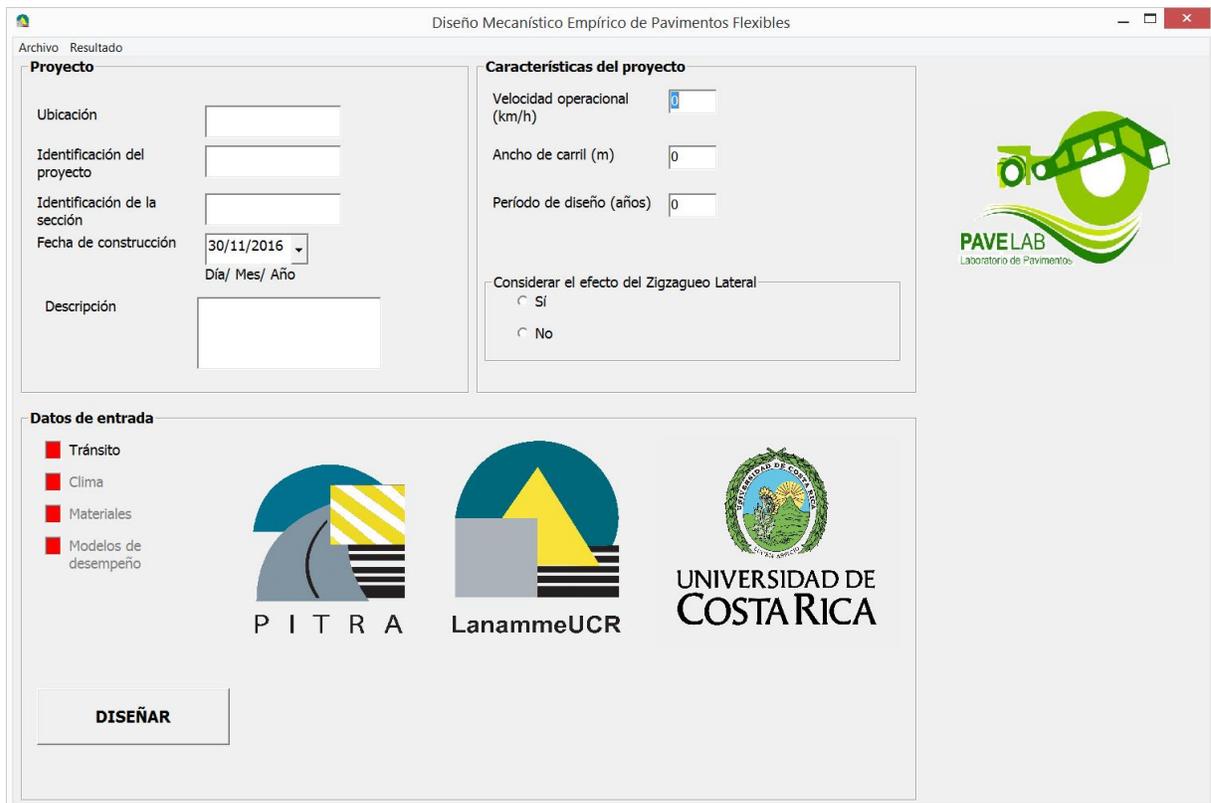


Figura 1. Interfaz principal

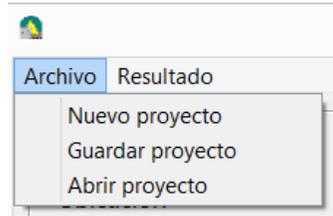
La interfaz se compone esencialmente de los elementos que se mostraran a continuación.

### 1.1 Barra de menú

En la parte superior de la Figura 1 se aprecia la barra de menú. En la barra de menú se encuentra el menú de Guardar Proyecto, Abrir Proyecto y Nuevo Proyecto. El menú de Resultado está inhabilitado por el momento. El menú Guardar Proyecto permite guardar un archivo con todos los datos del proyecto en un archivo \*.crm. El menú Abrir Proyecto permite abrir un archivo previamente guardado con los datos del proyecto y el menú Nuevo Proyecto



permite al usuario iniciar un nuevo proyecto, dando la opción de guardar los datos que ha ingresado.



**Figura 2. Vista de la Barra de menú**

A continuación, se detallan las funciones de las secciones de la interfaz principal.

## 1.2 Proyecto

**Proyecto**

Ubicación

Identificación del proyecto

Identificación de la sección

Fecha de construcción  Día/ Mes/ Año

Descripción

**Figura 3. Información del proyecto**

Cuenta con las siguientes sub-secciones (todos estos datos son opcionales, pero ayudan al diseñador a ubicar/referenciar el proyecto):

- Ubicación; el usuario escribe la ubicación del proyecto.
- Identificación del proyecto; se puede escribir un identificador (ID) para el proyecto a diseñar.
- Identificación de la sección; el usuario escribe un ID para la sección a diseñar.



- Fecha de construcción; se especifica la fecha en que se iniciará la construcción
- Descripción; el usuario podrá anotar datos extras del proyecto.

### 1.3 Características del proyecto

**Características del proyecto**

Velocidad operacional (km/h)

Ancho de carril (m)

Período de diseño (años)

Considerar el efecto del Zigzagado Lateral

Sí

No

**Figura 4. Características del proyecto**

En este apartado se encuentran datos generales del proyecto que serán necesarios para estimar con los modelos más precisos el daño esperado en la estructura al estar en uso. Estos datos son obligatorios y el software no permitirá avanzar en los módulos sin haber completado los datos solicitados.

Cuenta con las siguientes sub-secciones:

- Velocidad operacional: el usuario deberá introducir un valor en km/h de la velocidad operacional del proyecto. Este dato es necesario para la estimación del módulo dinámico de la carpeta asfáltica a una cierta velocidad.
- Ancho de carril: se debe ingresar un valor de ancho de carril en metros, el cual será utilizado de acuerdo a ciertos modelos para estimar el zigzagado lateral que se espera que ocurra cuando la carretera esté en funcionamiento.
- Período de diseño: es el tiempo en años de vida útil esperada para el proyecto.



- Considerar el efecto del Zigzagueo Lateral; el ingeniero diseñador podrá especificar si desea utilizar los modelos que consideran que los vehículos abarcarán una huella variable, lo cual reduce el daño, ya que la aplicación de carga no se da en todas las ocasiones en el mismo lugar o puede considerar el caso más crítico, en el cual no considera el zigzagueo lateral.

#### 1.4 Datos de entrada

**Datos de entrada**

- Tránsito
- Clima
- Materiales
- Modelos de desempeño

PITRA LanammeUCR

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

**DISEÑAR**

Figura 5. Datos de entrada

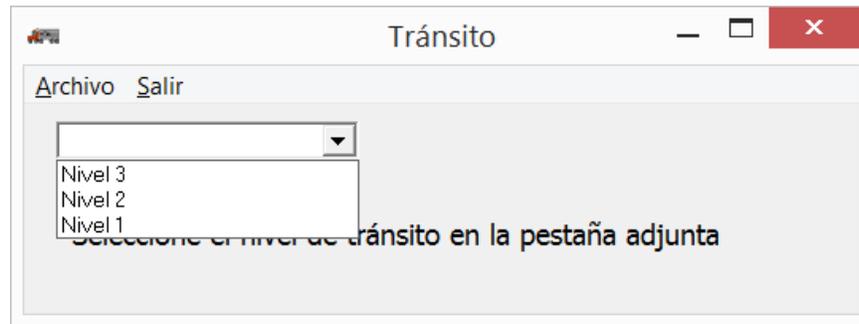
En esta sección se debe dar click al botón en que se quiere ingresar los datos. Se mostrarán en rojo las opciones que aún no hayan sido completadas y en verde las que ya se han completado. Para acceder a Tránsito debe de haberse completado todas las características del proyecto. Podrá accederse al módulo Clima únicamente luego de haber completado todos los datos necesarios para Tránsito y así sucesivamente para poder acceder a los demás módulos. Se podrá dar click al botón de DISEÑAR únicamente después de haber completado todos los módulos.

A continuación, se describirá cada uno de los módulos de ingreso de datos: Tránsito, Clima, Materiales y Modelos de desempeño, además de indicar la funcionalidad del botón DISEÑAR.



## 2. INTERFAZ TRÁNSITO

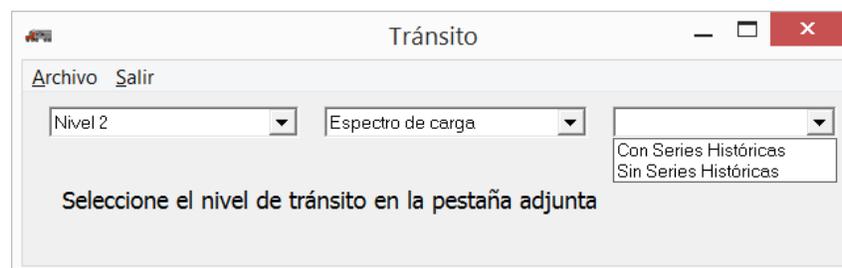
### 2.1 Ventana principal



**Figura 6. Interfaz principal módulo Tránsito**

El menú principal cuenta con las sub-secciones:

- Archivo: el usuario podrá guardar los datos de Tránsito ingresados o Abrir los datos de Tránsito previamente guardados en un archivo \*.tra. Esto le permitirá probar diferentes datos de entrada de tránsito.
- Salir: permite al usuario salir del módulo tránsito sin guardar los datos ingresados.
- Selección de nivel: se selecciona el nivel de conocimiento de la variable Tránsito, tal como se muestra en la Figura 6 donde se selecciona alguno de los tres niveles de entrada. En el caso del Nivel 2, se abrirá otro menú en el que se podrá elegir entre utilizar Ejes Equivalentes o Espectro de Carga. En caso de elegir Espectro de Carga, el usuario deberá elegir entre Con o Sin Series Históricas, lo cual abrirá ventanas distintas, este menú puede verse en la Figura 7.



**Figura 7. Menú para el Nivel 2 de la variable Tránsito**



## 2.2 Interfaz Ejes Equivalentes de Carga

Tránsito

Archivo Salir

Nivel 3

**Ejes Equivalentes de Carga**

Cálculo de ejes equivalentes de 8.2 T con series históricas

N (8.2 T) 0

Cálculo de ejes equivalentes de 8.2 T sin series históricas (AASHTO 93)

TPD año inicial (TPDi) 0 Crecimiento vehicular (%) 0 Factor de distribución direccional (%) 0

Factor de distribución por carril (%) 0

ESAL durante la construcción (Nc) 0 Porcentaje atraído (%) 0 Porcentaje generado (%) 0

Tipo de vehículo	Porcentaje del TPDS	Factor daño
Automóviles	0	0
Buses	0	0
C2P	0	0
C2G	0	0
C3	0	0
C3S2	0	0
C3S3	0	0

Nivel de confianza de la variable Tránsito (%) 90 Factor de amplificación del tránsito 0

ESAL calculado  Cálculo de ESAL

Guardar

**Figura 8. Interfaz Ejes Equivalentes de Carga**

Esta ventana aparecerá cuando el usuario elija el Nivel 3 o el Nivel 2, con la opción Ejes Equivalentes de Carga. Se deberán ingresar los siguientes datos:

- Selección entre Cálculo de ejes equivalentes de 8.2 T con o sin series históricas: al elegir uno o el otro bloqueará algunas casillas.

Si el usuario elige la opción con series históricas, se le abrirá la siguiente opción:

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 16 de 63
--------------------------	---	-----------------



- Casilla N(8.2 T): en esta campo de texto el usuario deberá escribir la cantidad de ejes equivalentes esperados a lo largo del proyecto realizado mediante un estudio previo tomando en consideración series históricas.

En los casos en que el usuario elija la opción sin series históricas, las opciones que se le abrirán son las siguientes:

- TPD inicial (TPDi): acá se introduce el tránsito promedio diario inicial del proyecto, este dato puede ser obtenido mediante conteos por parte del diseñador de la carretera. Valores iguales a 0 o negativos llevarán a un error en el programa.
- Crecimiento vehicular: es la tasa esperada de crecimiento geométrico de la cantidad de vehículos transitando la carretera. Este valor debe ser mayor o igual que cero.
- Factor de distribución direccional (%): se debe especificar qué porcentaje del TPD transita por el sentido del carril a diseñar, normalmente este valor es un 50% a menos que haya un estudio que especifique los valores reales. Este debe ser un valor mayor que 0 y menor que 100, en caso contrario se tendrá un error.
- Factor de distribución por carril (%): se debe especificar qué porcentaje del total de camiones que transitarán la carretera van por el carril más crítico, este dato es importante al diseñar una carretera con un carril de ascenso, pues en estos casos habrá una mayor cantidad de vehículos pesados transitando por el carril de ascenso, lo cual deberá considerarse en el diseño de este carril. Este debe ser un valor mayor que 0 y menor que 100, en caso contrario se tendrá un error.
- Tabla de ingreso del porcentaje de cada tipo de vehículo y el factor daño promedio estimado de cada tipo de vehículo: el usuario especificará el porcentaje del TPD que corresponde a cada tipo de vehículo y el factor daño de cada vehículo, el cual es una medida del daño producido por el vehículo, con respecto a un eje equivalente de 8,2 toneladas. Es importante mencionar que valores negativos llevarán a un error o los casos en que los porcentajes no sumen 100%.
- Nivel de confianza: El software con un modelo estadístico predice los ejes equivalentes esperados para una confiabilidad especificada por el usuario. Un valor de 50% llevará al valor sin modificación debido al Nivel de confianza.

