



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO.**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL.**

**MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN  
LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.**

**“APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE DISTINTOS MODELOS DE  
PREDICCIÓN DE DESEMPEÑO EN UNA SECCIÓN DE  
ESTUDIO DE LA AUTOPISTA MÉXICO-QUERÉTARO”.**

**TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA  
RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

PRESENTA:

**NOÉ HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ.**

ASESOR:

**DR. JORGE ALARCÓN IBARRA.**

Morelia, Mich., Junio del 2011.





# Resumen.

Dentro del presente estudio se analiza la aplicación de dos sistemas de gestión de pavimentos, lo cuales, fueron seleccionados debido a que son dos de los más empleados por las agencias de carreteras a nivel internacional. La aplicación de los sistemas se centro en el funcionamiento de los modelos de predicción del desempeño incluidos en los sistemas utilizados.

Los sistemas fueron aplicados en una sección de estudio de la autopista México-Querétaro, considerada como una de las carreteras más importantes del país ya que comunica la zona Centro-Sur con el Norte, a través de dos corredores, México-Nuevo Laredo y Querétaro-Cd. Juárez. La sección de estudio inicia en el kilómetro 132+800 y finaliza en el 147+915 en la caseta de Palmillas de la autopista México-Querétaro, con una longitud de 15.11 kilómetros y se constituye de dos cuerpos con tres carriles de circulación cada uno.

Los trabajos previos a la aplicación de los sistemas requirió de mediciones de campo para evaluar la condición del pavimento, mediante indicadores de desempeño adoptados internacionalmente y de recopilación de información de la evolución del desempeño del pavimento desde la última reconstrucción en el año 2005 hasta la fecha en que se llevó a cabo la evaluación dentro del presente estudio. Adicionalmente fue necesario recopilar información de las características y volúmenes de tránsito y de las condiciones climáticas de la zona para una correcta aplicación de los sistemas.

Con la información obtenida de la sección de estudio se realizó el desarrollo de los modelos de predicción de desempeño, ya que cada modelo utiliza distintos índices de condición para calificar el estado del pavimento, esta etapa se dividió en dos partes.

La primera consistió en aplicar el modelo Micro PAVER para lo cual fue necesario estimar el Índice de Condición del Pavimento (PCI), obtenido de forma indirecta de imágenes de superficie del pavimento para posteriormente realizar los inventarios de deterioros estableciendo la clase, severidad y cantidad de cada deterioro observado, posteriormente fue necesario desarrollar la familia del pavimento identificando las secciones con características de desempeño similares y luego desarrollando una curva de cuarto grado usando el error de los mínimos cuadrados entre el PCI y la edad del pavimento.

La segunda se enfocó en la calibración de los modelos de deterioro (RD) del HDM-4. Para llevar a cabo esta tarea fue necesario procesar los datos de la evolución del desempeño del pavimento, siendo necesario ajustar la tasa de progresión del deterioro. Una vez ajustada la tasa de progresión del deterioro la calibración de los modelos consistió en modificar los factores ( $K_i$ ) que logren el mejor ajuste entre las predicciones del modelo y los datos medidos en campo. Los modelos de deterioro calibrados en este estudio corresponden a los modelos de agrietamiento, profundidad de rodera y rugosidad. La técnica utilizada para la calibración se define como “prueba y error”, consistió en calcular la tasa de progresión del deterioro predicha, para posteriormente compararla con la tasa de progresión de deterioro ajustada.



Una vez realizada la aplicación de los modelos se llevó a cabo la predicción de la condición de la sección de estudio en un periodo de 15 años, para evaluar de forma más completa el funcionamiento de los modelos se plantearon diferentes escenarios, uno de los cuales consistió en observar la evolución del pavimento sin efectuar ninguna acción de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción (MR&R), para las demás se programaron distintas acciones de MR&R de acuerdo a las capacidades de cada sistema utilizado.

Posteriormente se analizan los resultados obtenidos de los modelos de predicción del desempeño para los distintos escenarios propuestos, el análisis se centra en evaluar los escenarios y comparar los valores de los índices de condición por medio de una correlación desarrollada para utilizar el IRI como una variable predictiva del PCI, lo cual nos permite hacer una comparación directa entre las diferentes escalas de calificación de los índices de condición.

Finalmente se lleva a cabo una discusión de la variación observada en los resultados arrojados por cada modelo, ya que el Micro PAVER coloca la condición de pavimento en el horizonte de análisis como adecuada, sin necesidad de programar acción alguna de MR&R; por el contrario el HDM-4 predice que la condición del pavimento será deficiente en un par de años superando el límite máximo de IRI establecido, por lo que, es necesario proponer acciones de MR&R para conservar un nivel de servicio adecuado. Dentro de esta última etapa del estudio también se comentan las posibles causas de las diferencias en los resultados de cada modelo.



---

# Abstract.

In the present study analyzed the application of two pavement management systems, which were selected because they are two of the most widely used by highway agencies worldwide. The application of the system focuses on the operation of performance prediction models included in the systems used.

The systems were applied in a section of study of the highway México-Querétaro, considered as one of the most important roads in the country since the communicates the center-south zone with the North, through two corridors, Mexico-Nuevo Laredo and Querétaro-Cd. Juárez.

The preliminary work on the application of systems required for measurements in field for assessing the condition of the pavement, through performance indicators adopted internationally and of collecting information on the evolution of pavement performance from the last reconstruction in 2005 to date they were carried out the assessment within this study. Additionally, it was necessary to collect information on the characteristics and volumes of traffic and weather conditions in the area to ensure proper application of the systems.

With the information obtained from the study section was performed to develop predictive models of performance, as each model uses different condition indices to rate the pavement condition, this phase was divided into two parts.

The first was to apply the model Micro PAVER for which it was necessary to estimate the Pavement Condition Index (PCI), obtained indirectly from the pavement surface images for later Inventories of damage by setting the type, severity and quantity of each deterioration observed, then the family had to be developed identifying pavement sections with similar performance characteristics and then developing a fourth degree curve using the least square error between PCI and age of the pavement.

The second focused on the calibration of models of deterioration (RD) of HDM-4. To carry out this task was necessary to process the data on the evolution of pavement performance, being necessary to adjust the rate of progression of deterioration. Once set the rate of progression of the deterioration of model calibration was to modify the factors ( $K_i$ ) to achieve the best fit between model predictions and measured data in the field. The deterioration models calibrated in this study are models of cracking, rut depth and roughness. . The technique used for calibration is defined as "trial and error" was to calculate the rate of progression of deterioration predicted for later purchase at the rate of progression of deterioration adjusted.

After the application of the models was carried out to predict the condition of the study section in a period of 15 years to more fully evaluate the performance of the models are posed different scenarios, one of which was to observe developments without taking action pavement maintenance, rehabilitation and reconstruction (MR & R), were scheduled for other than MR & R actions according to the capabilities of each system used.





## **Abstract.**

---

Then analyzed the results of performance prediction models for the different scenarios proposed, the analysis focuses on evaluating the scenarios and compare the values of condition indices using a correlation developed for use as a predictor IRI of PCI, which allows us to make a direct comparison between the different rating scales condition indices.

Eventually leads to a discussion of the observed variation in the results produced by each model, as the Micro PAVER pavement condition placed on the analysis horizon as appropriate, without any action set MR & R; on the contrary, HDM-4 predicts that the condition of pavement is deficient in a couple of years exceeding the IRI of limit, so it is necessary to propose MR & R actions to maintain a level of service. In this last stage of the study also discusses the possible causes of differences in the results of each model.

---

Dedicado a:  
mis padres y  
mis hermanos, en especial a mi hermana.

---

## En agradecimiento...

...a todas las personas que de alguna u otra forma han contribuido a hacer realidad este objetivo, a continuación se mencionan algunas de ellas.

En primer lugar quiero agradecer a quienes me indicaron el camino a seguir en el estudio y me proporcionaron las herramientas para desarrollar el tema, al Dr. Jorge Alarcón quien ha sido mi tutor y amigo desde hace bastante tiempo, al Dr. Mauricio Centeno por sus opiniones y haberme facilitado las herramientas, a Islam López por haberme apoyado a conseguir los recursos para desarrollar el estudio.

También quiero expresar mi profundo agradecimiento a la empresa SemMaterials México por haberme dado la oportunidad de pertenecer a la empresa, utilizar las herramientas para desarrollar el tema y por recibirme tan cálidamente. Así mismo quiero agradecer a mis compañeros por el apoyo brindado durante la elaboración de la investigación.

Con este documento se cierra una etapa que comenzó hace algunos años, durante esta he recibido el apoyo de muchos amigos que me apoyaron durante mis estudios, pero sobre todo con sus consejos y amistad, así que también para ellos quiero expresar mi más profundo agradecimiento.

## ¡Muchas gracias!



# Índice.

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introducción.</b>                                                | <b>1</b>  |
| <b>Objetivos.</b>                                                   | <b>4</b>  |
| <b>Capítulo 1. Sistemas de Gestión de Pavimentos.</b>               | <b>5</b>  |
| 1.1. Introducción                                                   | 5         |
| 1.2. Descripción de los Sistemas de Gestión de Pavimentos           | 7         |
| 1.3. Componentes básicos                                            | 8         |
| 1.3.1. Base de datos                                                | 10        |
| 1.3.2. Métodos de análisis                                          | 10        |
| 1.3.2.1. Análisis de la condición del pavimento                     | 11        |
| 1.3.2.2. Modelos de evaluación de prioridad.                        | 11        |
| 1.3.2.3. Modelos de optimización.                                   | 13        |
| 1.3.3. Proceso de retroalimentación.                                | 13        |
| 1.4. Niveles de gestión.                                            | 14        |
| 1.4.1. Nivel de red.                                                | 14        |
| 1.4.2. Nivel de proyecto.                                           | 16        |
| <b>Capítulo 2. Modelos de predicción de desempeño</b>               | <b>17</b> |
| 2.1. Conceptos de servicio y desempeño.                             | 19        |
| 2.2. Evolución histórica de los índices de deterioro en pavimentos. | 19        |
| 2.2.1. Índice de Servicio Presente (PSI)                            | 19        |
| 2.2.2. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)                      | 20        |
| 2.2.3. Índice de Condición del Pavimento (PCI)                      | 22        |
| 2.3. Necesidad de los índices de condición de pavimentos            | 23        |
| 2.4. Modelos de predicción de deterioros.                           | 25        |
| 2.4.1. De acuerdo al método de modelación.                          | 26        |
| 2.4.2. Modelos Deterministas y Modelos probabilísticos              | 27        |
| 2.4.2.1. Modelos deterministas                                      | 28        |
| 2.4.2.2. Modelos probabilistas.                                     | 31        |



|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capítulo 3. Indicadores de desempeño del pavimento.....</b>                  | <b>37</b> |
| 3.1. Introducción .....                                                         | 37        |
| 3.2. Principales características evaluadas .....                                | 38        |
| 3.2.1. Rugosidad .....                                                          | 39        |
| 3.2.2. Textura .....                                                            | 41        |
| 3.2.3. Resistencia al deslizamiento .....                                       | 43        |
| 3.2.4. Propiedades estructurales .....                                          | 44        |
| 3.2.5. Inventario de deterioros .....                                           | 45        |
| 3.3. Técnicas de recolección de datos .....                                     | 46        |
| 3.3.1. Rugosidad .....                                                          | 47        |
| 3.3.2. Macrotextura .....                                                       | 48        |
| 3.3.3. Resistencia al deslizamiento. ....                                       | 48        |
| 3.3.4. Propiedades mecánico/estructurales .....                                 | 49        |
| 3.3.5. Inventario de deterioros .....                                           | 51        |
| <b>Capítulo 4. Análisis de los modelos utilizados .....</b>                     | <b>53</b> |
| 4.1. Introducción .....                                                         | 53        |
| 4.2. Modelos del MicroPaver.....                                                | 54        |
| 4.2.1. Antecedentes .....                                                       | 54        |
| 4.2.2. Desarrollo del sistema .....                                             | 54        |
| 4.2.3. Tecnología de pavimentos desarrollada .....                              | 57        |
| 4.2.4. Procedimiento para el cálculo del PCI .....                              | 58        |
| 4.2.4.1. Procedimiento de evaluación de la condición del pavimento .....        | 59        |
| 4.3. Modelos del HDM-4 .....                                                    | 62        |
| 4.3.1. Antecedentes .....                                                       | 62        |
| 4.3.2. Deterioros en pavimento .....                                            | 63        |
| 4.3.3. Modelos de deterioro de carreteras (Road Deterioration,RD) .....         | 66        |
| 4.3.3.1. Modelación del agrietamiento .....                                     | 66        |
| 4.3.3.2. Profundidad de rodera .....                                            | 67        |
| 4.3.3.3. Rugosidad .....                                                        | 70        |
| 4.3.4. Calibración de los modelos HDM .....                                     | 73        |
| 4.3.4.1. Niveles de calibración .....                                           | 74        |
| <b>Capítulo 5. Descripción y características de la sección de estudio .....</b> | <b>77</b> |
| 5.1. Introducción .....                                                         | 77        |
| 5.2. Sección de estudio.....                                                    | 78        |
| 5.3. Información de la sección de estudio .....                                 | 79        |



|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.1. Evaluaciones de campo .....                                    | 79         |
| 5.3.1.1. Características de superficie .....                          | 79         |
| 5.3.1.2. Resistencia al deslizamiento .....                           | 84         |
| 5.3.1.3. Propiedades estructurales .....                              | 86         |
| 5.3.1.4. Inventario de deterioros .....                               | 87         |
| 5.3.2. Información del historial del desempeño, tráfico y clima ..... | 88         |
| <b>Capítulo 6. Aplicación de los modelos de predicción .....</b>      | <b>91</b>  |
| 6.1. Introducción .....                                               | 91         |
| 6.2. Metodología de aplicación de los modelos.....                    | 91         |
| 6.3. Aplicación del modelo Micro PAVER.....                           | 92         |
| 6.3.1. Proceso de gestión en Micro PAVER .....                        | 93         |
| 6.3.2. Medición de la condición del pavimento .....                   | 93         |
| 6.3.3. Predicción de la condición del pavimento .....                 | 96         |
| 6.3.3.1. Definición de la familia del pavimento .....                 | 96         |
| 6.3.3.2. Filtrado de datos .....                                      | 96         |
| 6.3.3.3. Análisis de los datos con valores atípicos .....             | 97         |
| 6.3.3.4. Desarrollo del modelo de familia .....                       | 98         |
| 6.4. Aplicación del modelo HDM-4 .....                                | 98         |
| 6.4.1. Parámetros para aplicar el modelo HDM-4 .....                  | 98         |
| 6.4.1.1. Estructura del pavimento .....                               | 99         |
| 6.4.1.2. Efectos climáticos y ambientales .....                       | 100        |
| 6.4.1.3. Características del tráfico .....                            | 101        |
| 6.4.2. Calibración de los modelos de deterioro .....                  | 101        |
| 6.4.2.1. Concepto de sesgo y precisión .....                          | 102        |
| 6.4.2.2. Procedimiento de calibración de los modelos .....            | 102        |
| <b>Capítulo 7. Análisis de los resultados .....</b>                   | <b>108</b> |
| 7.1. Introducción .....                                               | 108        |
| 7.2. Predicción del deterioro en Micro PAVER.....                     | 109        |
| 7.2.1. Análisis de la condición del pavimento .....                   | 109        |
| 7.3. Predicción del deterioro con HDM-4.....                          | 112        |
| 7.4. Análisis de las curvas de deterioro.....                         | 115        |
| <b>Conclusiones.....</b>                                              | <b>119</b> |
| <b>Bibliografía .....</b>                                             | <b>121</b> |
| <b>Anexo A .....</b>                                                  | <b>127</b> |



# Introducción.

En las últimas décadas, el mantenimiento y rehabilitación de carreteras han llegado a ser el mayor problema que tienen que afrontar las agencias a cargo de su administración alrededor del mundo. Este problema se ve agravado por la falta de recursos suficientes para mejorar la condición de las redes de carreteras. Para superar este problema, muchas agencias comenzaron a establecer prácticas y procedimientos alternos para conservar sus redes. Estas prácticas suelen ser limitadas por muchos factores, como la cantidad de personal, la financiación y la falta de experiencia (Wotring *et al.*, 1998).

La condición actual de un pavimento es el resultado de decisiones tomadas en años anteriores y las decisiones tomadas ahora tendrán una influencia en la condición del pavimento en el futuro. Por lo tanto, las decisiones actuales deben de hacerse a la luz de sus efectos tanto en el futuro inmediato y el anticipado. Al considerar estrategias a corto y largo plazo, el más deseable equilibrio se puede lograr, si las consecuencias de las acciones presentes se pueden predecir de forma confiable. Una estimación de las consecuencias futuras de las acciones podrá ser realizada de manera informal por la toma de decisiones (“criterios técnicos”) o mediante el uso de métodos y procedimientos científicos con la ventaja de poder obtener mejores resultados y poder analizar la evolución del estado de los pavimentos.

Un Sistema de Gestión de Pavimentos (PMS) está diseñado para proporcionar información objetiva y datos útiles para el análisis con el que los administradores de las carreteras pueden tomar decisiones más coherentes, rentables y justificables relacionadas con la preservación de una red de pavimentos. Mientras que un PMS no puede tomar las decisiones finales, si puede servir de base para una comprensión cabal de las posibles consecuencias de políticas alternas.

Entre los principales componentes de un sistema se encuentran un conjunto de programas de cómputo para la información requerida por el sistema; herramientas de análisis para la predicción del deterioro de pavimentos; evaluación económica de proyectos carreteros y la formulación de programas de mantenimiento y rehabilitación.

Los modelos de predicción del desempeño son uno de los elementos más importantes de la gestión de pavimentos y han sido durante muchos años un desafío clave que enfrentan los ingenieros de caminos. Los modelos de predicción son usados a nivel de red para la optimización del presupuesto al realizar el análisis de los costos del ciclo de vida y para determinar las necesidades de recolectar datos para evaluar el estado actual de la red. A nivel de proyecto, los modelos se utilizan para diseñar los pavimentos, realizando el análisis de los costos del ciclo de vida, determinar el mejor tiempo para realizar el mantenimiento y seleccionando la medida óptima de mantenimiento o rehabilitación.





De acuerdo a Rodríguez (1991), un pavimento es una estructura bastante compleja con respecto a la predicción de su desempeño futuro, ya que el desempeño depende de la interacción de una serie de factores (tráfico, clima, procedimientos constructivos, condiciones del drenaje, estructura del pavimento, materiales de construcción y políticas de mantenimiento adoptadas) y su cuantificación es muy difícil.

Los modelos de predicción incluidos en los sistemas de gestión de pavimentos fueron creados para cumplir con esta difícil tarea. Por otro lado, la precisión con la que estos modelos predicen la condición futura de un pavimento depende en gran medida de cuan tan bien estos modelos se adapten a las condiciones locales donde se pretende aplicarlos.

En el presente estudio se analizan distintos sistemas de gestión de pavimentos, con la finalidad de seleccionar algunos para ser aplicados en una sección de estudio. La aplicación de los modelos seleccionados se centra en el análisis de los modelos de predicción del desempeño, para lo cual, se proponen distintos escenarios para comprender de mejor forma las capacidades de cada modelo empleado.

## **Estructura de la tesis.**

El documento desarrollado dentro del estudio fue estructurado de acuerdo a la siguiente reseña.

En primer lugar, se hace una descripción de los sistemas de gestión de pavimentos, mencionando cómo han evolucionado desde su desarrollo hasta la actualidad, la base de su funcionamiento y sus aplicaciones, así como los distintos niveles de gestión existentes.

Posteriormente se comentan las características de los modelos de predicción del desempeño, iniciando con las bases para determinar la condición del pavimento, continuando con una descripción de los principales índices de condición creados para estimar el desempeño dentro de los modelos de predicción, por último se mencionan las clasificaciones más aceptadas por la literatura especializada de los modelos de predicción del desempeño.

Después se describen los indicadores de desempeño de los pavimentos, este tipo de indicadores constituyen los principales datos de entrada de la condición del pavimento y son necesarios para la aplicación de los modelos de predicción, por lo que, se discuten las características del pavimento evaluadas con los indicadores y las técnicas de recolección desarrolladas.

Los modelos de predicción utilizados en la investigación utilizan diferentes técnicas para llevar a cabo la modelación del comportamiento de los pavimentos, por lo que, se hace una descripción de los modelos, así como una reseña de su desarrollo y la base de su funcionamiento. La descripción mencionada en los cuatro párrafos anteriores constituye el marco teórico de la investigación.

Las características de la sección de estudio, las evaluaciones de campo y la recopilación de información se mencionan en el desarrollo experimental del estudio. Es aquí donde se hace referencia a los trabajos previos antes de la aplicación de los modelos de predicción del desempeño.



## **Introducción.**

---

Luego se describe el procedimiento llevado a cabo para el desarrollo de los modelos de predicción del desempeño en la sección de estudio, en el caso del Micro PAVER se menciona el proceso para estimar el PCI y el desarrollo de la familia del pavimento. Para el HDM-4 se describe el ajuste de la tasa de deterioro realizada y la calibración de los modelos de deterioro.

A continuación se analizan los resultados obtenidos con los modelos de predicción, para lo cual se plantean diferentes escenarios programando distintas alternativas de mantenimiento, analizando las calificaciones de la condición estimadas con cada modelo de predicción.

Por último en las conclusiones se comentan los resultados obtenidos con el desarrollo de la investigación.



---

# Objetivos.

## Objetivo general

El objetivo general de la investigación es evaluar distintos sistemas de gestión de pavimentos para aplicarlos en una sección de estudio que por su ubicación es considerada una de las carreteras de mayor importancia del país y también una de las más transitadas, la aplicación de los sistemas de gestión se centra en los modelos de predicción del desempeño para posteriormente realizar un análisis de los resultados obtenidos con cada uno de los modelos utilizados.

## Objetivos específicos

Evaluar distintos sistemas de gestión de pavimentos, de acuerdo a las características de sus componentes, información de entrada, factibilidad y disponibilidad, para posteriormente seleccionar con cuales se desarrollará el estudio.

Determinar los datos de entrada requeridos para cada sistema de gestión seleccionado y realizar el plan de trabajo para obtener la información requerida de la sección de estudio a analizar.

Realizar los trabajos de campo definidos para evaluar las características del pavimento y recopilar información de la evolución de su desempeño, así como los datos del tráfico y las condiciones ambientales.

Aplicar los sistemas de gestión de pavimentos seleccionados, enfocándose en los modelos de predicción del desempeño.

Analizar y comparar los resultados obtenidos con los modelos de predicción aplicados para la sección de estudio, planteando diferentes escenarios de acciones de conservación y mantenimiento.



# Capítulo 1.

## Sistemas de Gestión de Pavimentos.

### 1.1. Introducción.

Durante un largo periodo de tiempo se han realizado contribuciones importantes sobre la base tecnológica de la gestión de pavimentos, sin embargo, fue en la época posterior a la Segunda Guerra mundial que se dio un impulso importante para el desarrollo de los Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS por las siglas en inglés Pavement Management System) modernos. Se puede decir que tres proyectos de investigación independientes han resultado en el desarrollo de una metodología de PMS. En 1966, la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales (AASHO por sus siglas en inglés American Association of State Highway Officials) a través del Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras ((NCHRP por las siglas en inglés National Cooperative Highway Research Program), inició un estudio para hacer nuevos avances en el campo. La intención era proporcionar una base teórica para ampliar los resultados de la pista de pruebas AASHO (Hudson et al, 1968). Esfuerzos similares, de forma independiente se estaban realizando al mismo tiempo en Canadá para estructurar en conjunto el diseño de pavimentos y los problemas de gestión (Williams, 1968). Un tercer esfuerzo clave en esta área fue el de Scrivner y otros en el Instituto de Transporte de Texas de la Universidad de Texas A&M como parte de su trabajo para el Departamento de Carreteras de Texas (Scrivner, 1968). El trabajo de estos tres grupos ofrece una perspectiva general para los PMS.

El inicio de la gestión de pavimentos como un proceso comenzó a mediados de la década de 1960. Se basó en la integración de los principios de sistemas, tecnologías de ingeniería y evaluación económica. Entre las primeras contribuciones que se publicaron se encuentran las metodologías que envuelven los sistemas de diseños de pavimentos (Hudson *et al.*, 1968; Scrivener *et al.*, 1968), un sistema de gestión por el Comité de Pavimentos de la Asociación Canadiense de las Buenas Rutas y un sistema de gestión de pavimentos de carreteras (Haas y Hutchinson 1970). Estos fueron seguidos por los grandes avances en el desarrollo de las tecnologías de los componentes de la gestión de pavimentos y para mediados de 1970 gran parte de los conocimientos disponibles se resumen en los primeros libros sobre la gestión de pavimentos (RTAC 1977, Haas y Hudson 1978).



Como se mencionó anteriormente, la era moderna de la gestión de pavimentos surgió después de la Segunda Guerra Mundial. Hay numerosos logros que se han producido en este campo durante las siguientes décadas (Haas, 2001). Dentro de esta misma referencia este tipo de avances son identificados en cuatro categorías y se mencionan a continuación.

La primera categoría, **Expansión de la Red de Carreteras** contiene dos logros indirectos pero muy importantes. En primer lugar, el auge de la construcción de carreteras de las décadas de 1950 y 1960 en los países desarrollados representa un gran aumento en el valor de los activos de la infraestructura vial. Cuando cualquier inversión o activo llega a ser grande, por lo general, hay una presión que acompaña a gestionarlo sabiamente. En el caso de los países en desarrollo, la expansión de la red de carreteras es generalmente más reciente, pero existe la misma necesidad de una buena gestión.

En la categoría de **Tecnología**, uno de los primeros logros y más significativos fue la aplicación de la metodología de los sistemas de diseños (Hudson et al 1968, Scrivener *et al.*, 1968).

La identificación de dos grandes niveles operacionales de la gestión de pavimentos apareció por primera vez aproximadamente a finales de la década de 1960 (Haas and Hutchinson 1970) y llevó al desarrollo de los métodos de asignación de prioridades a nivel de red, incluyendo el análisis del ciclo de vida.

Un tercer logro importante en el lado de la tecnología ha sido el desarrollo de una alta velocidad en la auscultación automatizada o de las tecnologías de adquisición de datos. Esto incluye las mediciones de los perfiles longitudinales y transversales, los métodos de recopilación y análisis de imágenes para la evaluación de los deterioros de superficie, la medición de la geometría, etc., junto con los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) para registrar la localización.

Un cuarto logro importante en esta categoría ha sido el desarrollo de bases de datos altamente flexibles y versátiles relacionadas con los sistemas de gestión usando un Sistema de Información Geográfica (SIG) como plataforma. Esto facilita la integración con otros sistemas de gestión de agua y drenaje, estructuras, etc.