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 17 de 63
--------------------------	---	-----------------



En ambos casos se habilitarán las siguientes opciones:

- ESAL durante la construcción: en esta casilla el usuario introducirá la cantidad de ejes equivalentes de carga que se contaron durante la construcción de la carretera. El ingeniero diseñador puede no considerar esta variable colocando un 0.
- Porcentaje atraído: representa el porcentaje de vehículos que se estima estará atrayendo el proyecto.
- Porcentaje generado: representa el porcentaje de vehículos que se estima estará generado la construcción de la carretera.
- Factor de amplificación: es un factor multiplicativo que permite al ingeniero encargado del diseño valorar el efecto que tendrá en el diseño algún error en la cuantificación de la variable Tránsito, un valor de 1 indica el caso sin afectación.

Con el botón Cálculo de ESAL, el usuario podrá ver la cantidad de ejes equivalentes estimados para el proyecto. Luego al dar click en el botón Guardar, el software preguntará si desea Guardar los datos en un archivo \*.tra tal como se muestra en la Figura 9. En caso de que el usuario dé click en Sí, se abrirá una ventana en la que el usuario podrá elegir una ubicación para salvar el archivo. Esta opción está disponible en todas las ventanas de ingreso de los datos de la variable Tránsito. Luego de dar click en Guardar se cerrará la ventana de Tránsito.

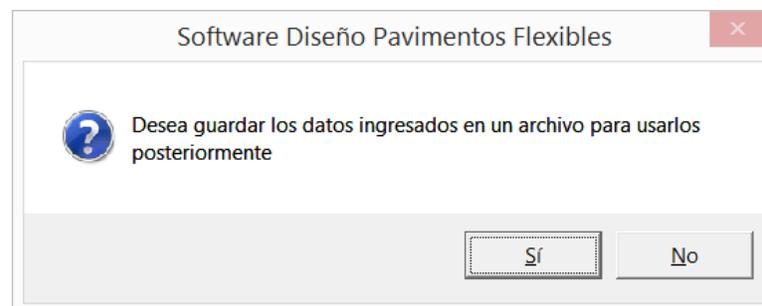


Figura 9. Alerta en que se especifica si se desea guardar los datos en un archivo

### 2.3 Interfaz Espectro de Carga Sin Series Históricas

Esta ventana aparecerá cuando el usuario elija el Nivel 2 con la opción Espectro de carga sin series históricas. Deberá ingresar los siguientes datos:

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 18 de 63
--------------------------	---	-----------------



Tránsito

Archivo Salir

Nivel 2 Espectro de carga Sin Series Históricas

**Espectro de carga Sin Series Históricas**

**Cálculo de las repeticiones esperadas sin series históricas (AASHTO 93)**

TPD año inicial  Crecimiento vehicular (%)

Factor de distribución por carril  Factor de distribución direccional

Tipo de vehículo	Porcentaje del TPDS
Automóviles	55
Buses	12
C2P	5.5
C2G	8.1
C3	4.2
C3S2	9.9
C3S3	5.3

Nivel de confianza de la variable Tránsito

Factor de amplificación de las repeticiones

Eje Simple		Eje Simple Dual		Eje Tándem		Eje Tridem	
Rango de cargas, kg	Carga representativa, kg	Porcentaje	Repeticiones esperadas				
0-500	250	0.03	448				
500-1000	750	0.25	3739				
1000-1500	1250	2.93	43831				
1500-2000	1750	12.62	188791				
2000-2500	2250	7.75	115937				
2500-3000	2750	4.72	70609				
3000-3500	3250	4.8	71806				
3500-4000	3750	10.56	157974				
4000-4500	4250	28.26	422760				
4500-5000	4750	20.76	310562				

Calcular las repeticiones esperadas      Guardar

**Figura 10. Interfaz Espectro de Carga sin series históricas**

- El TPD año inicial, el crecimiento vehicular, el factor de distribución por carril, el factor de distribución direccional, el nivel de confianza y el porcentaje de cada tipo de vehículo fueron descritos en la sección anterior.
- El Factor de amplificación de las repeticiones, es un factor de ajuste que permite al diseñador valorar el efecto en una mala estimación de la variable tránsito, un factor de 1 representa el caso sin variar la cantidad de repeticiones.



- La tabla que indica el rango de los valores de las cargas en kilogramos para cada tipo de eje (eje simple, simple dual, tándem o trídem), solicita al usuario una carga representativa en kilogramos, un porcentaje de cada una de las cargas de cada tipo de eje y el espacio de repeticiones esperadas se llena automáticamente con los datos ingresados por el usuario al dar click al botón de Calcular las repeticiones esperadas. La carga representativa debe ser un valor que esté entre el rango de la carga. Se recomienda al ingeniero que haga un análisis estadístico con un nivel de confiabilidad de los datos para obtener este dato. Los porcentajes de cada carga deben sumar un total del 100 para completar el espectro de carga.
- El botón Calcular las repeticiones esperadas permite al usuario visualizar cuántas repeticiones de una carga específica para un tipo de eje se esperan durante la vida útil del proyecto.
- El botón “Guardar” guarda los datos ingresados por el usuario y cerrará la ventana. También consultará si desea guardar los datos en un archivo \*.tra igual como se describió en la sección anterior.

## 2.4 Interfaz Espectro de Carga sin Series Históricas

Esta ventana aparecerá al elegir el Nivel 1 de conocimiento en la lista desplegable o al elegir el Nivel 2 con la opción Espectro de Carga Con Series Históricas. La forma en que el ingeniero calcula la cantidad de repeticiones en cada uno de los niveles de conocimiento descritos anteriormente queda a su criterio, sin embargo se recomienda que para el Nivel 1 se haya realizado mediciones reales a la carretera a ser rehabilitada, mientras que para el Nivel 2 con Espectro de Carga Con Series Históricas, se espera que el ingeniero tenga una base de datos robusta de la cuál con un análisis estadístico logrará estimar la cantidad de repeticiones de carga esperadas para cada intervalo de cada tipo de eje.

La ventana que se presentará al usuario es igual a la que se muestra en la Figura 11. Las opciones que tiene esta opción son las siguientes:

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 20 de 63
--------------------------	---	-----------------

Tránsito

Archivo Salir

Nivel 1

**Espectro de carga**

Repeticiones esperadas acumuladas para el período de diseño

Factor de amplificación de las repeticiones

Eje Simple Eje Simple Dual Eje Tándem Eje Tridem

Rango de cargas, kg	Carga representativa, kg	Repeticiones esperadas
0-500	0	0
500-1000	0	0
1000-1500	0	0
1500-2000	0	0
2000-2500	0	0
2500-3000	0	0
3000-3500	0	0
3500-4000	0	0
4000-4500	0	0
4500-5000	0	0
5000-5500	0	0
5500-6000	0	0
6000-6500	0	0
6500-7000	0	0
7000-7500	0	0
7500-8000	0	0
8000-8500	0	0
8500-9000	0	0
9000-9500	0	0
9500-10000	0	0
10000-10500	0	0
10500-11000	0	0

Guardar

**Figura 11. Espectro de carga con Series Históricas**

- La tabla de rango de cargas en kilogramos para cada tipo de eje, solicita al usuario ingresar una carga representativa, tal como se describió en la ventana anterior, además que en este caso el ingeniero a cargo del diseño deberá introducir las repeticiones esperadas que obtuvo mediante su estudio.
- Factor de amplificación de las repeticiones: tiene la misma funcionalidad descrita en la sección anterior.



### 3. INTERFAZ DE CLIMA

Los materiales que componen la estructura de un pavimento, son fuertemente afectados por las condiciones climáticas. Costa Rica, al ser un país tropical, presenta variaciones considerables de temperatura y humedad dependiendo de la época del año.

La humedad afecta a los materiales granulares que conforman la base, subbase y subrasante, mientras que la temperatura tiene un efecto principalmente sobre la carpeta asfáltica, la cual está conformada por un material viscoelástico. Lo anterior hace que su resistencia esté ligada a la temperatura.

Para afectar el módulo resiliente de las capas no ligadas, se utiliza el índice de humedad de Thornwaite (TMI por sus siglas en inglés), el cual el usuario puede calcular ya sea utilizando algún modelo basado en la temperatura y la precipitación o un modelo que considere más variables climáticas (humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar), tal como el modelo de Penmann-Monteith. De momento, el software no realiza el cálculo del índice de humedad Thornwaite, sin embargo, se espera obtener datos de las estaciones climáticas del país para que el usuario pueda elegir una o varias estaciones y que se carguen los datos de temperatura y TMI automáticamente.

En la Figura 12 se muestra la ventana de datos climáticos. Las funciones son las siguientes:

- Tabla de ingreso del índice de humedad de Thornwaite (TMI) y la temperatura mensual promedio: el usuario ingresará los datos solicitados para luego ser utilizados por el software en los modelos de afectación climática.
- El botón Guardar permite al usuario guardar los datos y le preguntará al usuario si desea guardar los datos en un archivo \*.cli. Esto permite al usuario considerar diferentes escenarios climáticos en distintos proyectos.

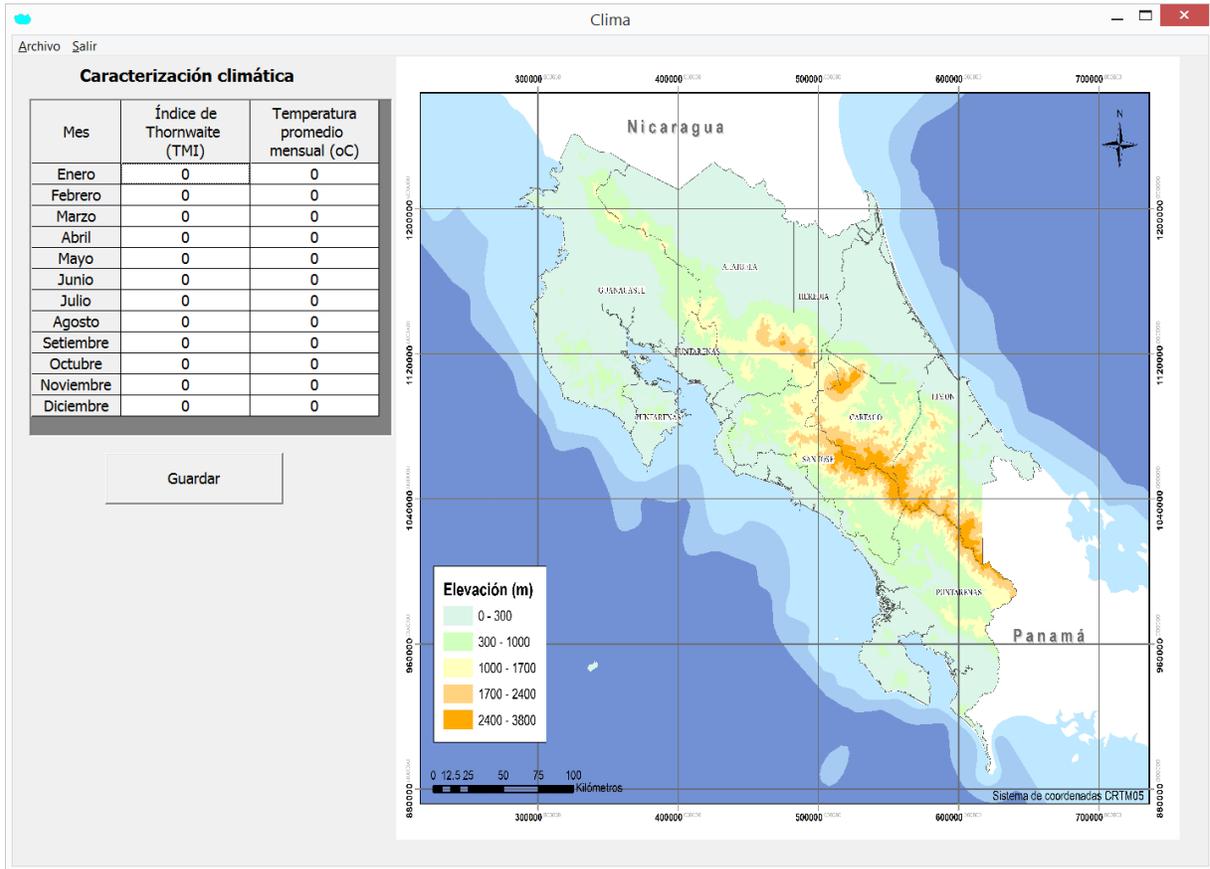


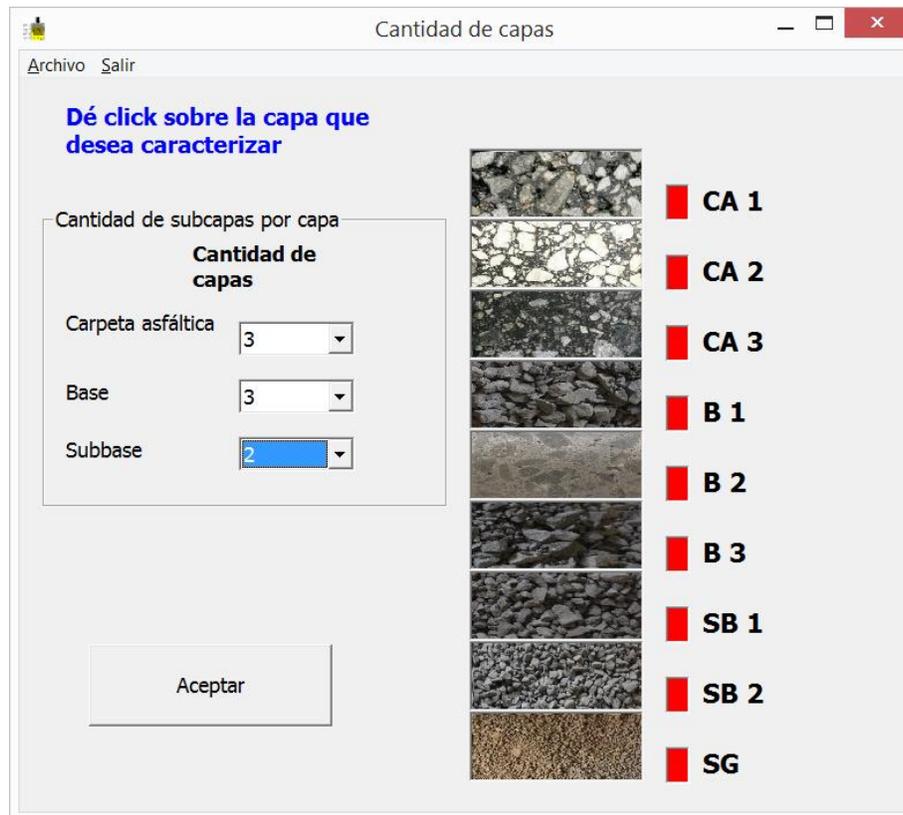
Figura 12. Ventana de datos climáticos

#### 4. INTERFAZ DE MATERIALES

Es función de la importancia del proyecto, la cual será definida por el usuario según la cantidad de ejes equivalentes esperados. Sin embargo, el programa permitirá al ingeniero combinar niveles de conocimiento de los materiales.