Los modelos de predicción del desempeño son uno de los elementos más importantes de la gestión de pavimentos y han sido durante muchos años un desafío clave que enfrentan los ingenieros de caminos. Desde la década de 1960, el mayor énfasis se ha puesto en el desarrollo de una mejor metodología de predicción del desempeño, como lo demuestra el programa de Pavimentos de Desempeño de Largo Plazo (LTPP por las siglas en inglés Long Term Pavement Performance) por parte del Programa de Investigación Estratégica de Carreteras (SHRP por las siglas en inglés Strategic Highway Research Program).

Una tecnología de buenos materiales juega un papel fundamental en la gestión de pavimentos a nivel de red y proyecto, en particular en lo referente al desempeño. Por lo tanto, un logro importante ha sido una nueva y mejor metodología de diseño de materiales, como lo demuestra el SHRP con el diseño de mezclas asfálticas “SUPERPAVE” (SHRP, 1994).

Uno más de los logros importantes en esta categoría son las nuevas metodologías de mantenimiento y algunas otras que fueron mejoradas. Fue alrededor de 1980 que se conceptualizó la importancia de esta área dentro del desempeño y conservación del pavimento. Por lo que, hoy en día es común que la mayoría de las agencias hagan más hincapié en el mantenimiento.



## 1. Sistemas de Gestión de Pavimentos.

---

Bajo la categoría de la **Evaluación**, uno de los logros más destacables es el de la adopción generalizada de la metodología de análisis económico del costo del ciclo de vida, tanto a nivel de red y proyecto, iniciando alrededor de 1970.

Casi al mismo tiempo, en la década de 1970, las relaciones cuantitativas entre los costos de operación de los vehículos (VOC por las siglas en inglés Vehicle Operating Costs) y las condiciones del pavimento, los costos de los usuarios asociados con los retrasos por las interrupciones de mantenimiento y rehabilitación, comenzaron a ser desarrolladas. Muchos sistemas de gestión de pavimentos ahora incorporan este tipo de relaciones.

En cuanto al **Alcance** de la gestión, uno de los primeros logros importantes fue el cambio de énfasis en la preservación de la red existente, especialmente en los países desarrollados, donde la expansión del sistema vial había disminuido y se dieron cuenta de que se requería de un mantenimiento oportuno y estrategias de rehabilitación con un costo-efectivo adecuado.

La integración de la gestión de pavimentos con otros sistemas de gestión, es un segundo logro en el alcance de la gestión, esta comenzó a formalizarse alrededor de la década de 1990. Si bien dicha integración no ha dejado de avanzar, puede ser defendido con firmeza que los sistemas de gestión de pavimentos han abierto camino para el desarrollo e integración de otros sistemas (Hudson *et al.*, 1997).

El inicio de políticas más estrictas de “cero residuos”, exigencias de salud y medioambientales en muchos países empezó a tener un impacto profundo en los principios de gestión de pavimentos alrededor de 1990. En particular, el efecto se produjo en las estrategias de mantenimiento y rehabilitación, procedimientos de construcción y la economía del ciclo de vida.

Un cuarto logro que figura en el alcance, es el incremento en las cargas y la configuración de los vehículos, que parecía haberse vuelto más dominantes a partir de mediados de la década de 1980. Hay muchos efectos sobre la gestión de pavimentos, incluidas las estrategias de diseño estructural, la economía del ciclo de vida, etc.

Por último, parece que hay una tendencia mundial a la privatización tanto de vías de comunicación individuales como en las redes enteras. Debido a que la gestión de pavimentos se ha desarrollado en gran parte por el sector público y las necesidades de los propietarios, bien puede haber unos cambios de concepto/filosofía/enfoque y las prioridades de las actividades componentes de los PMS para adaptarse a este entorno cambiante.

### 1.2. Descripción de los Sistemas de Gestión de Pavimentos.

En las últimas décadas, el mantenimiento y rehabilitación de carreteras han llegado a ser el mayor problema que tienen que afrontar las agencias a cargo de su administración alrededor del mundo. Este problema se ve agravado por la falta de recursos suficientes para mejorar la condición de las redes de carreteras. Para superar este problema, muchas agencias comenzaron a establecer prácticas y procedimientos alternos para conservar sus redes. Estas prácticas suelen ser limitadas por muchos factores, como la cantidad de personal, la financiación y la falta de experiencia (Wotring *et al.*, 1998).

Un Sistema de Gestión de Pavimentos es un sistema de soporte de decisiones que integra las actividades de los pavimentos con la evaluación de las carreteras y la simulación en las computadoras para lograr el mejor uso posible de los fondos disponibles mediante la comparación de alternativas de inversión y coordinar el diseño, construcción y mantenimiento.





Es una herramienta que facilita la toma de decisiones en todos los niveles de gestión con estrategias derivadas de procedimientos racionales claramente establecidos (Hudson *et al.*, 1979)

La gestión de pavimentos, claramente, no es un concepto nuevo, las decisiones de gestión se toman en el marco de las operaciones normales de cada día en las agencias de carreteras. Los PMS incorporan de manera sistemática todas las actividades que van a suministrar y operar los pavimentos, que van desde la recolección, procesamiento y análisis de datos, identificación de necesidades actuales y futuras; además del desarrollo de programas de mantenimiento y rehabilitación para la implementación de los programas a través del diseño, construcción y mantenimiento (Haas y Hudson, 1987).

La idea detrás de los PMS es mejorar la eficiencia de la toma de decisiones, ampliar su ámbito de aplicación, proporcionar información de las consecuencias de las decisiones y asegurar la coherencia de las decisiones adoptadas en distintos niveles dentro de la misma organización. Un PMS completo tiene aplicaciones en prácticamente todas las divisiones dentro de una agencia de carreteras. El uso de un PMS bien concebido proporciona grandes beneficios a corto y largo plazo para el organismo de ejecución y los usuarios de las carreteras (Peterson, 1987).

La condición actual de un pavimento es el resultado de decisiones tomadas en años anteriores y las decisiones tomadas ahora tendrán una influencia en la condición del pavimento en el futuro. Por lo tanto, las decisiones actuales deben de hacerse a la luz de sus efectos tanto en el futuro inmediato y el anticipado. Al considerar estrategias a corto y largo plazo, el más deseable equilibrio se puede lograr, si las consecuencias de las acciones presentes se pueden predecir de forma confiable. Una estimación de las consecuencias futuras de las acciones podrá ser realizada de manera informal por la toma de decisiones ("criterios técnicos") o mediante el uso de métodos y procedimientos científicos con la ventaja de poder obtener mejores resultados y poder analizar la evolución del estado de los pavimentos.

La base de la gestión de pavimentos se encuentra en la gestión adecuada de los datos recogidos en el seguimiento periódico de los pavimentos. Para que la gestión de pavimentos sea coherente, la información utilizada debe de ser precisa. Datos considerables en un largo plazo de las características físicas de una carretera y su estado actual son necesarios antes de que una acción correctiva sea tomada.

### 1.3. Componentes básicos.

La siguiente es una breve descripción de los componentes de un Sistema de Gestión de Pavimentos. Esta descripción fue tomada casi literalmente de la guía AASHTO de 1990 para un sistema de gestión de pavimentos (AASHTO, 1990). Aunque el texto de la guía se preparó hace varios años, todavía ofrece un panorama muy bueno de los componentes básicos y las características de un PMS (Alkire, 2009).

Un Sistema de Gestión de Pavimentos está diseñado para proporcionar información objetiva y datos útiles para el análisis con el que los administradores de las carreteras pueden tomar decisiones más coherentes, rentables y justificables relacionadas con la preservación de una red de pavimentos. Mientras que un PMS no puede tomar las decisiones finales, si puede servir de base para una comprensión cabal de las posibles consecuencias de políticas alternas.

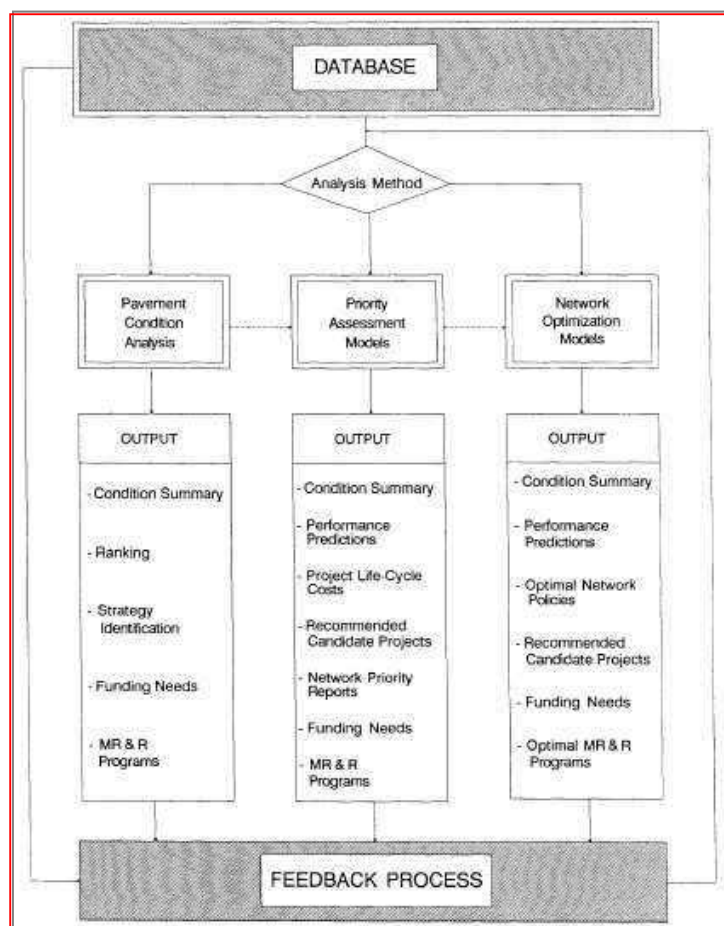


## 1. Sistemas de Gestión de Pavimentos.

La figura 1.1 muestra una representación esquemática de los módulos típicos de un PMS. Estos módulos son:

- **Base de datos** que contiene, como mínimo, los datos necesarios para el análisis de PMS
- **Métodos de análisis** para generar productos útiles para la toma de decisiones
- **Proceso de retroalimentación** el cual se usa de forma continua en las observaciones de campo para mejorar la confiabilidad de los análisis de los PMS

Las opciones principales de un método de análisis, en orden creciente de complejidad, son: análisis de la condición del pavimento, los modelos de evaluación prioritaria y los modelos de optimización de redes. Las agencias de carreteras pueden elegir uno de estos métodos para la aplicación directa o pueden desarrollar el sistema por etapas, comenzando con un método simple y avanzar a un método de mayor nivel de sofisticación y capacidad, siempre y cuando se considera conveniente, basado en las necesidades de la agencia y los recursos disponibles. Tanto la base de datos necesarios como el proceso de retroalimentación se verán afectados por la elección del método de análisis. Estos dos módulos de un PMS deben de ser diseñados cuidadosamente, teniendo en cuenta el potencial actual y futuro de la elección del método de análisis. A continuación se describe cada módulo en cuanto a su objeto y las características de entrada-salida.



**Figura 1.1.** Representación esquemática de los módulos de un PMS (fuente: AASHTO, 1990).





### 1.3.1. Base de datos.

La base de datos es el primer elemento constitutivo de cualquier sistema de gestión, ya que el análisis utilizado y las recomendaciones formuladas por un sistema de gestión deben basarse en información confiable, objetiva y oportuna (actual). Las principales categorías de información esencial para un PMS son:

- Inventario
- Información relativa a la condición del pavimento
- Historial de la construcción, mantenimiento y rehabilitación
- Tráfico
- Datos de los costos

Un número opcional de categorías podría incluir información sobre el diseño, los materiales, la ubicación de los accidentes y la geometría.

El módulo de base de datos respalda información necesaria para otros módulos de los PMS, es decir, el método de análisis y el proceso de retroalimentación. También puede ser útil para otros sistemas de información que pueden ser o haber sido desarrollados por las agencias. Mediante el uso de la información en la base de datos, se pueden generar informes útiles, tales como:

- Informes de deficiencias, que permitan identificar los segmentos de pavimentos con un determinado tipo de deterioro (como agrietamiento, roderas, desprendimientos, irregularidades, etc.) que superen un nivel determinado
- Historial de desempeño, que muestren la variación de un determinado tipo de deterioro en función de la edad y el tráfico para segmentos de pavimento específicos
- Acciones de Mantenimiento Rehabilitación y reconstrucción (MR&R)
- Inventario del pavimento por tipo y área como ejemplo. Un método de clasificación de los pavimentos basado en la severidad y extensión de diferentes tipos de deterioros pueden ser desarrollados basados únicamente en la información de la base de datos

### 1.3.2. Método de análisis.

Existe una variedad de métodos disponibles para analizar el desempeño del pavimento y la información de los costos para determinar las relaciones costo-eficiencia de los tratamientos y estrategias de MR&R. "Tratamiento" se refiere a una sola acción seleccionada para corregir deficiencias específicas del pavimento. Una estrategia puede hacer referencia a un plan que implica una combinación de tratamientos para mantener la red en una condición de servicio (aceptable) en un periodo de tiempo determinado (periodo de análisis) y también puede aplicarse a una serie de tratamientos para mantener un proyecto en perfecto estado en un tiempo especificado. Los métodos de análisis se pueden dividir en tres grandes categorías basadas en el grado de análisis formal utilizado para determinar los costos-efectivos de las estrategias de MR&R. Las tres categorías, con un mayor grado de análisis formal, son: 1) análisis de la condición del pavimento, 2) modelos de evaluación prioritaria y 3) modelos de optimización de red.

La elección de un método de análisis adecuado depende de las necesidades de la agencia de carreteras y las expectativas del PMS, además de los recursos (datos, personal, equipos, fondos, etc.) disponibles para el desarrollo y el uso eventual de larga duración. Además, los métodos de análisis no son necesariamente exclusivos de cualquiera de las tres categorías indicadas. Por ejemplo, los beneficios del usuario y costos de la agencia, discutidos más adelante dentro del método de evaluación de prioridades podrían y con frecuencia se aplican al



## 1. Sistemas de Gestión de Pavimentos.

---

análisis de la condición del pavimento y en la mayoría de los casos también son aplicables a los modelos de optimización.

En la puesta en marcha de un PMS, una agencia puede elegir la opción de desarrollo por etapas para la selección inicial de un método de análisis compatible con los recursos y necesidades y posteriormente avanzar a un método con mayores capacidades. Una agencia puede, por supuesto, decidir que se proceda a su objetivo final si los recursos están disponibles.

### 1.3.2.1. Análisis de la condición del pavimento.

Este método de análisis combina los datos del estado del pavimento para los tipos de deterioro individual, con o sin rugosidad, en una calificación o índice que representa la condición del pavimento en general. La clasificación de la condición del pavimento se expresa generalmente en una escala de 0 a 100, con un valor de 100 que representa la mejor condición del pavimento y 0 que representa las peores condiciones del pavimento. Se pueden usar métodos alternativos para el desarrollo del índice combinado o la clasificación, pero la escala de 0 a 100 es la más prevaleciente. El cálculo de la clasificación de la condición del pavimento requiere una evaluación de los factores de ponderación para las diferentes combinaciones de la severidad y extensión de cada tipo de deterioro. Un índice combinado tiene varias aplicaciones útiles:

- Se trata de una forma relativamente sencilla de comunicar el estado de los sistemas a la alta gerencia, planificadores y legisladores
- Se utiliza como un factor o el único factor, en un esquema de clasificación de prioridades
- Se utiliza como una técnica de estimación de los costos medios para mantener, rehabilitar o reconstruir un proyecto determinado, por ejemplo, pavimentos con una clasificación de 50, en promedio, requieren X cantidad de recursos para repararse.

Los resultados de este módulo pueden incluir:

- Clasificación de todos los segmentos de los pavimentos de acuerdo a los tipos de puntajes de deterioro y el estado en función del tipo de tráfico o carretera
- Identificación de estrategias de MR&R, que definen un conjunto de criterios (por ejemplo, las combinaciones de diferentes tipos de deterioros y el tráfico) para la asignación de una acción particular a cada segmento del pavimento
- La estimación de necesidades de financiación para los tratamientos seleccionados

Los resultados son indicativos de las necesidades actuales basados en las condiciones actuales. Un modelo de predicción no es necesario para este módulo, sin embargo, las estrategias de varios años y los costos no están disponibles en los sistemas, a menos que se hagan suposiciones acerca de las tasas de deterioro y los costos asociados.

### 1.3.2.2. Modelos de evaluación de prioridad.

Este método utiliza un análisis “de abajo hacia arriba” en el que las estrategias de MR&R optimas para proyectos individuales se determinan primero en base a los costos del ciclo de vida (Peterson, 1985) durante un periodo de análisis de 20 a 30 años, o se determina por lo menos para un tratamiento de rehabilitación importante. Los proyectos se pueden priorizar, en el nivel de red, usando una variedad de métodos. La relación costo-beneficio y la medida de la relación costo-eficiencia son las dos formas más frecuentes de dar prioridad, sin embargo, los planes alternativos son posibles. El análisis a nivel de proyecto incluye modelos para predecir las condiciones del pavimento en función de variables como la edad, condición actual del pavimento, el tráfico, las condiciones climáticas, el historial de desempeño y el tratamiento seleccionado. Estrategias alternativas, incluyendo las acciones actuales y futuras, son



evaluadas para cada segmento y son comparadas basadas en el análisis del coste del ciclo de vida, la relación costo-beneficio o costo-efectividad y la estrategia con la prioridad más alta sobre un periodo de análisis es identificada.

Los beneficios, cuando se aplica un PMS generalmente se clasifican en una de tres maneras:

- Beneficios del usuario del camino
- Beneficios de la agencia
- Una combinación de los beneficios del usuario y la agencia

Los beneficios de los usuarios del camino se definen (AASHTO, 1977) "... como el ahorro de los costos de operación de los vehículos, el valor del tiempo de viaje, costes de los accidentes... que los usuarios de las instalaciones mejoradas de las carreteras... disfrutarán." Los beneficios se pueden cuantificar como la diferencia entre los costos para el usuario, sin mejoras y costos para el usuario con las mejoras. Los beneficios divididos por los costos de la agencia por la mejora reflejarán la relación costo-beneficio. A nivel de proyecto, la estrategia que provea la relación más alta recibirá la prioridad más alta de selección. De manera similar, el conjunto de estrategias que maximicen los beneficios para la red, para un presupuesto específico, se utiliza como una herramienta de planificación estratégica para mejorar el programa de la red (es decir, el mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción).

Los costos de la agencia son: 1) los costos anuales de mantenimiento, 2) los costos de rehabilitación o reconstrucción necesarios durante el periodo de análisis y 3) el valor de rescate al final del periodo de análisis. Los costos utilizados en la evaluación de una relación costo-beneficio se basan generalmente en su valor actual neto o convertido en su equivalente a costos anuales uniformes.

Los beneficios de los usuarios deben de gozar de cierta consideración en la evaluación de las prioridades de los segmentos individuales. Ventajas para el usuario están implícitamente incluidas en un PMS al especificar los objetivos de nivel de servicio o estándares de desempeño para diferentes clases funcionales de las carreteras.

Costos similares a los análisis de costo-beneficio, costo-eficacia han sido utilizados para clasificar o dar prioridad a la selección de proyectos. La diferencia es que un sustituto, en términos de desempeño, se utiliza para representar el beneficio asociado con una estrategia en particular. El desempeño o beneficio puede ser medido en términos del área predicha bajo la condición del pavimento (servicio) versus el costo expresado como el costo equivalente anual de tratamientos de MR&R. Por lo tanto, el costo por unidad de servicio puede ser utilizado como una relación coste-eficacia.

El resultado de este método de análisis puede incluir:

- Una lista de proyectos prioritarios que requieren mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción
- Los costos de los tratamientos de MR&R
- Las estimaciones de las necesidades de financiación a fin de lograr normas especificadas de desempeño de la red
- Los programas anuales y multianuales que identifican los segmentos recomendados para el mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción y tipo, tiempo y costo de los tratamientos recomendados



### 1.3.2.3. Modelos de optimización.

Los modelos de optimización proporcionan la capacidad para una evaluación simultánea de toda la red de pavimentos. El objetivo es identificar las estrategias de MR&R que maximizan los beneficios totales de la red (o desempeño), o reducir al mínimo los costos totales de la red sujeta a algunas restricciones a nivel de red, tales como el presupuesto disponible y las especificaciones de desempeño deseadas. Una estrategia de MR&R de red define el tratamiento óptimo para cada combinación posible de variables de desempeño tales como: rugosidad, deterioros físicos, tráfico, medio ambiente y la clase funcional. Este es un enfoque “de arriba hacia abajo” en el que las estrategias óptimas de red se determinan en primer lugar y los tratamientos específicos para proyectos individuales se identifican teniendo en cuenta las condiciones específicas del lugar y las políticas administrativas.

Los modelos de optimización en los PMS se utilizan para analizar varias estrategias de gestión y compromisos a nivel de red. Por ejemplo, dado un presupuesto fijo de la red, en el caso de tratamientos largos y con frecuencia costosos. Estos deben de ser aplicados sobre una porción pequeña de la red, en una porción moderada, o en su caso tratamientos menos costosos deben de ser aplicados en una porción más grande de la red.

Los resultados de los modelos de optimización son esencialmente los mismos que los obtenidos a partir del modelo de prioridades, con solo ligeras variaciones. Por ejemplo, el modelo de optimización no identifica las necesidades del segmento, sino que identifica un óptimo de equilibrio del programa de MR&R en toda una red para cubrir el presupuesto especificado y las limitaciones de las políticas.

### 1.3.3. Proceso de retroalimentación.

Un Sistema de Gestión de Pavimentos, al igual que cualquier otra herramienta de ingeniería, debe ser confiable para ser creíble. El proceso de retroalimentación es fundamental para verificar y mejorar la confiabilidad de un PMS.

Una medida de la confiabilidad de un PMS se puede lograr mediante la comparación de:

- Los costos reales de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción (disponibles a través de licitaciones de contratos y registros de las agencias) con los que se utilizan en el análisis del PMS
- Observaciones de campo de las condiciones del pavimento y el tráfico con los predichos por los modelos del PMS
- Especificaciones actuales de desempeño alcanzadas con las especificadas en el análisis del PMS
- Proyectos actuales rehabilitados o reconstruidos y los tratamientos aplicados con los recomendados por el PMS

Si se encuentran discrepancias significantes entre los datos reales y las proyecciones del PMS, es pertinente que los modelos y parámetros deban de revisarse adecuadamente.

En la puesta en marcha de un PMS, los datos históricos del desempeño pueden no estar disponibles para calibrar los modelos. Por lo que, la calibración puede ser llevada a cabo basándose en criterios técnicos y la experiencia. Con el tiempo, los modelos del PMS pueden ser calibrados de forma sistemática a partir de los datos de los inventarios de las condiciones del pavimento y los registros de la construcción, mejorando así la fiabilidad y la confianza de las recomendaciones del PMS.



Es importante señalar que la información de la retroalimentación también puede ser útil:

- Para los programas de investigación de la agencia
- Para evaluar la influencia de la construcción en el desempeño
- Como medida de la eficacia de los métodos utilizados para el diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados

## 1.4. Niveles de gestión.

Es importante reconocer que los sistemas de gestión de pavimentos se pueden aplicar a dos niveles: de red y de proyecto. A nivel de red, el objetivo principal es proporcionar la información pertinente al establecimiento de los requerimientos del presupuesto de la red, la asignación de fondos según las prioridades y la programación de las acciones de MR&R. A nivel de proyecto, el objetivo principal es proporcionar una primera estimación de la acción de MR&R preferida para cada proyecto, su costo y el costo del ciclo de vida útil. En este apartado algunos aspectos importantes de cada nivel se discutirán, incluidos los productos y la tecnología aplicable.

### 1.4.1. Nivel de red.

Los productos específicos necesarios para cumplir los objetivos de un PMS a nivel de red son los siguientes, como mínimo:

- La información relativa a la condición o el estado de la red del pavimento
- Establecimiento de las políticas de MR&R
- Establecimiento de las necesidades presupuestarias
- La determinación de las prioridades de la red

**Evaluación general del estado (condición) de la red.** La gama de condiciones del pavimento puede ser dividida en categorías discretas (cualitativas) como muy buena, buena, regular y pobre. La proporción de los segmentos (kilómetros) de la red en cada una de estas categorías puede ser utilizada como indicadores del estado general de la red. Estos indicadores pueden ser graficados en función del tiempo para identificar las tendencias.

Los valores numéricos obtenidos a partir de índices de condición combinados se pueden utilizar como una alternativa (cuantitativa) de la medida del estado del sistema. La elección entre las representaciones cualitativa y cuantitativa es una decisión de la administración.

**Establecimiento de las políticas de Mantenimiento, Rehabilitación y Reconstrucción (MR&R).** Existen cuatro métodos disponibles para el establecimiento de las políticas de MR&R:

- Matriz
- Árbol de decisión
- Análisis del costo del ciclo de vida
- Optimización

El método de matriz corresponde a una serie de deterioros específicos con un conjunto de tratamientos MR&R adecuados. La selección de un determinado tratamiento de MR&R se basa en un tratamiento dominante que corrige todos los deterioros del pavimento. La asociación entre el deterioro y el tratamiento se basa en criterios técnicos acumulados en años de experiencia de la agencia.





## 1. Sistemas de Gestión de Pavimentos.

---

Para un árbol de decisión, las variables importantes, tales como tipos específicos de deterioros, tráfico y las clases funcionales, serían considerados en la selección de tratamientos de MR&R. Un diagrama de árbol se desarrolla, el cual muestra las diferentes combinaciones (ramificaciones) de las variables seleccionadas en distintos niveles. Para cada combinación, un tratamiento adecuado de MR&R de la misma forma que el utilizado por el método de matriz (es decir, la experiencia de la agencia y los criterios técnicos).

El método del costo del ciclo de vida selecciona los tratamientos de MR&R basado en el costo del ciclo de vida de una combinación de tratamientos (estrategia) requeridos durante el periodo de análisis. Las estrategias alternativas se pueden evaluar como parte de este método. Los componentes de los costos incluidos en este método de análisis son: construcción, mantenimiento entre los tratamientos de rehabilitación mayor, costo de los tratamientos de rehabilitación y el valor de rescate al final del periodo de análisis. Con el fin de comparar estrategias alternativas, los costos del ciclo de vida se calculan utilizando el valor actual o los costos equivalentes anuales uniformes. Una tasa de descuento apropiada debe de ser asignada con el fin de obtener comparaciones confiables.