En la Figura 13 se muestra la selección de la cantidad de capas. Se puede elegir un máximo de 10 capas por efectos prácticos. El software da la opción de seleccionar 3 capas asfálticas. Esta práctica se recomienda en ingeniería de pavimentos para que la capa de ruedo sea realizada con una mezcla asfáltica drenante, la siguiente capa se diseña para que sea resistente a la deformación permanente con una granulometría más gruesa, mientras que la

última capa se realiza resistente a la fatiga con un porcentaje de asfalto mayor. Se permiten además 3 bases, 2 subbases y siempre se tendrá una subrasante.



**Figura 13. Selección de la cantidad de capas**

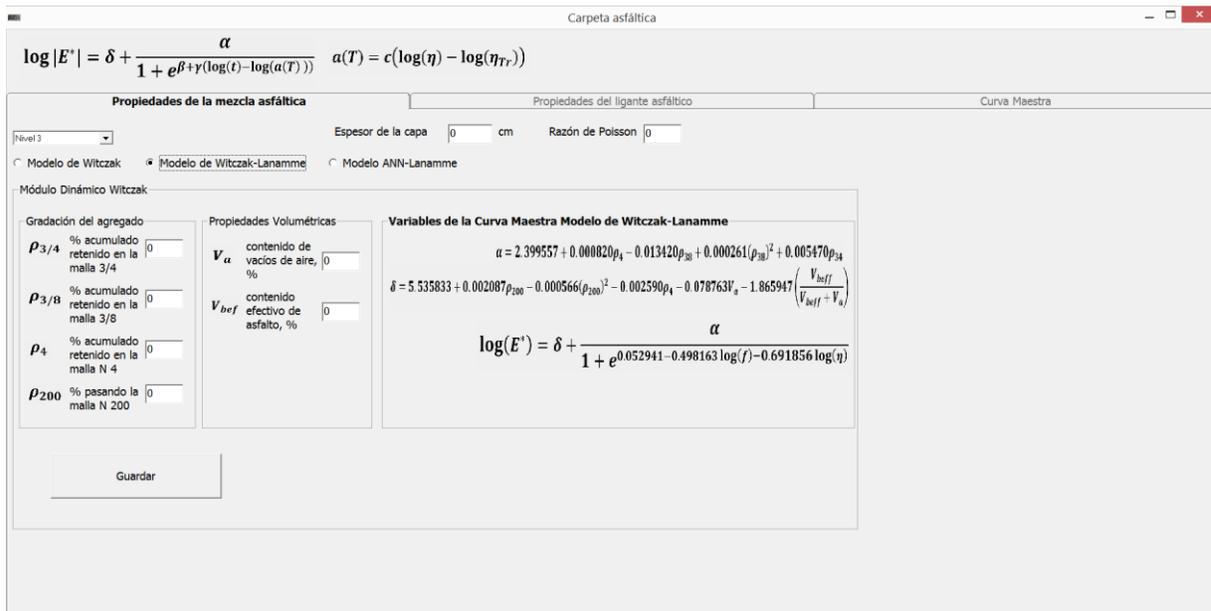
Para acceder al módulo de ingreso de datos de cada capa se deberá dar click a la imagen de la capa. Al dar click a las imágenes se mostrará la ventana específica de cada capa. A continuación, se mostrará la ventana destinada a ingresar los datos de la carpeta asfáltica.

#### 4.1 Ingreso de datos de la carpeta asfáltica

En la ventana que se muestra en la Figura 14, se ingresan los datos de la mezcla asfáltica. Se dispone de tres niveles de ingreso de los datos.

#### 4.1.1 Nivel 3 de ingreso de datos de la mezcla asfáltica

El nivel 3 es el nivel en que el usuario cuenta con menor conocimiento de los datos de la mezcla asfáltica, utilizando correlaciones con la granulometría de la mezcla y el volumen efectivo de asfalto y el porcentaje de vacíos, expresados como porcentaje. Posteriormente se explicarán el Nivel 1 y 2.



**Figura 14. Ingreso de las propiedades de la mezcla asfáltica en el Nivel 3**

Las propiedades de la ventana se describen a continuación:

- Se ingresa el espesor en centímetros que será evaluado en el proyecto para posteriormente verificar si cumple con las especificaciones establecidas, también se ingresa la razón de Poisson.
- Se elige cuál método se desea utilizar para la elaboración de la curva maestra y el cálculo del módulo dinámico para cada temperatura mensual. Se dispone de tres modelos, el modelo de Witczak, la calibración nacional Witczak-Lanamme, la cual considera los ligantes asfálticos presentes en el país y el modelo ANN-Lanamme, el cual utiliza una red neural con datos de ensayos realizados en el Lanamme.



- Se debe ingresar la granulometría del agregado de la mezcla, escribiendo los porcentajes acumulados retenidos en la malla 3/4, 3/8 y #4, además del porcentaje pasando la malla #200.
- Se ingresa el porcentaje de vacíos de aire y de contenido efectivo de asfalto, los cuales son utilizados en los modelos de predicción del módulo dinámico.

#### 4.1.2 Nivel 2 de ingreso de datos

Si el usuario elige el Nivel 2, se visualizará una ventana como la mostrada en la Figura 15.

The screenshot shows a software window titled 'Carpeta asfáltica'. At the top, there are two equations:  $\log |E^*| = \delta + \frac{\text{Max} - \delta}{1 + e^{\beta + \gamma(\log(f) - \log(a(T)))}}$  and  $a(T) = \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)$ . Below these are three tabs: 'Propiedades de la mezcla asfáltica', 'Propiedades del ligante asfáltico', and 'Curva Maestra'. The 'Propiedades de la mezcla asfáltica' tab is active, showing a dropdown menu for 'Nivel 2', input fields for 'Espesor de la capa' (0 cm) and 'Razón de Poisson' (0), and a section for 'Coeficientes Curva Maestra metodología de Arrhenius'. This section includes input fields for Max,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\Delta E_a$ , 'Temperatura de referencia, oF',  $V_a$  (contenido de vacíos de aire, %), and  $V_{bef}$  (contenido efectivo de asfalto, %). A 'Guardar' button is at the bottom.

**Figura 15. Nivel 2 de ingreso de datos de la mezcla asfáltica**

En este nivel se utilizará el modelo de Arrhenius, en este modelo no se toma en cuenta las propiedades específicas del ligante asfáltico utilizado. Para calcular los valores de las constantes Max,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  y  $\Delta E_a$ , puede utilizarse el software desarrollado en el LanammeUCR llamado IMODin. El link en donde se puede descargar este software es: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php/centro-de-descarga/i-modin/descarga-i-modin.html>

A continuación, se describen las características de esta ventana:



- Las constantes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  y  $\Delta E_a$ , se deben ingresar como producto de una optimización no lineal de los datos del ensayo AASHTO T307, en el cual se calcula el módulo dinámico a diferentes frecuencias y temperaturas.
- Se tiene una casilla de ingreso del espesor y la razón de Poisson, tal como se describió previamente.
- Se debe ingresar la temperatura de referencia en grados Fahrenheit, además del porcentaje de contenido de vacíos de aire y de asfalto efectivo.

#### 4.1.3 Nivel 1 de ingreso de datos de la mezcla asfáltica

Si el usuario elige el Nivel 1, se le desplegará una ventana como la que se muestra en la Figura 16.

Las indicaciones a ingresar se explican a continuación:

**Figura 16. Nivel 1 de conocimiento de los datos de la mezcla asfáltica**

- Las constantes,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  y  $c$  son obtenidas de una optimización no lineal con los datos del ensayo AASHTO T307 y los datos del ligante asfáltico, los cuales pueden ser interpretados como se verá en las ventanas siguientes.
- Los demás datos son similares al Nivel 2 descrito anteriormente.



El botón Guardar permitirá al usuario pasar a la pantalla de Propiedades del ligante asfáltico, la cual está bloqueada hasta que no se haya incorporado todos los datos solicitados para la mezcla asfáltica. En caso de que se haya seleccionado el Nivel 2, se enviará al usuario directamente a la pantalla de la Curva Maestra y no se tendrá acceso a las propiedades del ligante asfáltico.

## 4.2 Ingreso de datos del ligante asfáltico

Para definir las propiedades del ligante asfáltico, existen tres niveles de conocimiento de los datos, los cuales serán descritos a continuación:

### 4.2.1 Nivel 3 de datos del ligante asfáltico

En la Figura 17 se muestra la ventana del nivel 3 de ingreso de datos del ligante asfáltico. El usuario elegirá una manera de establecer el valor de A y VTS ya sea con el grado Superpave del ligante, el grado convencional AC o el grado de penetración convencional. En cada uno de los casos se le desplegará una lista de selección con la cual se accede a los valores especificados para cada tipo de ligante. El usuario deberá conocer la propiedad de su ligante para poder seleccionar el valor más adecuado. En Costa Rica, el ligante distribuido por RECOPE es generalmente AC-30.



Carpeta asfáltica

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log(t) - \log(a(T)))}} \quad a(T) = c(\log(\eta) - \log(\eta_{T_r}))$$

Propiedades de la mezcla asfáltica      Propiedades del ligante asfáltico      Curva Maestra

Nivel 3

Datos de ensayo convencional al ligante

Grado Superpave del ligante

Grado Convencional AC

Grado de Penetración Convencional

Grado de Penetración Convencional

Pen. 60-70

A-VTS para el ligante asfáltico envejecido RTFO

A 10.6508    VTS -3.5537    Aceptar

**Figura 17. Nivel 3 de ingreso de datos del ligante asfáltico**

#### 4.2.2 Nivel 2 de datos del ligante asfáltico

En este nivel el usuario deberá anotar los valores de resultados de ensayos tradicionales a ligantes asfálticos, tales como el ensayo de penetración, viscosidad Brookfield, el punto de ablandamiento. El software solicita al usuario que ingrese los datos de al menos 4 ensayos con temperaturas diferentes. Automáticamente el programa realizará la regresión lineal múltiple con los datos ingresados por el usuario y calcula el valor de A y VTS, además de graficar los datos del ensayo de susceptibilidad Viscosidad- Temperatura.



Carpeta asfáltica

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log(t) - \log(a(T)))}} \quad a(T) = c(\log(\eta) - \log(\eta_{TR}))$$

Propiedades de la mezcla asfáltica

Propiedades del ligante asfáltico

Curva Maestra

Nivel 2

Datos de ensayo convencional al ligante

Ensayo	Temperatura (oC)	Viscosidad (Poise)
Penetración	15	
Penetración	25	
Viscosidad Brookfield	60	
Viscosidad Brookfield	80	
Viscosidad Brookfield	100	
Viscosidad Brookfield	121.1	
Viscosidad Brookfield	135	
Viscosidad Brookfield	176	
Punto de ablandamiento		13000
Viscosidad Absoluta	60	
Viscosidad Cinemática	135	

**Susceptibilidad Viscosidad-Temperatura**

log log η (cPoise)

log T<sub>R</sub> (Rankine)

A-VTS para el ligante asfáltico envejecido RTFO

A  VTS

Aceptar

**Figura 18. Nivel 2 de ingreso de datos del ligante asfáltico**

#### 4.2.3 Nivel 1 de datos del ligante asfáltico

En este nivel, el usuario debe haber realizado el ensayo AASHTO T315, en el cual se obtiene el ángulo de fase y el módulo en cortante a al menos tres temperaturas. El software automáticamente realizará el gráfico de Susceptibilidad Viscosidad Temperatura con los datos ingresados y calculará los valores de A y VTS necesarios para el diseño del pavimento. Esta es la manera más precisa de caracterizar el ligante asfáltico a utilizar en el proyecto.