El método de optimización requiere la identificación de una función objetivo, variables de decisión y restricciones. Para el análisis del PMS, la función objetivo suele ser uno de los siguientes:

- Maximización de los beneficios para los usuarios
- Maximización de las especificaciones de desempeño de la red
- Reducción al mínimo de los costos totales de valor actual. Las variables de decisión son el conjunto de tratamiento de MR&R. Las restricciones pueden incluir el presupuesto total disponible, las especificaciones mínimas de desempeño de la red y/o las especificaciones mínimas de desempeño para las diferentes áreas (es decir, los distritos). El método de optimización identifica las estimaciones de los presupuestos a corto plazo y largo plazo necesarias para preservar la red del pavimento en o por encima de las especificaciones establecidas.

Requisitos del presupuesto. Los PMS proporcionarán una estimación de las necesidades presupuestarias para preservar la red de pavimentos en los niveles prescritos de desempeño. En la mayoría de los casos, el PMS proporcionará la estimación de los requerimientos anuales y multianuales. En algunos casos los requisitos del presupuesto pueden exceder los fondos disponibles. Por lo que, los métodos de optimización o priorización serán necesarios para preparar un programa candidato de MR&R.

Determinación de las prioridades. Hay muchos métodos para establecer las prioridades, sin embargo, solo los cinco métodos más comunes figuran en la lista que a continuación se presenta. Métodos alternativos pueden ser desarrollados en base a las políticas de las agencias y las decisiones administrativas. Los cinco métodos son:

- Matriz
- Índice de condición
- Relación costo-beneficio
- Costo-efectividad
- Maximización de los beneficios

El *método de matriz* se puede basar en factores tales como la condición y el tráfico (es decir, se le da la más alta prioridad a los pavimentos que se encuentran en las peores condiciones de mayor tráfico).



El *método del índice de condición* puede estar basado en los resultados relativos que generalmente se clasifican de 0 (peor) a 100 (mejor). Puede combinar las prioridades de condición con factores tales como clase funcional o el tráfico con el fin de elaborar una lista definitiva de los proyectos.

El procedimiento de la *relación costo-beneficio* determina la relación entre la eficacia de costos y beneficios para cada segmento del proyecto en el que los segmentos con mayor relación costo-beneficio tendrían la más alta prioridad. Considerando que los métodos anteriores pueden favorecer a una política de la peor condición en primer lugar, la relación costo-beneficio podría proporcionar una alta prioridad para pavimentos en condiciones de regulares a pobres en lugar de comenzar siempre en la peor condición.

El procedimiento del *costo-efectividad* es similar a la relación costo-beneficio, salvo que la función objetivo es maximizar el desempeño en función del costo. El desempeño, en este caso, puede estimarse a partir del área bajo la curva de tiempo-nivel de servicio a partir de modelos de predicción del pavimento. Las secciones con mayor superficie por encima de determinados niveles de servicio por costo unitario tendrían la más alta prioridad. Los costos son los costos de la agencia. Este método no requiere un enfoque de la peor condición en primer lugar.

La *maximización de los beneficios* es inherente a la mayoría de los métodos de optimización. Sin embargo, los métodos para maximizar los beneficios también se pueden desarrollar con la priorización y los costos del ciclo de vida. Por ejemplo, un grupo de proyectos de todos los proyectos candidatos, con los cuales se máxima la combinación de la relación costo-beneficio o costo-efectividad de un presupuesto específico serían seleccionados para los tratamientos de MR&R.

### 1.4.2. Nivel de proyecto.

Una vez que los programas de MR&R de la red están establecidos, es necesario preparar planes y especificaciones de los distintos proyectos de construcción. Dado que el nivel de análisis de red solo proporciona tratamientos que están dirigidos a acciones de MR&R y los costos esperados para cada uno de los segmentos, información adicional será requerida antes de la finalización de los diseños.

La información detallada específica del sitio correspondiente a los ensayos no destructivos, las propiedades de los materiales representativos del lugar y las consideraciones del drenaje, así como información detallada de la evaluación de la condición, comúnmente es requerida para el diseño final, la estimación de los costos y para la preparación de los planos y especificaciones. Basados en la información adicional, los tratamientos dirigidos a acciones de MR&R podrían ser recomendados en un nivel de proyecto de un PMS.

La función objetivo de un PMS a nivel de proyecto por lo general sería la misma que para nivel de red, minimizar los costos del ciclo de vida, maximizar la relación costo-beneficio, etc. El nivel de proyecto de un PMS podría considerar tratamientos de MR&R adicionales, que podrían ser aplicables o necesarios, en un sitio en particular. También puede emplear los costos unitarios más precisos estimados en basados en la localización del proyecto. Por lo tanto, habría alguna posibilidad de que los PMS a nivel de proyecto recomienden una acción diferente a la del nivel de red.





## Capítulo 2.

# Características de los modelos de predicción de desempeño.

### 2.1. Conceptos de servicio y desempeño.

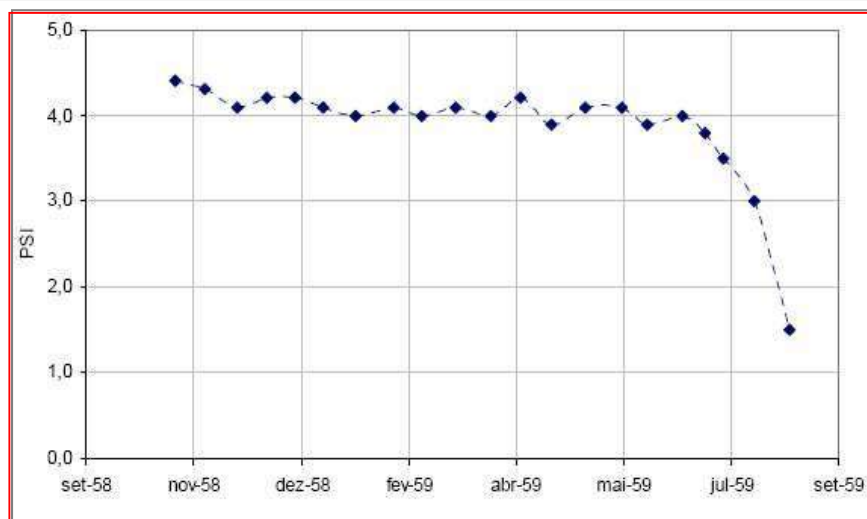
La evaluación del desempeño de un pavimento es una tarea compleja y es importante en todas las etapas de su vida útil, dentro de las cuales se encuentran, el diseño, la rehabilitación y la gestión. En términos generales, los principales componentes del desempeño de un pavimento incluyen la evaluación de la rugosidad, deterioros, fricción y estructura.

Los pavimentos no son concebidos para durar eternamente, los son para un determinado periodo de tiempo o “ciclo de vida”. Durante este ciclo, el pavimento inicia su vida en una condición perfecta hasta alcanzar una condición de falla.

Antes del desarrollo del concepto de servicio, la atención estaba enfocada en el determinar si la evaluación del pavimento era inadecuada (Carey e Irick, 1960). Un pavimento era considerado satisfactorio o no satisfactorio solamente en función de sus necesidades de conservación. La tecnología de proyecto existente en esa época no consideraba directamente el desempeño. Los métodos se centraban en la determinación de los espesores de las capas de forma que las tensiones y deformaciones no excedieran ciertos niveles específicos. Los deterioros que se presentaban en los pavimentos estaban asociados a las cargas impuestas a la estructura, no existía información relacionada con el comportamiento funcional.

Uno de los principales logros de la pista experimental de la *American Association of State Highway Officials (AASHO Road Test, 1956-1960)* fue el desarrollo de un concepto o método para evaluar el desempeño de un pavimento. Este concepto se basó en que la función principal de un pavimento era servir a los usuarios del camino. A su vez se utilizó la calidad de la conducción como una medida de que tan bien podrían servir los pavimentos al público.

Carey e Irick (1960) propusieron el termino desempeño a través del concepto “servicio-desempeño”. Por medio, de los estudios realizados en la pista de la *AASHO Road Test*, desarrollaron un sistema que describió el término “desempeño”. El desempeño y la variación del servicio (medida por el índice *Present Serviceability Index*, PSI) a lo largo del tiempo, como se observa en la figura 2.1, para una sección de pavimento asfáltico de *AASHO Road Test* (Highway Research Board, 1962).



**Figura 2.1.** Desempeño en un pavimento asfáltico de una sección de AASHO Road Test (Adaptado de HRB, 1962).

En el pasado por lo general el desempeño del pavimento ha sido definido como un resumen o la acumulación de los índices de servicio del pavimento basado en mediciones objetivas de la rugosidad y/o los deterioros del mismo. Como se mencionó anteriormente la palabra “desempeño” se deriva del trabajo de Carey e Irick (1960), aunque su definición original dejó margen para una mayor generalidad. Sin embargo, cabe mencionar que no ha habido un acuerdo universal sobre la definición del desempeño del pavimento. Por ejemplo el desempeño del pavimento se define indistintamente como: a) la capacidad del pavimento para garantizar un nivel aceptable de servicio con un determinado grado de confiabilidad a un nivel supuesto de mantenimiento (Kenis, 1978), b) las repeticiones admisibles de carga antes de la falla funcional del pavimento (Crawford y Katona 1975); c) la probabilidad de que la vida crítica del pavimento se logrará basada en la aparición de condiciones críticas (Kennedy y Lister 1978).

Los conceptos actuales de desempeño del pavimento incluyen algunas consideraciones de desempeño funcional, estructural y seguridad. El desempeño estructural de un pavimento se refiere a su condición física, es decir, la aparición de agrietamientos, escalonamientos, desprendimientos o cualquier otra condición que pueda afectar negativamente a la capacidad de carga de la estructura del pavimento o que requiera un mantenimiento. El desempeño funcional se refiere a lo bien que el pavimento sirve al usuario. En este contexto, el confort de conducción o la calidad de rodamiento es la característica dominante. Con el fin de cuantificar esta característica, se utiliza el concepto “servicio-desempeño” como medida del desempeño de las ecuaciones de diseño en la Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO (1993). A continuación se presenta una explicación de este concepto.

El concepto servicio-desempeño se basa en cinco premisas fundamentales, que se resumen de la siguiente manera (AASHTO, 1993):

1. Las carreteras son para el confort y la comodidad de los viajeros (usuarios).
2. Confort o calidad de conducción, es una condición de respuesta subjetiva o de la opinión del usuario.
3. El servicio puede ser expresado por la media de las calificaciones otorgadas por todos los usuarios de las carreteras y se denomina nivel de servicio.



## 2. Modelos de predicción de deterioros.

---

4. Existen características físicas de un pavimento que se pueden medir de forma objetiva y que pueden ser relacionadas con las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento produce un índice de servicio objetivo.

5. El desempeño puede ser representado por la historia de servicio del pavimento. El servicio puede ser universalmente medido utilizando un índice de servicio basado en la rugosidad o confort de conducción, el uso generalmente aceptado hace que el desempeño del pavimento sea una función de la rugosidad del pavimento. Sin embargo, muchos otros factores, tales como la resistencia al deslizamiento, la capacidad estructural y el agrietamiento, pueden ser importantes en la determinación de la adecuación general de un pavimento. La palabra “desempeño” es un candidato natural para describir esta adecuación general.

La determinación del desempeño de un pavimento envuelve un estudio de su comportamiento funcional. El término evaluación funcional fue introducido para representar los procesos de identificación y caracterización de diversos aspectos relacionados a las condiciones de la superficie de rodamiento, incluyendo cuestiones relacionadas al confort y la seguridad del tráfico.

Varios criterios de evaluación funcional se han desarrollado y utilizado ampliamente en los últimos años, que difieren en forma, contenido y objetivo final de la evaluación comparativa. Los criterios subjetivos permiten evaluar el estado de los pavimentos en base a la opinión de los usuarios, sin detallar los tipos y las cantidades de los defectos existentes. Los criterios objetivos para la calificación y cuantificación de los defectos lo hacen a través de metodologías especificadas para cada tipo de evaluación deseada. Cualquiera que sea el tipo de evaluación adoptado, la finalidad de la evaluación funcional es proporcionar parámetros indicativos de las necesidades de mantenimiento de una red carretera o de una vía.

## 2.2. Evolución histórica de los índices de deterioro en pavimentos.

La información del deterioro de un pavimento es usualmente convertida en un índice de condición. Este índice combina la información de todos los tipos de deterioro, severidades y cantidades en un solo número. El cual puede ser utilizado a nivel de red para definir el estado de la condición, para identificar la necesidad de tratamientos, así como para su clasificación y priorización, además de que este número es utilizado para pronosticar el estado del pavimento. El índice de condición puede representar un deterioro único, como agrietamiento por fatiga o una combinación de muchos deterioros, el cual es usualmente referido como un índice compuesto. Algunos índices también incluyen información adicional, como los niveles de tráfico, la clase de carretera, etc. Para producir índices de clasificación de prioridad.

A continuación se hace una breve descripción de los índices más comúnmente utilizados por las agencias de carreteras, pero sobre todo se trata de describir los índices empleados en la investigación.