Carpeta asfáltica

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log(t) - \log(a(T)))}} \quad a(T) = c(\log(\eta) - \log(\eta_{TR}))$$

Propiedades de la mezcla asfáltica

Nivel 1

Ensayo AASHTO T315 a un velocidad angular de 10 rad/s

Temperatura (oC)	G* (Pa)	Ángulo de fase (grados)	Viscosidad (cP)

Susceptibilidad Viscosidad-Temperatura usando el ensayo AASHTO T315

log log η (cPoise)

log T<sub>R</sub> (Rankine)

A-VTS para el ligante asfáltico envejecido RTFO

A  VTS

Aceptar

$\eta = \frac{G^*}{10} \left( \frac{1}{\text{sen} \delta} \right)^{4.8628}$

Propiedades del ligante asfáltico

Curva Maestra

Figura 19. Nivel 1 de ingreso de datos del ligante asfáltico

#### 4.2.4 Curva Maestra

La curva maestra representa los módulos dinámicos en un rango de frecuencias reducidas. La frecuencia reducida toma en cuenta la frecuencia y la temperatura. Los valores más bajos de la curva maestra representan las temperaturas mayores y las frecuencias menores, es decir las peores condiciones para el pavimento; mientras que los valores mayores representan las temperaturas menores y las frecuencias mayores. Es importante considerar que los valores altos de módulo dinámico pueden producir fatiga, esto se ve reflejado en el diseño final, por lo tanto, el diseñador debe saber que no siempre un módulo alto representa una mejor condición.

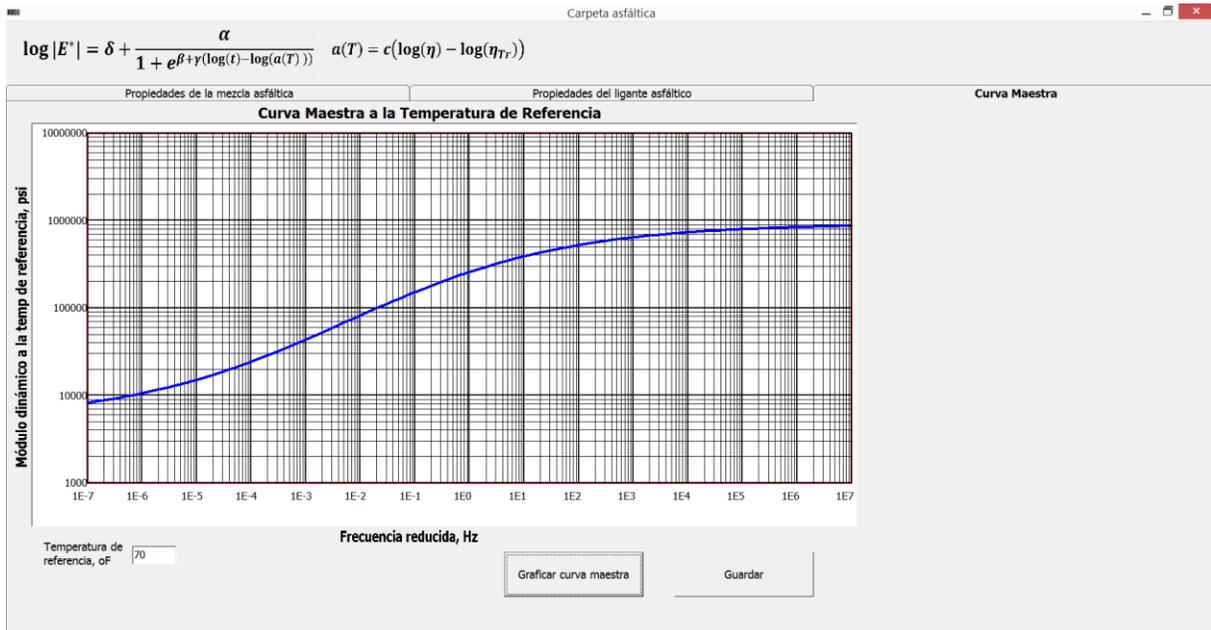


Figura 20. Curva Maestra

## 5. BASE Y SUBBASE

Para la caracterización de la base, el usuario contará con varias opciones. Puede colocar el caso en que se utiliza la base estabilizada con cemento o ligante o puede caracterizar su capa como una base granular. En el caso de la subbase el usuario podrá diseñarla como una granular con tres niveles distintos de conocimiento.

En las bases granulares, subbases y subrasantes, hay ciertos datos que deberán ser ingresados en todos los casos, los cuales describimos a continuación.

- Espesor: El usuario debe colocar un valor de espesor en centímetros. Este dato debe ser incluido en todas las opciones, incluyendo si se selecciona una base estabilizada con cemento o con ligante.
- Razón de Poisson: La razón de Poisson es un valor entre 0 y 0.5 el cual representa la relación entre la deformación unitaria horizontal y vertical. Este valor debe ser incluido en todas las opciones al igual que el espesor.
- P200: Representa el porcentaje pasando la malla #200.

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 32 de 63
--------------------------	---	-----------------

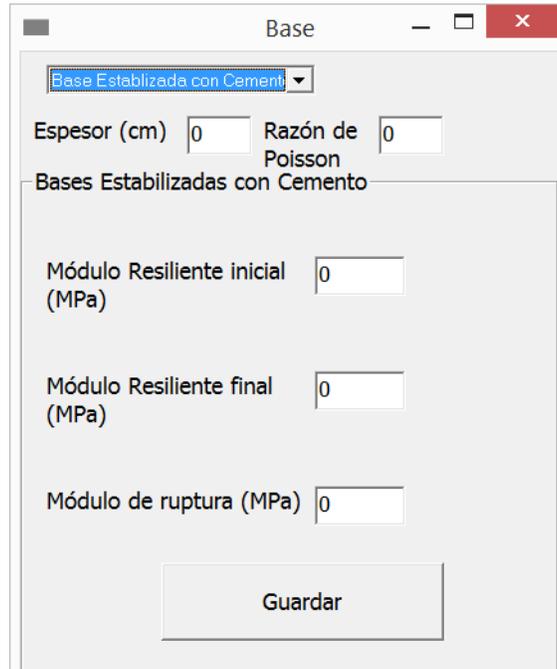


- Índice de plasticidad: Representa la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.
- Gravedad específica: representa la razón entre la densidad del material y la del agua.
- Densidad seca máxima: al realizar el ensayo Proctor es la densidad máxima obtenida a la humedad óptima. El valor deberá ser ingresado en  $\text{kg/m}^3$ .
- Humedad óptima: es la humedad obtenida con la densidad máxima en el ensayo Proctor. El valor debe ser ingresado como porcentaje.

En todos los casos, el botón Guardar permite al usuario salir de la ventana guardando los datos.

#### 5.1.1 Base estabilizada con cemento

Para el diseño utilizando una base estabilizada con cemento, el usuario deberá ingresar un valor del módulo resiliente inicial y final, el cual se estima como un 10% del valor de módulo inicial, según recomendaciones de la PCA, ya que esta capa perderá resistencia con el paso del tiempo por su agrietamiento. Además, deberá ingresar el valor del módulo de ruptura, el cual será utilizado para predecir la fatiga en esta capa.

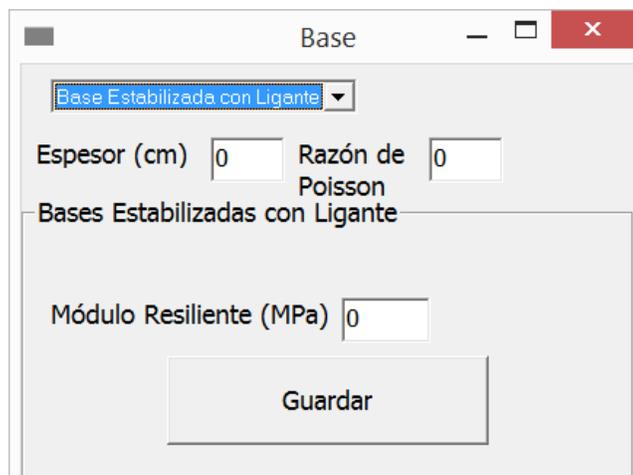


The screenshot shows a software window titled 'Base'. At the top, there is a dropdown menu set to 'Base Estabilizada con Cemento'. Below this, there are two input fields: 'Espesor (cm)' and 'Razón de Poisson', both containing the value '0'. A section titled 'Bases Estabilizadas con Cemento' contains three more input fields: 'Módulo Resiliente inicial (MPa)', 'Módulo Resiliente final (MPa)', and 'Módulo de ruptura (MPa)', all containing the value '0'. At the bottom of the window is a 'Guardar' button.

**Figura 21. Base estabilizada con cemento**

### 5.1.2 Base estabilizada con ligante

En esta opción el usuario deberá colocar el módulo resiliente en Mega Pascales.



The screenshot shows a software window titled 'Base'. At the top, there is a dropdown menu set to 'Base Estabilizada con Ligante'. Below this, there are two input fields: 'Espesor (cm)' and 'Razón de Poisson', both containing the value '0'. A section titled 'Bases Estabilizadas con Ligante' contains one input field: 'Módulo Resiliente (MPa)', containing the value '0'. At the bottom of the window is a 'Guardar' button.

**Figura 22. Base estabilizada con ligante**

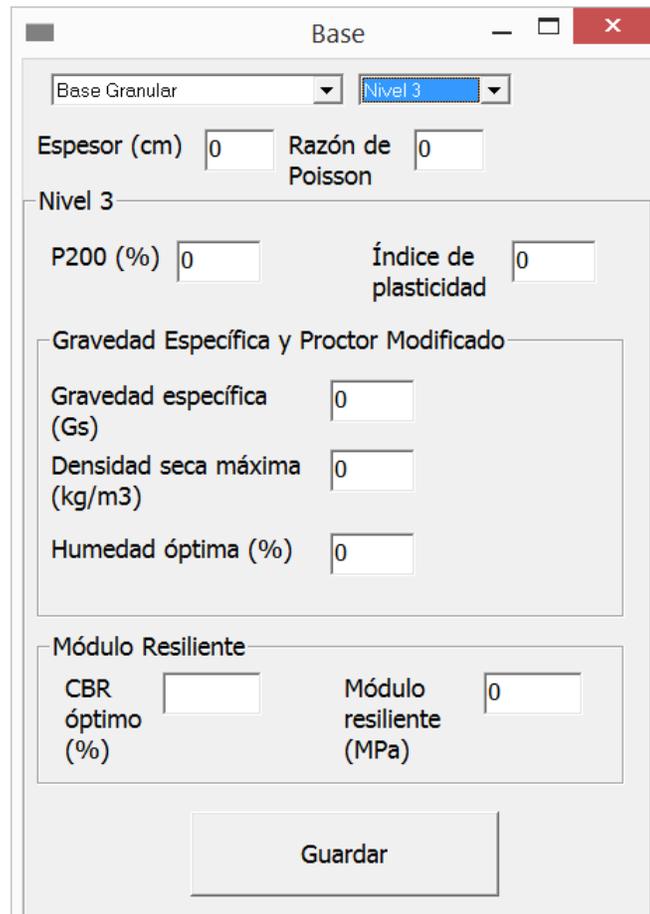
### 5.1.3 Base y subbase granular nivel 3

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 34 de 63
--------------------------	---	-----------------



En la ventana de ingreso de datos del nivel 3 para bases, subbases y subrasante, aparte de los datos que se describieron en la sección 5.3, el usuario deberá digitar ya sea el valor de CBR óptimo o el módulo resiliente en condiciones óptimas de la capa.

- CBR óptimo: Si se selecciona ingresar este dato. El software automáticamente estimará el valor del módulo resiliente con la fórmula  $M_r = 2555 \cdot CBR^{0.64}$ . El valor debe ser ingresado como un porcentaje. El ensayo de CBR (California Bearing Ratio), constituye la resistencia del material con respecto a una muestra patrón.
- Módulo resiliente: El usuario deberá ingresar el valor del módulo resiliente óptimo estimado. Al ser los materiales granulares esfuerzo-dependiente, este valor debe ser calculado para la presión producida por una carga de 20 KN, tal como la carga de un eje equivalente de carga.



Base

Base Granular Nivel 3

Espesor (cm) 0 Razón de Poisson 0

Nivel 3

P200 (%) 0 Índice de plasticidad 0

Gravedad Específica y Proctor Modificado

Gravedad específica (Gs) 0

Densidad seca máxima (kg/m3) 0

Humedad óptima (%) 0

Módulo Resiliente

CBR óptimo (%) 0 Módulo resiliente (MPa) 0

Guardar

Figura 23. Ventana de ingreso nivel 3 base granular

#### 5.1.4 Base y subbase granular nivel 2

Las diferencias en este nivel están en que se solicita la granulometría del material, por lo cual el usuario deberá introducir los parámetros de diámetro efectivo  $D_{10}$ ,  $D_{20}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$  y  $D_{90}$ , donde  $D_x$  representa el diámetro para el cual un  $x$  por ciento de la muestra tiene un peso menor o igual.

También en este nivel el usuario podrá elegir entre ingresar directamente el módulo resiliente o el CBR o si desea también puede introducir los valores  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  del modelo universal del suelo. Este ensayo y método de ensayo serán explicados en Base y subbase nivel 3.



Figura 24. Nivel 2 de ingreso de datos para bases y subbases

### 5.1.5 Base y subbase nivel 1

Este nivel representa el mayor conocimiento de los materiales. En este nivel el usuario deberá realizar algún ensayo como el de papel filtro. Lo anterior para obtener el valor de  $a_f$ ,  $b_f$ ,  $c_f$  y  $h_r$  para obtener la Curva Característica Suelo-Agua (SWCC por sus siglas en inglés).

Además, el usuario deberá incluir los valores de  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  del modelo universal, los cuales consideran el efecto del esfuerzo en los materiales. La ecuación que modela el módulo resiliente de los materiales no ligados en función de su esfuerzo principal y el esfuerzo octaédrico es la siguiente:

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 37 de 63
--------------------------	---	-----------------



$$M_r = k_1 p_a \left( \frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

El factor  $k_2$  debe ser positivo y afecta principalmente a los materiales granulares, mientras que el factor  $k_3$  debe ser negativo y afecta principalmente a los materiales cohesivos.

Base

Base Granular Nivel 1

Espesor (cm) 0 Razón de Poisson 0

Nivel 1

P200 (%) 0 Índice de plasticidad 0

Parámetros Curva SWCC

Ensayo de determinación de la succión del suelo con el método de papel filtro

af 0 cf 0

bf 0 hr 0

Gravedad Específica y Proctor Modificado

Gravedad específica (Gs) 0

Densidad seca máxima (kg/m3) 0

Humedad óptima (%) 0

Modelo Universal:

k1 0 k2 0 k3 0

Introducir los valores del ensayo para obtener los valores k1, k2 y k3

$$M_r = k_1 \cdot p_a \left( \frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Mr en MPa, esfuerzos en KPa

Guardar

Figura 25. Nivel 1 de ingreso de datos para base y subbase granular





The image shows three overlapping windows of a software application, each titled 'Subrasante'. Each window is for a different level: Nivel 3 (left), Nivel 2 (middle), and Nivel 1 (right). Each window contains input fields for various parameters:

- Nivel 3:** Profundidad a la roca firme (m), Razón de Poisson (0), P200 (0), Índice de plasticidad (0), Gravedad Específica y Proctor Modificado (Gravedad específica, Densidad seca máxima, Humedad óptima), Módulo Resiliente (CBR diseño, Módulo calculado), and a 'Guardar' button.
- Nivel 2:** Profundidad a la roca firme (m), Razón de Poisson (0), P200 (70), Índice de plasticidad (10), Granulometría (mm) (D10, D20, D30, D60, D90), Gravedad Específica y Proctor Modificado (Gravedad específica: 2.5, Densidad seca máxima: 1500, Humedad óptima: 30), Módulo Resiliente (radio selected), and a 'Guardar' button.
- Nivel 1:** Profundidad a la roca firme (m), Razón de Poisson (0), P200 (0), Índice de plasticidad (0), Parámetros Curva SWCC (Ensayo de determinación de la succión del suelo con el método de papel filtro: af, cf, bf, hr), Gravedad Específica y Proctor Modificado (Gravedad específica, Densidad seca máxima, Humedad óptima), and Modelo Universal (k1, k2, k3, equation, and 'Guardar' button).

Figura 27. Datos de ingreso subrasante para niveles 1, 2 y 3

## 7. MODELOS DE PREDICCIÓN DEL DAÑO Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Los modelos incorporados automáticamente son los incorporados en la MEPDG. Sin embargo, el software permite al usuario que introduzca modelos calibrados propios de los materiales de cada país.

El LanammeUCR, gracias a la investigación realizada con el Heavy Vehicle Simulator (HVS), el cual es un programa de ensayo acelerado de pavimentos, ha logrado obtener ecuaciones

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 40 de 63
--------------------------	---	-----------------



de predicción del daño por fatiga considerando la disminución del módulo resiliente en las capas no ligadas y el módulo dinámico de la carpeta asfáltica.

Para este propósito, el ensayo con el HVS consiste en ejercer una gran cantidad de pasadas de una carga sobre un pavimento para estimar el efecto a corto plazo de las cargas sobre una estructura determinada de pavimento y así simular el efecto de las cargas en la carretera. Para esto el LanammeUCR utiliza equipo de alta tecnología como el Falling Weight Deflectometer (FWD) el cual es un aparato de determinación del módulo resiliente de manera no destructiva, aplicando una carga al pavimento y midiendo las deflexiones para así estimar mediante una metodología llamada retrocálculo de módulos. La deformación permanente es medida por medio de sensores para cada una de las capas de la estructura del pavimento a lo largo del experimento acelerado.

Estos modelos permiten predecir el daño por fatiga tanto de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba producido en la carpeta asfáltica y el ahuellamiento producido en cada capa. En todos los modelos que se verán a continuación, si el usuario elige la opción de utilizar los modelos de MEPDG, el sistema automáticamente colocará los valores predeterminados por los modelos de esta guía y si escoge la opción Modelos definidos por el usuario, el sistema le permitirá utilizar los factores calibrados.

Al dar click al botón de Modelos, se desplegará una ventana como la mostrada en la Figura 28, en la cual el diseñador deberá ingresar los valores límite para cada uno de los deterioros que predice el software. Estos datos servirán al usuario para tomar una decisión respecto de si el diseño es adecuado o no.

	Valor límite	Confiabilidad (%)
Agrietamiento longitudinal (pies/milla)	2000	90
Área agrietada piel de cocodrilo (%)	25	90
Ahuellamiento Carpeta asfáltica (mm)	17	90
Ahuellamiento total (mm)	12.5	90

Aceptar

**Figura 28. Criterios de aceptación**

En la Figura 29, se muestra el modelo utilizado para predecir la cantidad de repeticiones de carga permitidas por fatiga de abajo hacia arriba. En este caso, se seleccionó la opción en que el usuario coloca los factores propios.

$$N_f = k_{f1} \beta_{f1} (\epsilon_t)^{k_{f2}} \beta_{f2} (E_{CA})^{k_{f3}} \beta_{f3}$$

kf1	1	Bf1	1
kf2	1	Bf2	1
kf3	1	Bf3	1

**Figura 29. Modelo de estimación de las repeticiones permitidas por fatiga de abajo hacia arriba**

Para el modelo de arriba hacia abajo, la guía MEPSDG recomienda utilizar un modelo similar al de la fatiga de abajo hacia arriba, por falta de estudios relacionados con este tipo de deterioro.



En la Figura 30, se muestra el caso en que el usuario seleccionó los modelos predeterminados por la guía MEPDG.

Modelos de desempeño

Agrietamiento de abajo hacia arriba | **Agrietamiento de arriba hacia abajo** | Ahuellamiento | Funciones de transferencia

Carpeta asfáltica

Base

Base Estabilizada con Cemento

Subbase

Subrasante

Guardar

Nf: repeticiones al agrietamiento por fatiga  
et: Deformación unitaria tangencial en la posición crítica (in/in)  
E: Módulo dinámico (psi)  
hac: espesor de la carpeta (in)  
Va: contenido de vacíos de aire (%)  
Vb: contenido de asfalto (% por volumen)

Modelo MEPDG  
 Modelo definidos por el usuario

$$N_f = 0.00432 \cdot k_{f1} \cdot (C)(C_H)\beta_{f1}(\epsilon_t)^{k_{f2}}\beta_{f2}(E_{CA})^{k_{f3}}\beta_{f3}$$

$$C = 10^{4.84 \left[ \frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right]}$$

$$C_H = \frac{1}{0.01 + \frac{12.00}{1 + e^{15.676 - 2.8186 h_{ac}}}}$$

kf1: 0.007566      Bf1: 1  
kf2: -3.9492      Bf2: 1  
kf3: -1.281      Bf3: 1

**Figura 30. Modelo de estimación de las repeticiones permitidas por fatiga de abajo hacia arriba**

Para el ahuellamiento en la carpeta asfáltica, se propone un modelo en función de la temperatura de la carpeta asfáltica, la cantidad de repeticiones de carga, la deformación unitaria vertical en la mitad de la capa y el espesor de la capa. La guía MEPDG propone los modelos que se aprecian en la Figura 31.

Modelos de desempeño

Agrietamiento de abajo hacia arriba | Agrietamiento de arriba hacia abajo | **Ahuellamiento** | Funciones de transferencia

Carpeta asfáltica

Base

Base Estabilizada con Cemento

Subbase

Subrasante

Guardar

n: número de repeticiones de carga  
T: Temperatura de la capa (oF)  
ep: Deformación unitaria permanente (in/in)  
er: Deformación unitaria vertical (in/in)  
hac: espesor de la carpeta (in)  
D: profundidad por debajo de la superficie (in)

Modelo MEPDG  
 Modelo definidos por el usuario

$$\Delta_{P(CA)} = \beta_{1r} k_z \epsilon_{r(CA)} \cdot 10^{k_{1r}} \cdot n^{k_{2r}} \beta_{2r} \cdot T^{k_{3r}} \beta_{3r} \cdot h_{CA}$$

$$k_z = (C_1 + C_2 D) \cdot 0.328196^D$$

$$C_1 = -0.1039(H_{CA})^2 + 2.4868H_{CA} - 17.342$$

$$C_2 = 0.0172(H_{CA})^2 - 1.7331H_{CA} + 27.428$$

k1r: -3.35412      B1r: 1  
k2r: 0.4791      B2r: 1  
k3r: 1.5606      B3r: 1

**Figura 31. Modelo de ahuellamiento**

Las funciones de transferencia, son modelos de tipo sigmoideal que permiten predecir un deterioro específico a partir del daño, calculado con la ley de Miner. Se utiliza una función sigmoideal debido a que permite colocar dos asíntotas.



Los deterioros predichos son el área agrietada, la cual se muestra en el pavimento como agrietamiento piel de lagarto y el agrietamiento longitudinal. El área agrietada se relaciona con el daño por fatiga de abajo hacia arriba y el agrietamiento longitudinal se relaciona con el daño por fatiga de arriba hacia abajo.

Los factores recomendados por la guía MEPDG son los mostrados en la Figura 32,  $C_1 = 1$ ,  $C_2 = 1$  y  $C_3 = 6000$  para el área agrietada, mientras que para el agrietamiento longitudinal los factores son:  $C_1 = 7$ ,  $C_2 = 3.5$  y  $C_3 = 1000$ .

Modelos de desempeño

Carpeta asfáltica

Base

Base Estabilizada con Cemento

Subbase

Subrasante

Guardar

Agrietamiento de abajo hacia arriba

Agrietamiento de arriba hacia abajo

Ahuellamiento

Funciones de transferencia

$$FC_{\text{abajo-arriba}} = \left( \frac{C_3}{1 + e^{(-C_1 \cdot 2C_2' + C_2 \cdot C_2' \cdot \log(D))}} \right) \cdot \left( \frac{1}{60} \right)$$

D: consumo por fatiga de abajo hacia arriba (%)

C1

C2

C3

$$FC_{\text{arriba-abajo}} = \left( \frac{C_3}{1 + e^{C_1 - C_2 \cdot \log(D)}} \right) \cdot 10.56$$

D: consumo por fatiga de arriba hacia abajo (%)

C1

C2

C3

**Figura 32. Funciones de transferencia**

Para tomar en cuenta el ahuellamiento en la base y en la subbase, la guía MEPDG recomienda factores de calibración. Estos factores pueden ser modificados por el usuario seleccionando la opción de Modelos definidos por el usuario. El usuario tendrá la posibilidad de seleccionar factores calibrados para materiales granulares o para granulares finos.

The screenshot shows a software window titled 'Modelos de desempeño'. On the left is a sidebar with a tree view containing 'Carpeta asfáltica', 'Base', 'Base Estabilizada con Cemento', 'Subbase', and 'Subrasante'. The 'Base' item is selected. The main area is titled 'Ahuellamiento Base' and contains the following fields and controls:

- delta p: ahuellamiento de la subcapa (in)
- ev: Deformación unitaria vertical promedio (in/in)
- n: número de repeticiones de carga
- hsuelo: espesor subcapa (in)

$$\Delta_{p(suelo)} = \frac{\beta_{s1} k_{s1} \varepsilon_v h_{suelo} \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_v} \right)}{e \left( \frac{\rho}{n} \right)^{\beta}}$$

Below the equation are two radio buttons: 'Granular' (selected) and 'Granular Fino'. Under 'Granular' are input fields for ks1 (1.673) and Bs1 (1). Under 'Granular Fino' are input fields for ks1 (1.35) and Bs1 (1). At the bottom left, there are radio buttons for 'Modelo MEPDG' (selected) and 'Modelo definidos por el usuario'. A 'Guardar' button is at the bottom left of the sidebar.

Figura 33. Ahuellamiento en la base

Los modelos de deformación permanente de la subrasante, son similares a los modelos definidos para la base y la subbase, la única diferencia es que estos deben considerar que la subrasante es una capa infinita. Nuevamente, el usuario puede ingresar sus propios valores.

The screenshot shows a software window titled 'Modelos de desempeño'. On the left is a sidebar with a tree view containing 'Carpeta asfáltica', 'Base', 'Base Estabilizada con Cemento', 'Subbase', and 'Subrasante'. The 'Subrasante' item is selected. The main area is titled 'Ahuellamiento Subrasante' and contains the following fields and controls:

- delta: ahuellamiento en la subrasante (in)
- ep,z: Deformación unitaria permanente a la profundidad z (in/in)
- h roca: profundidad hasta la roca firme (in)

$$\delta = \left( \frac{1 - e^{-k \cdot h_{roca}}}{k} \right) \cdot \varepsilon_{p,z=0}$$

$$k = \frac{1}{6} \ln \left( \frac{\varepsilon_{p,z=0}}{\varepsilon_{p,z=6}} \right)$$

Below the equations are two radio buttons: 'Granular' and 'Granular Fino' (selected). Under 'Granular' are input fields for ks1 (1.673) and Bs1 (1). Under 'Granular Fino' are input fields for ks1 (1.35) and Bs1 (1). At the bottom left, there are radio buttons for 'Modelo MEPDG' (selected) and 'Modelo definidos por el usuario'. A 'Guardar' button is at the bottom left of the sidebar.

Figura 34. Ahuellamiento en la subrasante.