### 2.2.1. Índice de Servicio Presente (PSI).

Uno de los primeros índices de condición del pavimento fue la Clasificación de Servicio Presente (PSR por las siglas en inglés Present Serviceability Rating) desarrollado en la pista de pruebas AASHO. El PSR fue desarrollado de un panel de evaluadores que viajaban en un automóvil asignando un valor de la condición del pavimento que indica el nivel de servicio que el pavimento provee. Los investigadores querían, sin embargo, este índice para medir objetivamente. Por lo tanto, se desarrollo una relación entre la media del PSR asignada por el



panel y algunas medidas objetivas tales como la rugosidad, el ahuellamiento y el agrietamiento (Carey e Irick, 1960). El nuevo índice, que se basa en los valores de la rugosidad del pavimento, ahuellamiento, agrietamiento y parches fue llamado Índice de Servicio Presente (PSI por las siglas en inglés Present Serviceability Index). La relación obtenida del PSI para pavimentos flexibles se muestra en la ecuación 2.1.

$$PSI = 5.03 - \log(1 + SV) - 1.38 (RD)^2 - 0.01 (C + P)^{0.5} \quad 2.1$$

Donde:

PSI= Índice de Servicio Actual, que es una estimación estadística de la media de las calificaciones del PSR, dado por el panel de evaluadores.

SV= Variación de la pendiente en la sección del perfilómetro CHLOE (la variación de la pendiente es una medida rápida de la rugosidad).

RD= Profundidad media de la rodera (in).

C= Agrietamiento (ft/ 1000 ft<sup>2</sup>) (flexible).

P= Parche (ft/ 1000 ft<sup>2</sup>).

El servicio de un pavimento se expresa en términos del Índice de Servicio Actual (PSI) o la calificación de la condición del Pavimento (PCR). El PSI y PCR son índices compuestos estadísticamente derivados de los elementos constitutivos de las condiciones funcionales y estructurales. La contribución de los distintos elementos a los índices en general depende de sus respectivos factores de peso asignados en la ecuación para el cálculo de los índices compuestos.

Particularmente este tipo de índice tiene aplicación en el método de diseño de pavimentos AASHTO, donde se consideran dos valores de este tipo de índice. “El índice de servicio inicial es una estimación realizada por el usuario de que PSI o PCR tiene inmediatamente después de la construcción. El índice de servicio final es el nivel más bajo aceptable antes de que la repavimentación o reconstrucción sea necesaria para una clase particular de carretera” (AASHTO, 1990).

Los principales factores que influyen en la pérdida de capacidad de servicio de un pavimento son el tráfico, la edad y el medio ambiente.

### 2.2.2. Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

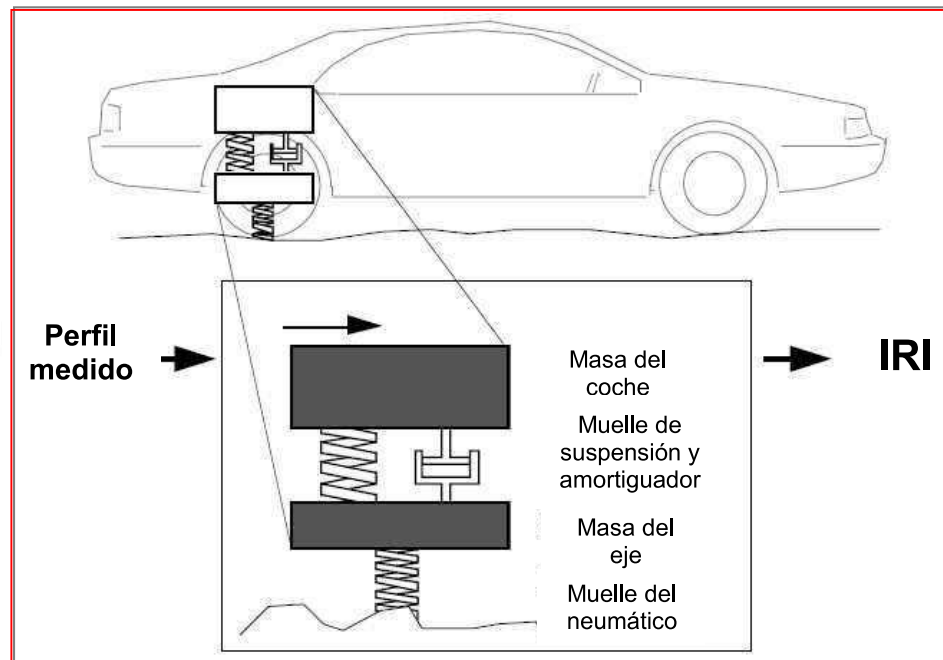
El índice de Rugosidad Internacional o Índice de Irregularidad Internacional (IRI) resume matemáticamente el perfil longitudinal de una carretera sobre la rodera del vehículo, representando a la vibración inducida por un vehículo que circula sobre una vía irregular. El IRI es un padrón de medida que asocia los resultados obtenidos con los sistemas tipo respuesta, siendo definido como la razón entre el total de desplazamientos ocurridos en la suspensión de un vehículo dividido por la distancia recorrida.

Los detalles del cálculo del IRI y las normas de procedimiento que aplican para la calibración de los equipos con los que se mide son discutidas por Sayers ed. al. (1986). Según Sayers (1995), el desarrollo del IRI ocurrió en tres etapas:

1. Simulación del cuarto de carro en perfilómetros de alta velocidad. En los años 60's, la General Motors (Spangler y Kelly, 1964) desarrollaron un medidor de alta velocidad que podía medir el “perfil verdadero” en el rango de longitudes de onda que afecta a las vibraciones del vehículo. Una de las primeras aplicaciones de este tipo de sistema combino medidas de perfil con un modelo matemático conocido como cuarto de carro.



2. La investigación del Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras (NCHRP) y Golden Car. En el final de los años 70, el NCHRP incentivo un estudio sobre los sistemas medidores tipo respuesta. El objetivo era desarrollar métodos de calibración para estos sistemas. Concluyeron que el único método valido era la “calibración por correlación” con un índice predefinido. Fueron probados y simulados varios índices y la mejor correlación fue obtenida usando una simulación de vehículo con un conjunto de parámetros llamado Golden Car (el nombre se baso en el concepto de un instrumento de oro que servía de referencia, guardado en una cámara y usado para calibrar otros instrumentos). Algunos investigadores acreditan que los parámetros Golden Car describen un vehículo americano de tamaño mediano de 1978. Las constantes de los muelles fueron seleccionadas para que coincidan con las dos primeras frecuencias de resonancia (choque entre la carrocería y el eje), mas el amortiguador así los parámetros del Golden Car representan un valor mayor que el de muchos vehículos (figura 2.2). Fue escogido un valor alto del amortiguador para representar una mejor correlación entre las variedades de sistemas tipo respuesta.



**Figura 2.2.** Representación esquemática del modelo de cuarto de coche (Adaptado de Sayers y Karamihas, 1998).

3. Desarrollo del IRI por el Banco Mundial. Casi todos los equipos que miden la irregularidad son capaces de producir medidas en una escala única, siempre que esta escala sea seleccionada adecuadamente. El IRI debería de ser reproducible, portable y estable con el tiempo. Para asegurar la reproducibilidad, el índice debería de ser medible por distintos equipos, incluyendo los sistemas tipo respuesta. Para ser estable en el tiempo, el IRI debe de ser descrito por una transformación matemática del perfil medido. Las mejores correlaciones entre el índice de perfil y los sistemas tipo respuesta fueron encontradas en dos simulaciones de vehículos utilizando los parámetros del Golden Car para analizar el cuarto de carro y la mitad de carro. El análisis de cuarto de carro fue seleccionado porque podía ser usado por todos los métodos de medida disponibles en la época. La velocidad de 80 km/h fue escogida como patrón, ya que en esta velocidad el IRI es sensible a las longitudes de onda que causaban vibraciones en los vehículos.





Así, después de esta última etapa, el IRI fue seleccionado como escala universal de irregularidad longitudinal. La medida se clasifica tanto por su nombre y por su unidad técnica (m/km, mm/m o in/mi). El sistema de tipo respuesta de referencia usado en la determinación del IRI fue un modelo matemático llamado “simulación de cuarto de carro” y cuando se obtiene de una simulación de referencia, la medida se llama “pendiente promedio rectificada de referencia”.

El IRI describe una serie de irregularidades en la que el valor de cero se asigna para una superficie plana verdadera. Es un número que resume la cantidad de impacto debido a la calidad de la rugosidad longitudinal en respuesta del vehículo y está asociado con: el costo de operación del vehículo, la carga dinámica de los neumáticos y la condición superficial.

### 2.2.3. Índice de Condición del Pavimento (PCI).

A finales de la década de 1960 fueron desarrollados más índices únicos por varios departamentos de transporte en Estados Unidos de América, ya que desarrollaron sus propios procedimientos de inventario de las condiciones del pavimento (Al-Omari y Darter, 1994). Estos índices se han desarrollado a menudo a través del consenso al considerar que deterioros incluir y como van a ser calculados.

El cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. desarrollo un índice de condición muy completo para un sistema de gestión de pavimentos en 1976 (Shahin, ed. al.). Este incluyó un procedimiento para la evaluación de la condición del pavimento y un método detallado para calcular el Índice de Condición del Pavimento (PCI por las siglas en inglés Pavement Condition Index), el cual es utilizado actualmente por muchas agencias.

El PCI es un índice numérico con valores que van de cero (fallado) a 100 (excelente). El cálculo del PCI se basa en los resultados de un levantamiento de las condiciones de forma visual en el que se identifican los tipos de deterioro, severidad y cantidad. La figura 2.3 muestra la escala adoptada por el PCI estándar y el PCI habitual, que también puede ser usado para calificar las condiciones del pavimento.

El PCI fue desarrollado para proporcionar un índice de integridad estructural y las condiciones funcionales de la superficie. La información obtenida de los deterioros como parte del PCI en la inspección proporciona una idea de la causa del deterioro y si está relacionado con los efectos de las cargas o el clima.

El grado de deterioro del pavimento es función del tipo de deterioro, severidad y densidad. Debido a la gran cantidad de condiciones posibles, generar un índice que tenga en cuenta los tres factores se considera un problema. Para salir de él, fueron introducidos los “valores de deducción” así como los factores de peso indicando así el grado de efecto que cada combinación de tipo, nivel de severidad y densidad del deterioro que se pudiera presentar en la condición de un pavimento. Los valores de deducción, fueron estimados usando profundamente el conocimiento del comportamiento del pavimento, las aportaciones de muchos ingenieros expertos en el área, ensayos de campo y la evaluación del procedimiento. El uso del PCI para pavimentos de carreteras, aeropuertos y parques de estacionamiento ha sido ampliamente aceptado y ha sido formalmente adoptado como un procedimiento normalizado por muchas agencias en todo el mundo.





## 2. Modelos de predicción de deterioros.

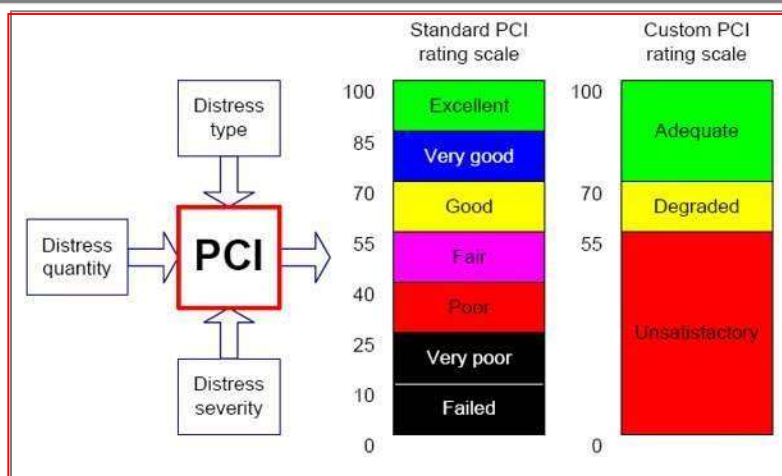


Figura 2.3. PCI datos de entrada, escala estándar y escala de uso.

### 2.3. Necesidad de los índices de condición de pavimentos.

Los índices de condición se utilizan en la mayoría de los sistemas de gestión de pavimentos por las siguientes cuatro razones básicas (Deighton y Sztraka, 1995):

- Activadores de tratamientos
- Calcular los costos de ciclo de vida
- Evaluar la condición de la red
- Hacer uso de la misma escala relativa entre sistemas

**Activadores de tratamientos.** Durante un análisis de los PMS, se genera una lista de estrategias de rehabilitación y tratamientos. En la generación de esta lista, es importante que solo los tratamientos factibles sean considerados, de lo contrario la lista sería infinitamente larga. Para que esta lista incluya los tratamientos viables, los PMS necesitan saber cuando un tratamiento es factible y cuando no lo es.

El proceso utilizado por la mayoría de los PMS puede ser descrito como un proceso de adopción simple, donde los árboles de decisión o activadores de tratamientos se utilizan. Los principales insumos para este proceso son los índices de condición. Por ejemplo, con un tratamiento como una “microcapa” un índice de condición es necesario para indicar cuando una carretera se encuentra en una condición que hace que una aplicación de una “microcapa” es factible.

La factibilidad puede examinarse desde dos perspectivas: (1) operacional y (2) económicamente. Es importante no confundirlos. Desde el punto de vista operativo, una microcapa (25 mm) a veces es imposible colocarla en el pavimento. Considere la posibilidad de un camino con baches, deformaciones y una irregularidad fuerte. Si un PMS incluye un tratamiento de una microcapa en la lista de estrategias para la sección del pavimento este perdería credibilidad.

Por lo tanto, desde una perspectiva operacional, el PMS necesita índices de condición para indicar cuando una carretera esta fuera de la zona operacionalmente factible para recibir un tratamiento en particular. Usualmente las agencias inician sus PMS, imitando las prácticas comunes, por lo que este define generalmente los que es factible desde el punto de vista operacional.