Si el usuario seleccionó una base estabilizada con cemento, el software le presentará una nueva ventana de ingreso de datos como la mostrada en la Figura 35. Estos modelos son los indicados por la PCA y que la guía MEPDG especifica que no hay ningún proyecto NCHRP para calibrar los modelos propuestos para bases estabilizadas con cemento.



Modelos de desempeño

**Base estabilizada con cemento**

NfBTC: repeticiones a la falla por fatiga

delta s: Esfuerzo por tensión (psi) en el fondo de la capa estabilizada

Mr: Módulo de rotura a los 28 días (psi)

$$N_{fBTC} = 10^{\left[ \frac{k_1 \beta_{c1} - \frac{\delta s}{M_r}}{k_2 \beta_{c2}} \right]}$$

Modelo PCA  
 Modelos definidos por el usuario

k1: 0,972    Bc1: 1  
 k2: 0,0825    Bc2: 1

Guardar

**Figura 35. Fatiga en base estabilizada con cemento**

El usuario deberá seleccionar o escribir los valores de cada uno de las ventanas de los modelos de la carpeta asfáltica y los módulos de ingreso de las otras capas para poder luego acceder al botón de Diseño, el cual realiza todos los cálculos para el análisis de la estructura de pavimento con todos los datos incorporados por el usuario y verificar la aprobación de la estructura, tal como se verá en la siguiente sección.

## 8. SALIDA DEL SOFTWARE

### 8.1 Módulos

El software envía los módulos resilientes mensuales promedio para todo el período de diseño, para cada una de las capas que componen la estructura de pavimento, en el caso de que el usuario haya elegido utilizar ejes equivalentes para caracterizar el tráfico, tal como se muestra en la Figura 36.

Los módulos resilientes de las capas no ligadas son afectados por las condiciones climáticas presentes en cada mes, las cuales dependen de la temperatura promedio de cada mes y el índice de humedad de Thornwaite. Algunas capas, debido a sus propiedades físicas, se verán afectadas en mayor o menor grado por los cambios climáticos. Por ejemplo, una base estabilizada con cemento no presentará modificación por las condiciones climáticas.



Por otra parte, los módulos dinámicos mensuales de la carpeta asfáltica, son afectados por la temperatura promedio mensual de la carpeta asfáltica. Estos módulos dinámicos son obtenidos por el programa utilizando la curva maestra del material.

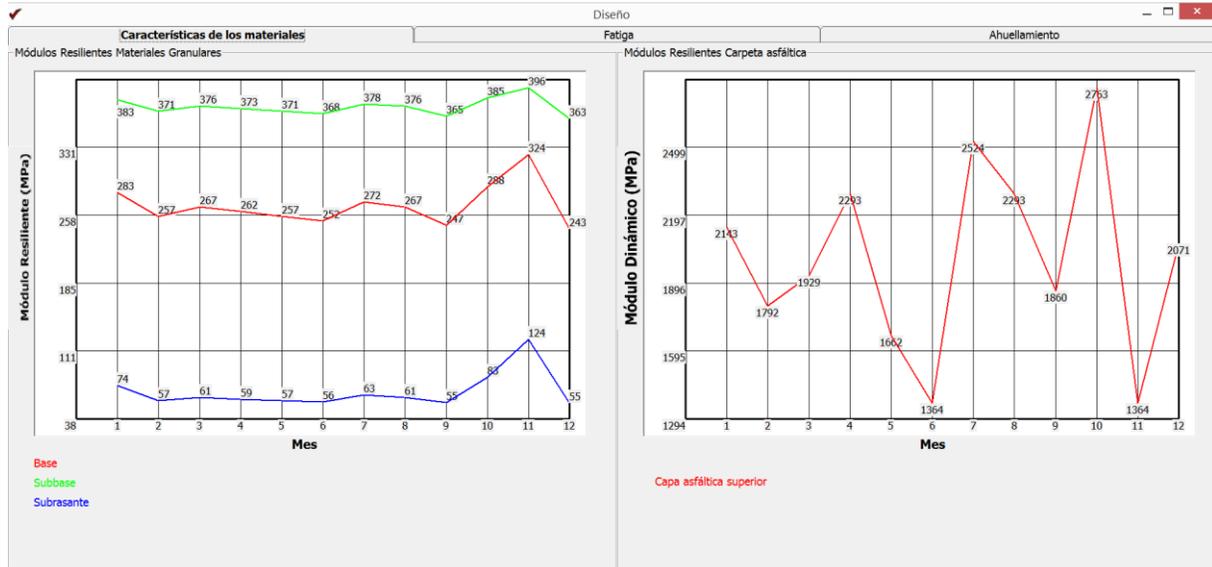
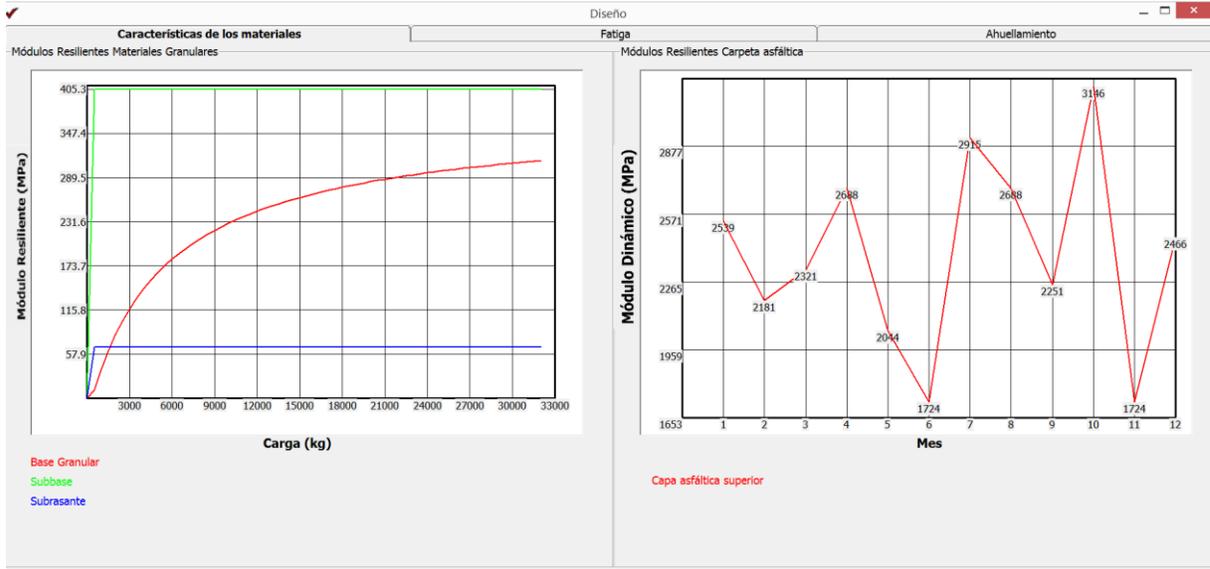


Figura 36. Módulos resilientes mensuales para las capas no ligadas y módulo dinámico mensual de la carpeta asfáltica

Si el usuario elige la opción de caracterización del tránsito con espectros de carga, el software le enviará los módulos de cada carga del espectro de carga. Si el usuario colocó un modelo que tome en cuenta la afectación del módulo por condiciones de carga, notará una curva en la cual, para una mayor carga, hay un mayor módulo resiliente; tomando en consideración la propiedad esfuerzo-dependiente de los materiales granulares de las capas no ligadas. Este efecto se muestra en la Figura 37.



**Figura 37. Módulos resilientes de las capas no ligadas en función de la carga y módulo dinámico mensual de la carpeta asfáltica**

Los modelos de deterioro por fatiga, se basan en la ley de Miner para estimar el daño producido por el paso de los vehículos a la estructura. El software enviará al usuario el valor de daño por fatiga tanto de arriba hacia abajo, como de abajo hacia arriba.

Basado en los valores de daño obtenidos, se utilizan las funciones de transferencia ingresadas por el usuario para estimar el agrietamiento longitudinal medido en pies por pulgada cuadrada y el porcentaje de área agrietada. El primer deterioro se relaciona con el daño por fatiga de arriba hacia abajo, mientras que el área agrietada o agrietamiento por piel de cocodrilo, se relaciona con la fatiga de abajo hacia arriba.

El software suma el daño de la carpeta asfáltica para cada mes del período de diseño para cada carga y cada tipo de eje en la opción para espectro de carga, mientras que, para ejes equivalentes de carga, el programa suma el daño para cada mes del periodo de diseño.

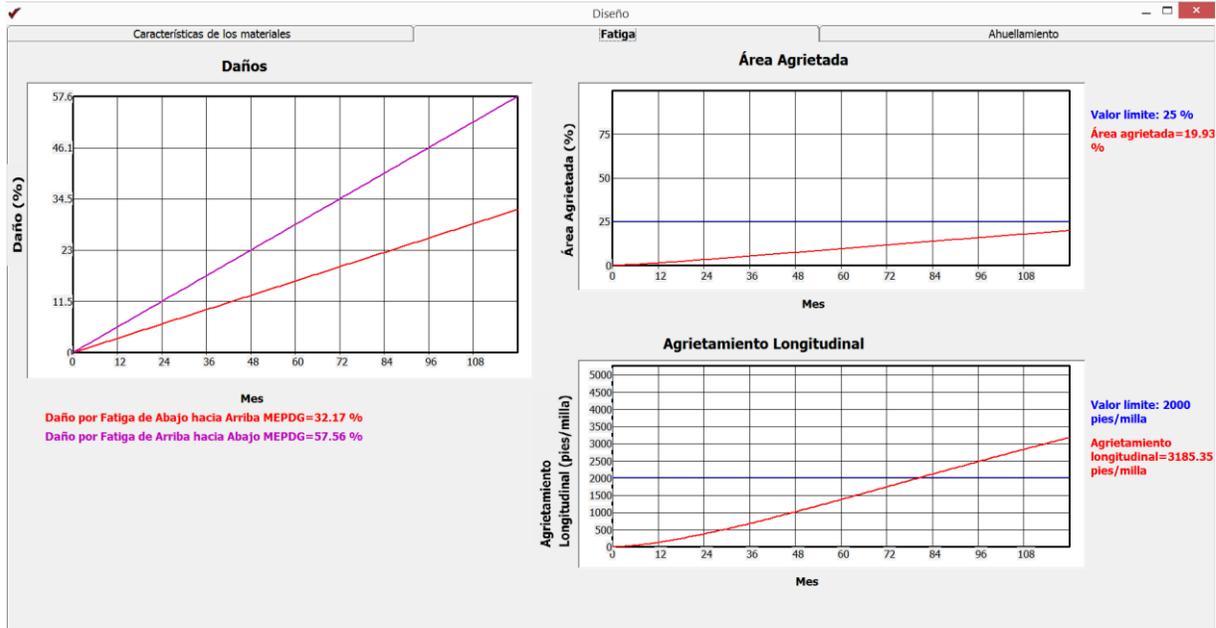


Figura 38. Daño por fatiga, área agrietada y agrietamiento longitudinal

Para el ahuellamiento, el software utiliza los modelos colocados por el usuario para la determinación de la deformación permanente en cada una de las capas. El programa utiliza el enfoque de endurecimiento por fatiga. La curva mostrada en la Figura 39, muestra el valor en cada uno de los meses del período de diseño. También se muestra el valor al final del período.

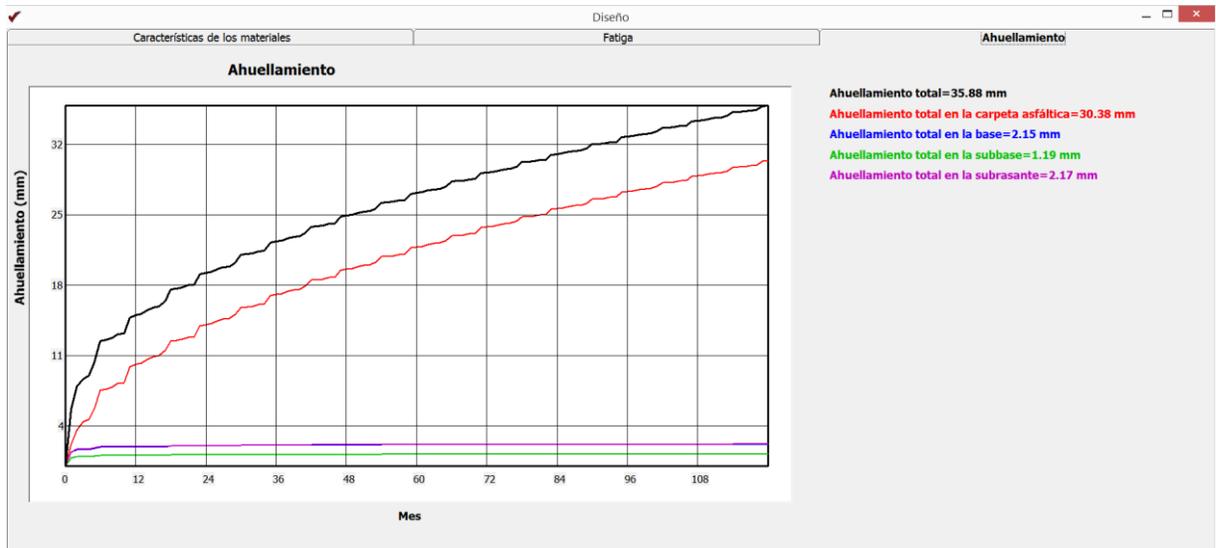


Figura 39. Ahuellamiento en cada capa



## 9. TEORIA DE MULTICAPA ELÁSTICA

En ésta sección se muestra información concisa sobre la teoría que ha sido utilizada calcular las respuestas del pavimento necesarias para incorporar en las ecuaciones utilizadas para obtener el valor de deterioro al final del periodo de vida útil establecido para el pavimento.