**Cálculo de los costos.** Los índices de condición del pavimento se utilizan para ayudar a calcular de mejor manera las estimaciones de costos para toda la gama de estrategias de gestión de pavimentos. Esto puede ayudar a hacer mejores proyecciones de costos.

Hay muchas formas en que los índices de condición pueden ayudar a calcular los costos con precisión. El costo aplicando el mismo tratamiento cambiando las circunstancias. Por ejemplo, cuesta más sellar las grietas en una carretera con muchas grietas que en una con pocas grietas. O bien, cuesta más colocar una sobrecarpeta en una carretera con agrietamientos de fatiga que en una sin agrietamientos de fatiga. O bien, que cuesta más tapar los baches en una carretera con muchos baches o en una carretera con pocos baches. Luego podemos mencionar una renivelación para superficies irregulares, reparaciones de drenaje para los drenajes en mal estado, reparaciones en la base para disminuir las deflexiones altas y así sucesivamente.

Los índices de condición no solamente pueden señalar las necesidades de trabajos extras, a veces también pueden ser utilizados para estimar las cantidades necesarias en las actividades de sellado de juntas o bacheo, entre otras.

**Evaluación de la condición de la red.** Un PMS es una herramienta que una agencia utiliza para obtener información que ayuda a tomar decisiones. Los índices de condición individuales que se utilicen para el cálculo dentro de PMS son unidimensionales, es decir que solo describen una medida de la condición. Un ejemplo es el índice de rodamiento o el índice de agrietamiento por fatiga.

Los índices compuestos han sido desarrollados por muchas agencias y se utilizan para describir o explicar muchas medidas diferentes de la condición a la vez. Los índices compuestos son a menudo una combinación de todos los datos auscultados de los deterioros por una agencia. A menudo se calculan a partir de la calidad de rodamiento, agrietamientos, roderas y de los datos de condición. La ponderación relativa de cada uno de los deterioros con el índice compuesto se basa a menudo en la opinión colectiva de las agencias en cuanto a cuáles son los deterioros más importantes del pavimento.

Los índices compuestos son utilizados por la mayoría de las agencias para mostrar el estado actual (condición) de los pavimentos en sus sistemas carreteros. Su uso permite la comparación de las carreteras que experimenten distintivamente deterioros diferentes, pero son consideradas deficientes. Un índice compuesto es también más fácil de explicar a un nivel no técnico dentro y fuera de la agencia.

**Comparación de caminos con diferentes deterioros.** La cuarta razón del porque son necesarios los índices de condición es para comparar directamente a un camino con otro que puede haber experimentado diferentes patrones de deterioro. Mientras los índices de diferentes deterioros, tales como los agrietamientos de fatiga, roderas e irregularidades son desarrollados con diferentes unidades, pero con la misma escala relativa, caminos diferentes, con diferentes deterioros pueden ser comparados entre sí. En algunos casos, las agencias han desarrollado escalas sin unidades para reducir al mínimo las diferencias entre los índices.

Con estos índices sin unidades, un valor de cuarenta puede representar un mal estado de un índice y también representa el mismo nivel de malas condiciones para otro. En otras palabras cuarenta es cuarenta, no importa cual medida de la condición representa. Esto requiere una cuidadosa condición entre los índices.

Baladi y Snyder (1992), proporcionan beneficios más específicos que se pueden derivar de la utilización de los índices de deterioros en pavimentos. Ellos enfatizan lo siguiente:



## 2. Modelos de predicción de deterioros.

---

- Cualquier índice de deterioro del pavimento permite una mejor comunicación entre los ingenieros de carreteras y su estado. Por ejemplo, si la escala de calificación de los índices de deterioro es de 0 a 100 (con 100 como un pavimento perfecto) y el valor umbral es de 60, entonces un valor de un índice de deterioro de una sección de pavimento de 45 tiene el mismo significado específico a todos los ingenieros, independientemente de la ubicación geográfica.
- Los índices de deterioro de los pavimentos también permiten a las organizaciones de las carreteras establecer un nivel estándar o umbral crítico por debajo del cual se considera inaceptable el pavimento y se necesita de trabajos importantes de conservación o rehabilitación. Este valor crítico puede variar según la clasificación funcional del pavimento. Para cada índice de deterioro o para todos los índices, también es posible establecer diferentes niveles de umbral por el que un solo nivel pueda indicar la necesidad de mantenimiento rutinario, otro la necesidad de mantenimientos menores y otro identificar las principales necesidades de rehabilitación.
- Los índices de deterioros del pavimento también permiten a las agencias de carreteras clasificar los caminos y carreteras para sus actividades de mantenimiento y rehabilitación.
- Algunos índices de deterioro tales como el PSI relacionan valoraciones subjetivas a las medidas objetivas de los deterioros.
- Los índices de deterioro de pavimentos obtenidos durante varios años permiten a los PMS determinar la tasa de deterioro de los pavimentos para diferentes secciones de la red y permitir a los ingenieros de las agencias modificar o calibrar sus modelos de predicción del desempeño en base a esta información.
- Los índices de deterioro permiten a los diseñadores de los pavimentos mirar hacia atrás en el métodos de diseño y analizar los efectos de varios atributos de diseño en los deterioros de los pavimentos.
- Si cada índice de deterioro se calcula basado solamente en un tipo de deterioro (índices detallados de deterioro), entonces es posible determinar la cantidad relativa de los daños atribuidos por cada mecanismo de deterioro. Por lo tanto, es posible llevar a cabo análisis de las alternativas de rehabilitación posibles.
- Los índices de deterioro permiten a los ingenieros de carreteras evaluar el estado de “condición” de la red de carreteras y su tasa de deterioro. Esta información, junto con el adecuado análisis de la causa del deterioro del pavimento, las técnicas de reparación y sus costos asociados se utilizan para estimar las necesidades de la red.

En resumen, los índices de deterioro del pavimento son la base numérica para la cuantificación del deterioro del pavimento y se pueden usar en muchas formas y procesos dentro de un sistema de gestión de pavimentos.

### 2.4. Modelos de predicción de deterioros.

El concepto servicio-desempeño descrito anteriormente constituye un desarrollo importante en la materia del estudio de pavimentos desde los años 60. Un reto importante entre los investigadores y los ingenieros de carreteras, es el desarrollo de buenos modelos para predecir el comportamiento del pavimento.

Según Rodríguez (1991), un pavimento es una estructura bastante compleja con respecto a la predicción de su desempeño futuro, ya que el desempeño depende de la interacción de una serie de factores (tráfico, clima, procedimientos constructivos, condiciones del drenaje, estructura del pavimento, materiales de construcción y políticas de mantenimiento adoptadas) y su cuantificación es muy difícil.



En 1980, Darter introduce los criterios básicos que debe de seguirse para desarrollar modelos de desempeño confiables. Dentro de estos criterios están incluidos:

- Una adecuada base de datos
- La inclusión de todas las variables que afectan el desempeño
- Una adecuada forma funcional del modelo
- La satisfacción de los criterios estadísticos relativos a la precisión del modelo
- La comprensión de los principios detrás de cada enfoque del modelo

Además de estos puntos, es importante que las limitaciones de cada modelo se entiendan de forma que no se utilicen fuera del alcance de su uso previsto, es decir, su espacio de inferencia.

Según Prozzi (2001), el origen de los datos que serán usados en el desarrollo de los modelos de predicción presenta algunas características específicas. Estas pueden ser:

- Aleatoriamente seleccionados de secciones en servicio
- De secciones en servicio seleccionadas siguiendo un proyecto experimental
- De secciones de prueba de pavimentos intencionalmente contruidos, sujetos a las acciones de tráfico de una carretera y del medio ambiente
- De secciones de prueba de pavimentos intencionalmente contruidos sujetos a las acciones de tráfico acelerado (simuladores de tráfico a gran escala) y a las condiciones ambientales

Prozzi (2001) verificó que los problemas encontrados en los modelos desarrollados a partir de datos seleccionados aleatoriamente de secciones de pavimento en servicio son causados por: a) por la presencia de multicolinealidad entre las variables independientes; b) por los eventos típicos no observados dentro de los datos; c) por los problemas de endogeneidad causados por el uso de variables endógenas como variables independientes.

La multicolinealidad es un problema típico de los datos de desempeño basados en el tiempo. Variables como la edad del pavimento y el tráfico acumulado, son casi perfectamente colineales. Así mismo, los modelos estimados tienden a fallar en la identificación de los defectos de ambas variables simultáneamente.

En cuanto a los problemas de endogeneidad, hay variables que son intrínsecas en la estructura del pavimento, como su capacidad de soporte. Así mismo, cualquier variable independiente que sea indicadora de capacidad de soporte será una variable endógena determinada dentro del modelo y no podrá ser adoptada como exógena.

Existen técnicas estadísticas que pueden solucionar los problemas presentados, o alternativamente, desarrollar modelos basados en secciones en servicio, seleccionadas por un buen proyecto experimental.

A continuación se presenta una descripción de las clasificaciones de los modelos de predicción del desempeño, esta clasificación se baso en una extensa revisión bibliográfica.

### 2.4.1. De acuerdo al método de modelación.

Basados en lo métodos de modelación, los modelos de deterioro de pavimentos se pueden clasificar en tres grupos: mecanicistas, empíricos y empírico-mecanicistas. Históricamente el comportamiento de un pavimento se estudió mediante un enfoque mecanicista basado en los principios físicos como la teoría de la mecánica de suelos, las propiedades mecánicas de los materiales del pavimento bajo carga y múltiples técnicas de análisis estructural. La mayoría de





## **2. Modelos de predicción de deterioros.**

---

estos estudios se realizaron bajo condiciones limitadas de experimentación. Por lo tanto, tienen que ser validados y calibrados para una amplia gama de situaciones reales antes de aplicar los modelos mecanicistas desarrollados. Además, la mayoría de estos modelos siguen siendo simples y solo representan el material o las respuestas estructurales en situaciones limitadas. A pesar de que el enfoque mecanicista es considerado el mejor para caracterizar el proceso de deterioro, el desarrollo de modelos mecanicistas confiables y aceptables se encuentra en sus primeras etapas y requiere de una cantidad significativa de tiempo y esfuerzo para realizar estudios continuos.

El enfoque empírico utiliza técnicas estadísticas para definir el deterioro del pavimento con sus variables explicativas. Aunque este enfoque tiene la capacidad de vincular el comportamiento del pavimento con sus variables causales, las variables explicativas se toman solo en función de su disponibilidad y los valores estadísticos. En consecuencia, este método padece de las limitaciones asociadas con el alcance y el rango de los datos disponibles.

El enfoque empírico-mecanicista es la combinación de los dos métodos anteriores. El mecanicista ayuda a determinar las respuestas del pavimento, la estructuración de las variables explicativas y las formas funcionales de los modelos empíricos. La relación final entre las variables de respuesta y el desempeño del pavimento se desarrolla con las técnicas estadísticas adoptadas en el método empírico. La combinación coherente utiliza las ventajas de ambos métodos y es de esperarse que se alcancen mejores modelos de desempeño que utilizando el método empírico solamente.

Como cuestión de hecho, no hay una línea absoluta entre el método mecanicista y el empírico, ya que todos los modelos basados en el principio mecanicista involucran elementos del empirismo mientras que los modelos empíricos también reflejan algunos de los principios mecanicistas. En consecuencia, la capacidad de extrapolación de los modelos empíricos no debe ser subestimada, alternativamente, la capacidad de los modelos mecanicistas de extrapolar no debe de ser sobrestimada (Nestorov et al., 1999).

En la práctica, ambos modelos empíricos y mecanicistas han sido utilizados en varios desarrollos e implementaciones de modelación del desempeño del pavimento, a pesar que los métodos empíricos y empírico-mecanicistas han sido más comúnmente utilizados.

En la mayoría de los estudios realizados en décadas pasadas, los modelos de desempeño de los pavimentos fueron desarrollados con el enfoque empírico a pesar de sus limitaciones, incluyendo el método de diseño de pavimentos propuesto por la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO) en 1993 (AASHTO, 1993). En la actualidad, existe una creciente tendencia a desarrollar modelos empíricos-mecanicistas, tales como la Guía de Diseño Empírico-Mecanicista de Pavimentos Nuevos y Rehabilitados (M-EPDG) desarrollado por la Fuerza Conjunta de Tarea en Pavimentos de la AASHTO y el Programa Cooperativo Nacional de Investigación de Carreteras (NCHRP) (TRB, 2005).

### **2.4.2. Modelos Deterministas y Modelos probabilísticos.**

Existe un consenso dentro de la literatura para clasificar a los modelos de predicción de desempeño en deterministas y probabilistas, por lo que, en este apartado haremos una descripción de ambos modelos.

Con base en los resultados de predicción de los modelos de desempeño, pueden ser clasificados como deterministas y probabilistas. Para los modelos deterministas, la condición futura de una sección de pavimento se predice de forma exacta el valor de servicio o su condición con información pasada del pavimento. Por otro lado, los modelos probabilistas



predicen el desempeño de un pavimento con una probabilidad dada con la cual el pavimento debería de caer en ese estado particular de condición, describiendo las posibles condiciones del pavimento con un proceso aleatorio (Durango, 2002).