La estructura del pavimento flexible es un sistema de capas con mejores materiales en la parte superior y que no se pueden representados como una masa homogénea, por lo que se utiliza el concepto de semi-espacio que es un área infinitamente grande y una profundidad infinita con una superficie plana sobre la cual se aplican las cargas, por lo que el uso de la teoría de capas de Burmister es apropiado. Las soluciones de Burmister (1943) fueron primero desarrolladas para un sistema de dos capas, luego extendido a un sistema de tres capas (Burmister, 1945). Con la llegada de los ordenadores, la teoría se puede aplicar a un sistema de múltiples capas con cualquier número de capas (Huang, 1967, 1968 a).

Los supuestos básicos para satisfacer esta teoría son:

- 1) El sistema consiste de múltiples capas horizontales de espesor uniforme; el de la última capa es infinito.
- 2) Todas las capas se extienden infinitamente en las direcciones horizontales.
- 3) El material de cada capa es homogéneo e isotrópico.
- 4) Los materiales son lineal elásticos, con una relación lineal entre esfuerzo y deformación.
- 5) Se le aplican cargas en la superficie libre de geometría circular (radio ' $a$ ') y presión uniforme ' $q$ '.
- 6) Se satisfacen condiciones de continuidad en las interfaces entre capas (esfuerzo vertical y tangencial, así como desplazamientos vertical y radial continuos lo que implica capas completamente ligadas).

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 50 de 63
--------------------------	---	-----------------



Basado en esos supuestos se simplifican las ecuaciones diferenciales de equilibrio de fuerzas utilizando la función de Airy y se resuelve para cada carga circular en coordenadas cilíndricas haciendo uso de la transformación de Hankel. Luego se transforman las soluciones a un sistema cartesiano y se aplica el principio de superposición para considerar todas las cargas.

A continuación, se muestran las principales ecuaciones que se utilizaron en el PITRA-PAVE para determinar los esfuerzos y desplazamiento en el sistema de multicapas bajo una carga circular y bajo un nodo de fuerza concentrado.

Como en la clásica teoría de la elasticidad, una función de esfuerzo  $\phi$  que satisface la ecuación diferencial gobernante:

$$\nabla^4 \phi = 0 \quad (1a)$$

es asumido para cada una de las capas. Para sistemas con una distribución de esfuerzos axial simétrica y escrito en coordenadas cilíndricas:

$$\nabla^4 = \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (1b)$$

en el cual  $r$  y  $z$  son las coordenadas cilíndricas, radial y vertical respectivamente. Después de que la función de esfuerzo es encontrada, el esfuerzo y desplazamientos puede ser determinados por las ecuaciones 2:

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (2 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad (2a)$$

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right) \quad (2b)$$

$$\sigma_t = \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \nabla^2 \phi - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad (2c)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ (1 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad (2d)$$

$$\omega = \frac{1 + \nu}{E} \left[ (1 - 2\nu) \nabla^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] \quad (2e)$$



$$u = \frac{1 + \nu}{E} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial z} \right) \quad (2f)$$

Como la ecuación 1 es una ecuación diferencial de cuarto orden, los esfuerzos y desplazamientos así determinados, constarán de cuatro constantes de integración que deben ser determinadas a partir de las condiciones de frontera y continuidad.

La función de Airy que es solución a la ecuación (1), se puede comprobar por sustitución que viene dada por:

$$\phi_i(r, z) = J_0(mr)[A_i e^{mz} - B_i e^{-mz} + C_i z e^{mz} - D_i z e^{-mz}] \quad (3)$$

la cual es una función de la tensión de la capa  $i$ -ésima que satisface la ecuación 1, en el que  $J_0$  es una función de Bessel de primera especie y orden 0;  $m$  es un parámetro; y  $A, B, C, D$  son constantes de integración que se determinen de condiciones de contorno y continuidad. El subíndice  $i$  comprendidos entre 1 y  $n$ , y se refiere a las cantidades correspondientes a la capa  $i$ .

Para encontrar los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos debido a una carga constante  $q$  distribuida sobre un área circular de radio  $a$ , la transformada de Hankel es el método utilizado. La transformada de Hankel de tal carga es:

$$\bar{f}(m) = \int_0^{\infty} q \frac{r}{m} J_0(mr) dr = \frac{qa}{m} J_1(ma) \quad (4)$$

Y la transformada inversa de Hankel de  $\bar{f}(m)$  es:

$$q(r) = \int_0^{\infty} \bar{f}(m) m J_0(mr) dm = qa \int_0^{\infty} J_0(mr) J_1(ma) dm \quad (5)$$

Si  $R^*$  es el esfuerzo (deformación o desplazamiento) en la ecuación 2 debido a la carga  $-mJ_0(mr)$  y  $R$  es que debido a la carga  $q$ , y la tensión se considera negativo.

$$R = qa \int_0^{\infty} \frac{R^*}{m} J_1(ma) dm \quad (6)$$



## 10. EJEMPLO CON CR-ME

### 10.1 Descripción del problema

A continuación, se describen las variables utilizadas para el diseño de un pavimento flexible, utilizando el software descrito anteriormente. Con el ejemplo se pretende mostrar que la herramienta es sencilla de utilizar. Se describirán las variables en el Nivel 3 de conocimiento y finalmente se mostrarán los resultados del análisis con los datos ingresados para verificar si el diseño es adecuado para soportar la cantidad de tránsito al que será sometido.

Los modelos utilizados para el ejemplo son los propuestos por la guía MEPDG tanto para fatiga como para deformación permanente.

Se describirán los datos de las principales variables ingresadas, las cuales son:

#### 10.1.1 Tránsito

Se utilizó el Nivel 3 de conocimiento para la variable Tránsito con los siguientes datos de entrada:

- TPD año inicial: 1371
- Crecimiento vehicular: 3%
- Factor de distribución direccional: 50%
- Factor de distribución por carril: 100%
- ESAL durante la construcción: 71065
- Porcentaje atraído: 20%
- Porcentaje generado: 30%
- Nivel de confianza de la variable Tránsito: 90%
- Factor de amplificación del tránsito: 1

Los vehículos que se tendrán en cuenta para el análisis son los automóviles, los buses, los camiones C2 pequeños, los cuales cuentan con un eje simple delantero y un eje simple dual trasero, los vehículos C2 grandes, los cuales tienen la misma disposición de ejes que el camión

Reporte LM-PI-Ump-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 53 de 63
--------------------------	---	-----------------



anterior, el C3S2, el cual cuenta con un eje simple delantero, dos ejes tándem, uno en el semirremolque y el C3S3, el cual tiene un eje simple, un eje tándem y un eje trídem en el semirremolque. Los porcentajes se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Porcentaje y factor daño de cada tipo de vehículo**

Tipo de vehículo	Porcentaje del TPD	Factor daño
Automóvil	55	0
Bus	12	0,42
C2P	5,5	0,31
C2G	8,1	2,3
C3	4,2	3,81
C2S3	9,9	5,11
C3S3	5,3	4,02

El total de ejes equivalentes de carga con los datos ingresados, utilizando un crecimiento geométrico de 3%, tal como se especificó en los datos de entrada, es de 5,73 millones de ESAL.

### 10.1.2 Clima

La variable climática, se caracteriza por medio del índice de humedad de Thornwaite y la temperatura ambiente. Con estos datos se modifica el módulo resiliente de las capas no ligadas y el módulo dinámico de la carpeta asfáltica. Estos datos se muestran en la Tabla 2.

Se utilizan modelos que para calcular la succión matricial del material de la capa en función del TMI y otras variables, con el cual se estima una saturación mensual del material y con este valor se predice un factor ambiental, el cual multiplicará al módulo resiliente en condiciones óptimas.



**Tabla 2. Datos climáticos**

<b>Mes</b>	<b>Índice de humedad de Thornwaite</b>	<b>Temperatura promedio mensual (°C)</b>
Enero	-30	20
Febrero	20	25
Marzo	0	23
Abril	10	18
Mayo	20	27
Junio	30	32
Julio	-10	15
Agosto	0	18
Setiembre	40	24
Octubre	-40	12
Noviembre	-100	32
Diciembre	50	21

### 10.1.3 Capa asfáltica

La carpeta asfáltica se caracteriza con el Nivel 3 de conocimiento, utilizando la ecuación de Witczak-Lanamme. Los datos ingresados son los siguientes:

- Porcentaje acumulado retenido en la malla 3/4: 0%
- Porcentaje acumulado retenido en la malla 3/8: 21%
- Porcentaje acumulado retenido en la malla #4: 50%
- Porcentaje pasando la malla #200: 6.6%
- Contenido de vacíos de aire: 5%
- Contenido efectivo de asfalto: 11%
- Espesor: 10 cm
- Razón de Poisson: 0.35



Las propiedades del ligante asfáltica ingresadas son las predeterminadas para un ligante con penetración 60/70. Los valores de A y VTS para este caso son los siguientes:

- A: 10,6508
- VTS: -3,5537

#### 10.1.4 Base granular

Las propiedades ingresadas para la base granular, considerando su propiedad esfuerzo-dependiente con el Nivel 1, son los siguientes:

- Espesor: 15 cm
- Razón de poisson: 0,4
- Porcentaje pasando la malla #200: 0
- Índice de plasticidad: 0
- Constante  $a_f$ : 5
- Constante  $b_f$ : 3,69
- Constante  $c_f$ : 1,36
- Constante  $h_f$ : 500
- Gravedad específica: 2,7
- Densidad seca máxima: 1600 kg/m<sup>3</sup>
- Humedad óptima: 3%
- Constante  $k_1$ : 1,1926
- Constante  $k_2$ : 0,892
- Constante  $k_3$ : -0,441

#### 10.1.5 Subbase

Los datos ingresados para la subbase son los solicitados por el programa para el Nivel 3 de conocimiento de la variable:

- Espesor: 15 cm

Reporte LM-PI-UMP-057-R2	Fecha de emisión: 15 de diciembre de 2016	Página 56 de 63
--------------------------	---	-----------------



- Razón de Poisson: 0,4
- Porcentaje pasando la malla #200: 2%
- Índice de plasticidad: 0
- Gravedad específica: 2,6
- Densidad seca máxima: 1600 kg/m<sup>3</sup>
- Humedad óptima: 15%
- Módulo resiliente en condiciones óptimas: 215,4 MPa

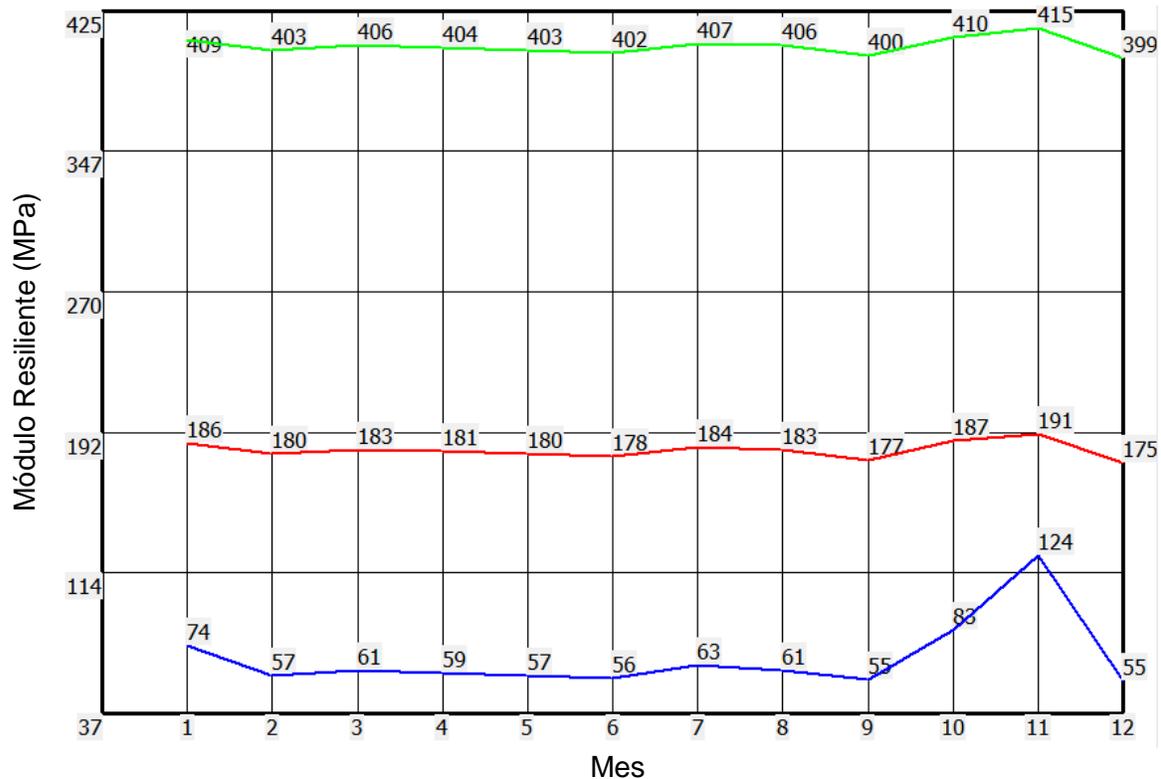
#### 10.1.6 Subrasante

La subrasante se caracterizó con las variables del Nivel 3, así:

- Profundidad a la roca firme: 3 m
- Razón de Poisson: 0,5
- Porcentaje pasando la malla #200: 70%
- Índice de plasticidad: 10
- Gravedad específica: 2,5
- Densidad seca máxima: 1500 kg/m<sup>3</sup>
- Humedad óptima: 30%
- Módulo resiliente en condiciones óptimas: 49,35 MPa

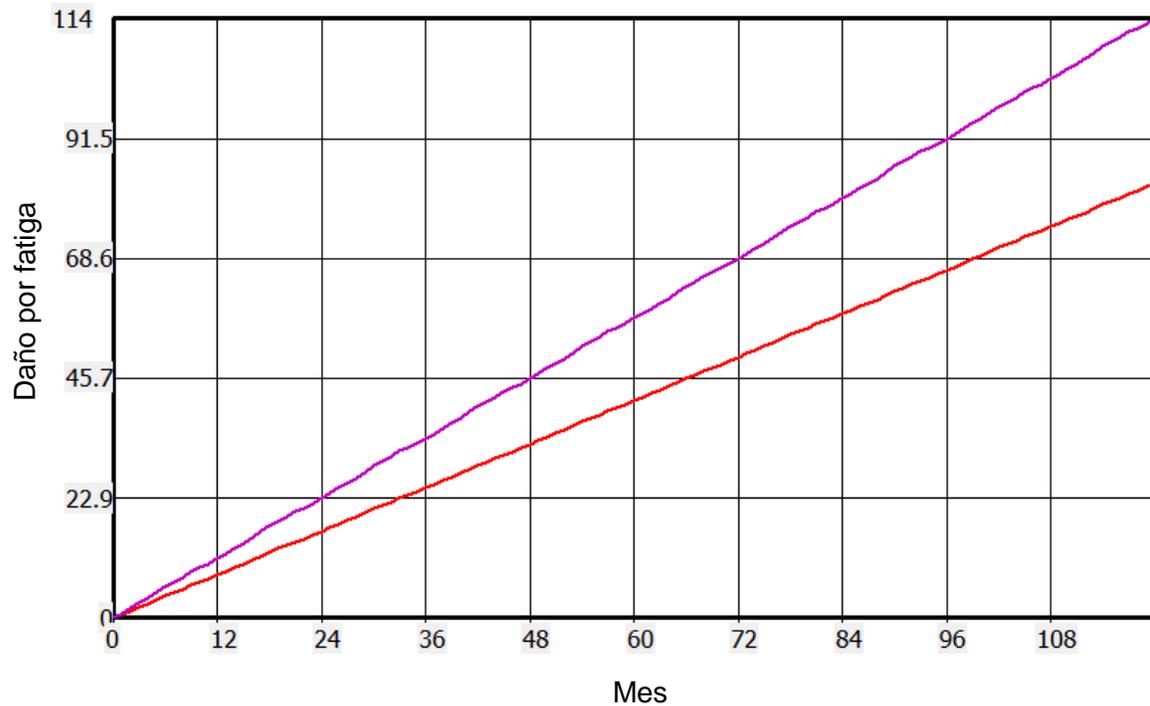
#### 10.2 Solución del problema

Los módulos obtenidos para cada mes del período de diseño se muestran en la Figura 40. Estos módulos son afectados por las condiciones climáticas.



**Figura 40. Módulos resilientes de las capas no ligadas**

El daño por fatiga se muestra en la Figura 41. Este daño toma en cuenta el daño mensual producido en la parte baja de la carpeta asfáltica y en la superficie de la carpeta asfáltica. Se utiliza la ley de Miner, la cual es la relación entre la cantidad de repeticiones de carga a las que será sometida la carretera entre la cantidad de repeticiones de carga permitidas.



**Figura 41. Daño por fatiga**

Utilizando las funciones de transferencia, se puede relacionar el daño con un deterioro específico. En la Figura 42, se muestra el área agrietada o agrietamiento piel de cocodrilo, el cual se relaciona con el daño de abajo hacia arriba. En el gráfico se puede observar que en el mes 60 la estructura ya alcanzó el máximo admitido, por lo cual por daño por fatiga se deberá corregir el diseño. Las líneas azules indican el límite aceptado de cada tipo de deterioro, el cual es establecido por el usuario.

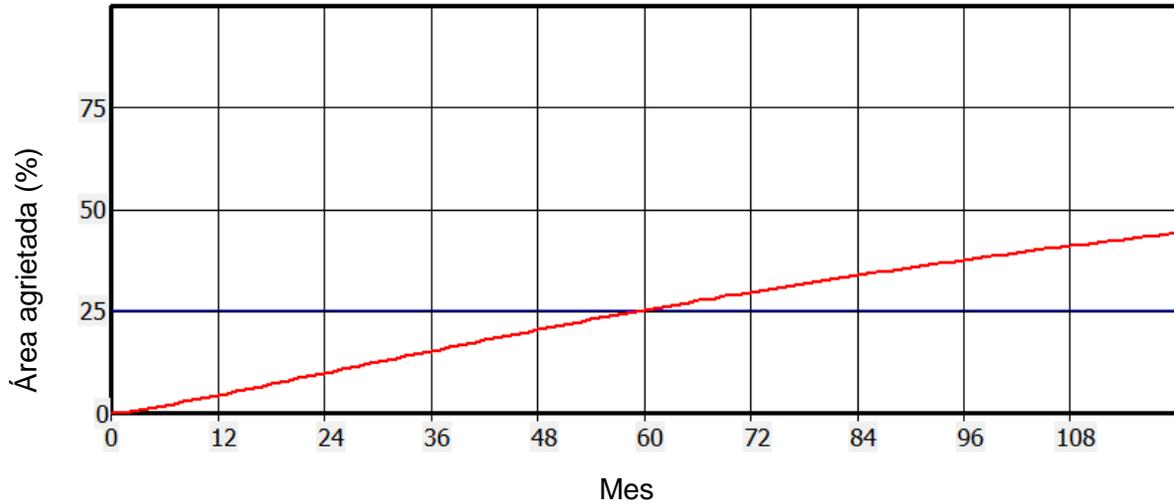


Figura 42. Área agrietada

El agrietamiento longitudinal se relaciona con la fatiga de arriba hacia abajo. Este deterioro utiliza el mismo modelo que el utilizado para el agrietamiento piel de cocodrilo variando los factores. En la Figura 43, se logra apreciar que el límite se superó al poco tiempo, lo cual supone una falla temprana por fatiga e indica que el diseño debe modificarse.

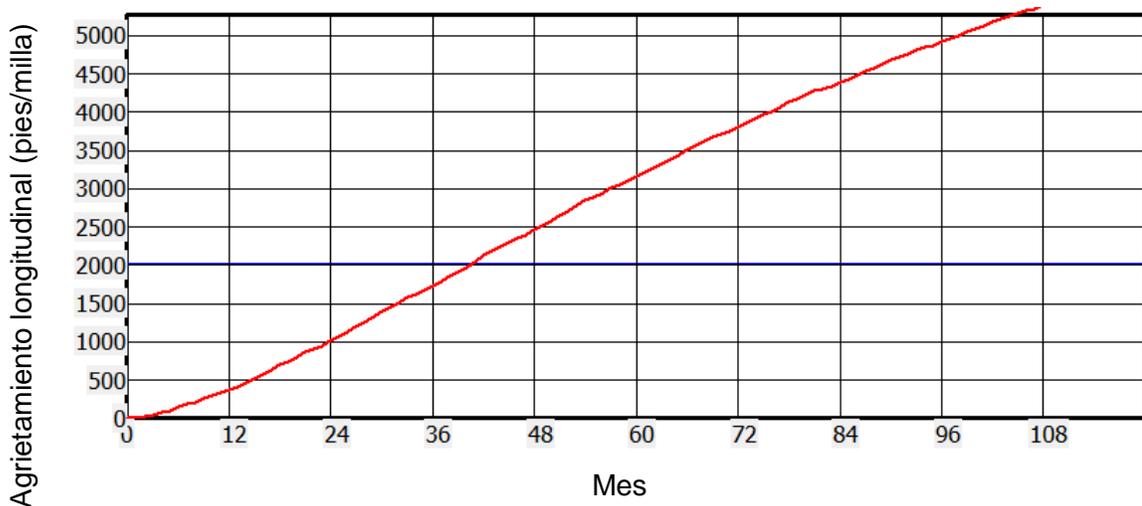
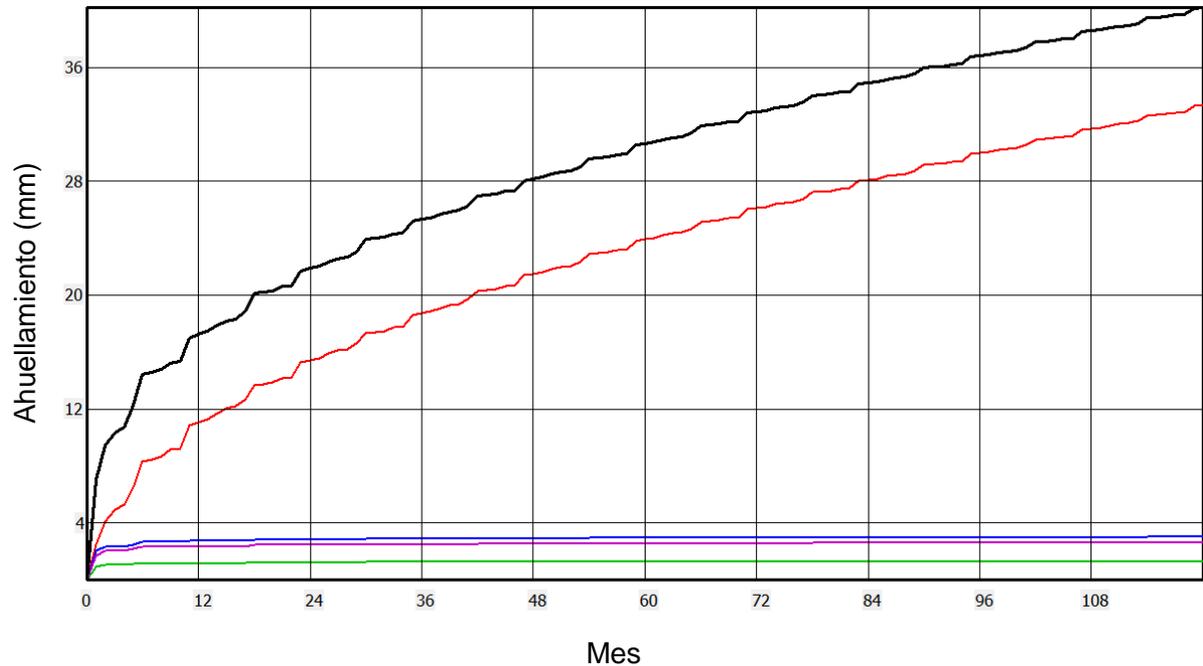


Figura 43. Agrietamiento longitudinal



El ahuellamiento en cada capa se logra apreciar en la Figura 44. Este valor es mayor al permitido por la guía MEPDG y por las especificaciones de Costa Rica, por lo cual la estructura deberá rediseñarse hasta que los espesores, produzcan deterioros que cumplan con las especificaciones dadas.



**Figura 44. Ahuellamiento en cada capa**

El ingeniero, al realizar este diseño, deberá observar que los valores son mayores a los límites, por lo cual deberá sustituir los espesores y realizar nuevamente el análisis hasta obtener un diseño que apruebe las especificaciones planteadas.



## 11. AVANCE DEL PROYECTO

Actualmente el proyecto se encuentra al día de acuerdo al cronograma mostrado en la Tabla 1 presentado en la propuesta original ante la Vicerrectoría de Investigación.

**Tabla 3.** Cronograma de actividades

	FECHA INICIAL	FECHA FINAL
Elaboración de la propuesta	01/01/2015	01/02/2015
Establecimiento del plan de desarrollo del software	01/02/2015	30/04/2015
Desarrollo de la versión limitada del software (métodos numéricos de cálculo básicos). (Software PITRA-PAVE)	01/05/2015	30/08/2015
Ejecución de programa de calidad del software limitado	01/09/2015	30/10/2015
Desarrollo de la versión completa del software (adición de restantes métodos requeridos) (Software PITRA-ME)	01/11/2015	28/02/2016
Ejecución de programa de calidad del software completo	01/03/2016	30/05/2016
Ejecución de programa de divulgación del software	01/06/2016	12/12/2016



## 12. BIBLIOGRAFÍA

- Burmister, D. M. (1945). *The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems*. Journal of Applied Physics , 89-94.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Desing*. United States of America: Pearson Prentice Hall.
- Trejos Castillo, Christopher. (2015) Proyecto final de graduación. *Herramienta de cálculo complementaria a la Nueva Metodología de Diseño Mecánico Empírico de Pavimentos Flexibles de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.
- Vargas Hernández, José Pablo. (2013) Proyecto final de graduación. Elementos fundamentales para el desarrollo de una guía de diseño de pavimentos empírico mecánica para Costa Rica. Universidad de Costa Rica.
- Apuntes de clase de Luis Guillermo Loría Salazar, Profesor del curso "Diseño de Pavimentos" de la Universidad de Costa Rica, San José, abril de 2014.
- Apuntes de clase de Luis Guillermo Loría Salazar, Profesor del curso "Diseño avanzado de pavimentos" de la Universidad de Costa Rica, San José, mayo de 2014.
- Apuntes de clase de Luis Guillermo Loría Salazar, Profesor del curso "Materiales para pavimentos" de la Universidad de Costa Rica, San José, junio de 2014.