### 2.4.2.1. Modelos deterministas.

Según Lytton (1987), los modelos deterministas calculan la vida de servicio de un pavimento, su nivel de defecto u otras medidas de su condición. En esta clase están incluidos los modelos de respuesta primaria del pavimento, de desempeño estructural, de desempeño funcional y los modelos de defectos:

- Respuestas primarias. Para las cargas de tráfico y para las condiciones climáticas impuestas, estos modelos determinan las respuestas de deflexiones, tensiones y deformaciones del pavimento.
- Desempeño estructural. Determinan los efectos de todas las clases y las medidas de las condiciones del pavimento.
- Desempeño funcional. Determinan el servicio o atributo de la superficie y el índice de fricción. Son medidas de calidad de rodamiento del pavimento, que proporcionan seguridad y confort al usuario. La ecuación pionera de desempeño funcional fue la desarrollada por la pista de pruebas AASHO.
- Modelos de defectos. Son derivados de los modelos de desempeño funcional y estructural, a través de estos se determinan los factores de equivalencia de carga. La importancia de estos modelos es que los factores de equivalencia de carga se derivan de ellos, lo que hace posible diseñar pavimentos estructuralmente resistentes a los efectos de un tráfico mixto y ayudar a estimar el costo de la construcción y rehabilitación de los pavimentos.

La mayoría de los modelos de desempeño del pavimento desarrollados en las primeras etapas de la investigación de pavimentos son deterministas (Haas y Hudson, 1987). En la actualidad, los modelos deterministas de desempeño, tales como los modelos de regresión AASHTO y diferentes curvas en forma de S todavía se utilizan. Basados en la pista experimental AASHO, la ecuación de desempeño inicial del pavimento fue desarrollada para predecir la pérdida de servicio mediante la adquisición exhaustiva de los efectos de las cargas de tráfico aplicadas, características de materiales y condiciones ambientales (AASHO, 1962). Con el fin de acomodar el impacto de las acciones de mantenimiento de rutina, la curva en forma de S que proporciona la predicción más exacta a largo plazo, propone reducir las tasas de deterioro al final del periodo de diseño del pavimento (García-Díaz y Riggins, M. 1984). Sin embargo estos modelos no son capaces de adaptarse eficazmente a los errores de medición y factores no observados. Como consecuencia, el error de predicción puede ir tan alto como una unidad del valor PSI, utilizada en la ecuación de diseño ASSHTO (Prozzi, 2001).

Como parte del esfuerzo para mejorar esos modelos, otros modelos de regresión (Paterson, 1987; Prozzi, 2001) fueron propuestos considerando más variables explicativas, como la resistencia del pavimento en diferentes subrasantes, condiciones ambientales, acciones de mantenimiento y diferentes modelos de estructuras basados en los datos de campo. Paterson (1987) desarrollo una serie de especificaciones incrementales al modelo empírico en diferentes niveles de complejidad para explicar el fenómeno físico real de deterioro en el pavimento.

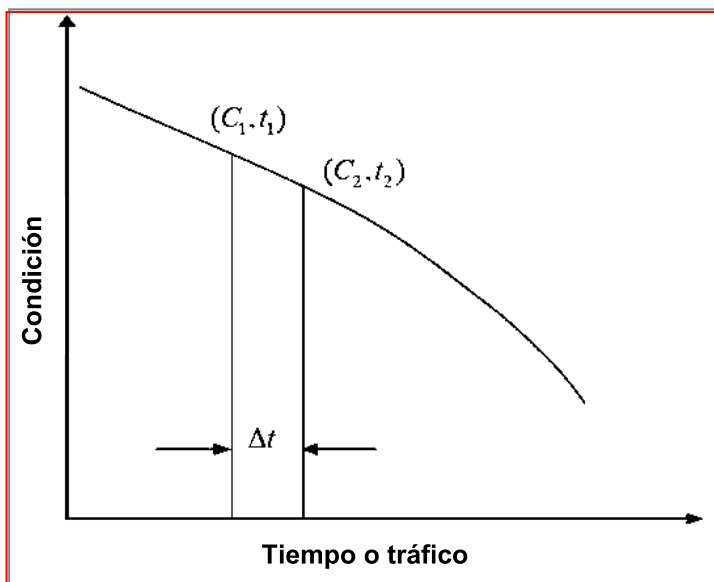
Los conceptos de los modelos incrementales se ilustran en la figura 2.4. En el tiempo  $t_1$ , el estado del pavimento es  $C_1$  y el interés de los ingenieros es conocer el estado del pavimento  $C_2$  en el tiempo  $t_2$ . Los cambios en la condición del pavimento pueden expresarse fácilmente en términos de un pequeño periodo de tiempo  $\Delta t$ , ya que normalmente se utiliza en la gestión y planificación de pavimentos. El tiempo  $t$  también puede ser representado por el tráfico acumulado. La razón para seleccionar los modelos de tipo incremental o derivado es que estos





## 2. Modelos de predicción de deterioros.

modelos no requieren la información original de la condición del pavimento y se desarrollan con base en el proceso físico de deterioro.



**Figura 2.4.** Ilustración de los modelos incrementales de deterioro (Adaptado de Paterson, 1987).

Aunque estos modelos pueden proporcionar buenos resultados de predicción, considerando los efectos de la heterogeneidad en los conjuntos de datos o las actividades de mantenimiento, los resultados de la predicción determinista se sigue utilizando y por lo tanto no se utilizan para capturar la incertidumbre inherente en el proceso de deterioro del pavimento. En otras palabras, a pesar de los diversos esfuerzos para mejorar la precisión de los modelos deterministas, estos siguen siendo limitados por el hecho que no pueden tomar en cuenta con eficacia la naturaleza estocástica asociada con el desempeño del pavimento dentro de su consideración.

### ▪ **Aplicaciones de los modelos deterministas.**

A continuación se presentan los principales modelos deterministas existentes desarrollados en base a la rugosidad longitudinal, tomando en cuenta la división propuesta por Prozzi (2001), en donde, define los modelos existentes en cuatro grupos principales:

- Modelos lineales basados en datos experimentales.
- Modelos lineales basados en datos de campo.
- Modelos lineales basados en datos de campo y principios mecanicistas.
- Modelos no lineales basados en datos de campo.

Algunos de estos modelos existentes usan índices compuestos para cuantificar la calidad de rodamiento, algunos otros usan índices que miden directamente la irregularidad del pavimento, como el QI ó IRI.

Tomando en cuenta la división propuesta por Prozzi (2001), un modelo lineal basado en datos experimentales fue desarrollado en las pistas experimentales de AASHO en Illinois (HRB, 1962), entre 1959 a 1960. Sin embargo, los modelos obtenidos a través de estas pistas y otros estudios realizados en condiciones similares, generalmente no son directamente aplicables a otros pavimentos de otras áreas, debido principalmente a las diferencias de los espectros de cargas de tráfico, los materiales de los pavimentos y la subrasante, la metodología y el control de la construcción y el clima.



El modelo desarrollado por Queiroz (1983) representa un ejemplo de los modelos lineales basados en datos de campo y principios mecanicistas. En su investigación, 63 secciones de pavimento fueron modeladas por medio de la teoría elástica-lineal multi-capas. Las respuestas calculadas utilizadas en el desarrollo de los modelos fueron las deflexiones de superficie, esfuerzo-deformación de tensión horizontal y energía de deformación en la parte inferior de las capas asfálticas superficiales, además de la deformación vertical de compresión en la parte superior del material de subrasante.

Varios modelos fueron desarrollados para relacionar las respuestas simuladas a las condiciones del pavimento observadas en términos de rugosidad. El análisis de regresión se utilizó para determinar las ecuaciones de predicción. La ecuación especificada para la predicción de la rugosidad es la siguiente:

$$\log(QI_t) = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 ST + \beta_3 D_1 + \beta_4 SEN \log N_t \quad 2.2$$

Donde:

- $QI_t$  = rugosidad al tiempo t, medida con el Índice de Cuarto de Carro counts/km
- $T$  = edad del pavimento en años
- $ST$  = variable de error (0 para superficie original y 1 para sobrecarpetas)
- $D_1$  = espesor de la capa asfáltica
- $SEN$  = energía de deformación en la parte inferior de la capa asfáltica
- $N_t$  = cargas acumuladas de un eje sencillo hasta el tiempo t y
- $B_0-B_4$  = parámetros de regresión

Este estudio representa uno de los primeros intentos de incorporar los principios mecanicistas en el análisis del desempeño del pavimento. La energía de deformación en la parte inferior de la capa asfáltica se calcula mediante un modelo basado en la teoría elástica-lineal multi-capas. Sin embargo, el estudio no tiene en cuenta la incertidumbre que se introduce en el procedimiento utilizando un modelo elástico-lineal multi-capas para calcular la respuesta del pavimento. Esta incertidumbre no se incorpora en el modelo final de forma que el modelo produce estimaciones deterministas.

Hodges ed. al. (1975), presentan ejemplos de modelos lineales, modelos RTIM2 ((*Road Transport Investment Model*), basados en datos de campo de un estudio realizado en Kenia entre 1971 y 1974 por el TRRL (Transport and Road Research Laboratory). De este estudio, se originan las relaciones empíricas de deterioros utilizadas para actualizar los modelos de la AASHO y establecer relaciones entre calidad de rodamiento (irregularidad), resistencia del pavimento y tráfico actual. En lugar de utilizar el servicio como medida de la calidad de rodamiento, fueron usadas medidas reales de irregularidades en términos de IRI.

El modelo desarrollado presenta dos problemas. En primer lugar, el 80 % de las muestras del pavimento eran de bases tratadas con cemento y en segundo lugar, se asumió el mismo valor inicial de irregularidad para todos los tipos de pavimento.

Muchas agencias de carreteras utilizan un análisis de regresión para desarrollar modelos de previsión de desempeño basados en las bases de datos disponibles en sus sistemas de gestión de pavimentos. Way y Eisenberg (1980) analizaron datos de diez años de monitoreo de la irregularidad de 51 pavimentos en el estado de Arizona y desarrollaron un modelo que relaciona la progresión de la irregularidad solamente a los factores ambientales. Según Paterson (1987), por no incluir datos de resistencia o de carga, la ecuación es adecuada para previsiones en nivel de red en la gestión de pavimentos, direccionados solamente para aplicaciones locales y es inadecuada para evaluaciones técnicas y económicas debido a las interacciones de los factores estructurales y ambientales de la irregularidad. La tasa media de la irregularidad



## 2. Modelos de predicción de deterioros.

---

encontrada en el estudio fue de 2 a 8 % anual, muy baja si es comparada con otros estudios (Cheetham y Christison, 1981 – *después* Paterson, 1987; Lucas y Viano, 1979).

Lytton et al., (1982), en un estudio efectuado de datos recolectados en el estado de Texas propusieron un modelo modificado en función del AASHO, donde verificarían que el servicio es una función no lineal de la irregularidad. La falla de este modelo y los de la AASHO y RTIM2 es que correlacionan la irregularidad solamente a los factores primarios, siendo que la asociación mecanicista entre irregularidad y otros tipos de defectos (agrietamientos, roderas y desprendimientos) también causan cambios en la irregularidad. La aceleración de la progresión que se produce cerca del final de la vida útil del pavimento, debido a estos efectos, estaba muchas veces implícita en estos modelos, sin embargo, no como una función explícita.

Karan et al., (1983) desarrollaron un modelo con datos correspondientes a 25 años de observaciones de calidad de rodamiento, defectos superficiales y deflexiones de pavimentos de Alberta (Canadá). Variables como el tráfico, clima y el tipo de suelo de la subrasante, también fueron consideradas en el modelo, sin embargo, solamente la edad del pavimento y el Índice de Confort de Rodamiento (ICR) fueron estadísticamente significantes. Según Prozzi (2001), este modelo es un ejemplo de ajuste estadístico, donde las variables explicativas fueron seleccionadas en función de sus significancias estadísticas, sin llevar en consideración las causas físicas del proceso de deterioro.

Paterson (1987), en un estudio para el Banco Mundial, presento ejemplos de modelos no lineales basados en datos de campo que comparados a los modelos anteriormente descritos, difieren por la complejidad, precisión y aplicabilidad. Las relaciones desarrolladas fueron basadas en fenómenos físicos reales de la irregularidad.

El enfoque fue un ejemplo de un método empírico aumentado por los principios mecanicistas. La metodología fue fundamentalmente empírica, ya que desarrolla modelos paramétricos de datos recolectados de vías en servicio con características de tráfico y estructuras diferentes. Sin embargo, la forma y los parámetros del modelo, siempre que sea posible, se basaron en la teoría mecanicista con el fin de garantizar una estimación adecuada de los efectos marginales. Las formas fueron generalmente incrementales, previendo el cambio en las condiciones a través de periodos incrementales de tiempo, como funciones de las condiciones actuales y de los factores de tráfico, estructurales y ambientales.

La medición física de la irregularidad longitudinal fue el foco principal de la investigación debido a su importancia económica. Por lo tanto, todos los estudios empíricos y los experimentos internacionales efectuados posteriormente (Sayers et al., 1986b) dedicaron gran atención a las medidas de la irregularidad longitudinal.

### 2.4.2.2. Modelos probabilistas.

Según la clasificación dada por Lytton (1987), los modelos probabilísticos son divididos en modelos de curvas de supervivencia, cadenas de Markov y cadenas de semi-Markov.

**Cadenas de supervivencia.** Se representan por medio de una curva en un gráfico de probabilidad versus tiempo, como se muestra en la figura 2.5. La probabilidad declina con el tiempo (o con el tráfico) a partir de un valor igual a 1 y expresa el porcentaje de los pavimentos que permanecen en servicio después de un número de años (o pasadas de carga de patrón), sin la necesidad de rehabilitación. A través de la declinación de la curva se determina la curva de densidad de probabilidad. La elaboración de la curva es efectuada a partir de datos históricos con la determinación de porcentajes de pavimento que deben de ser restaurados en cada año después de la construcción o última intervención.



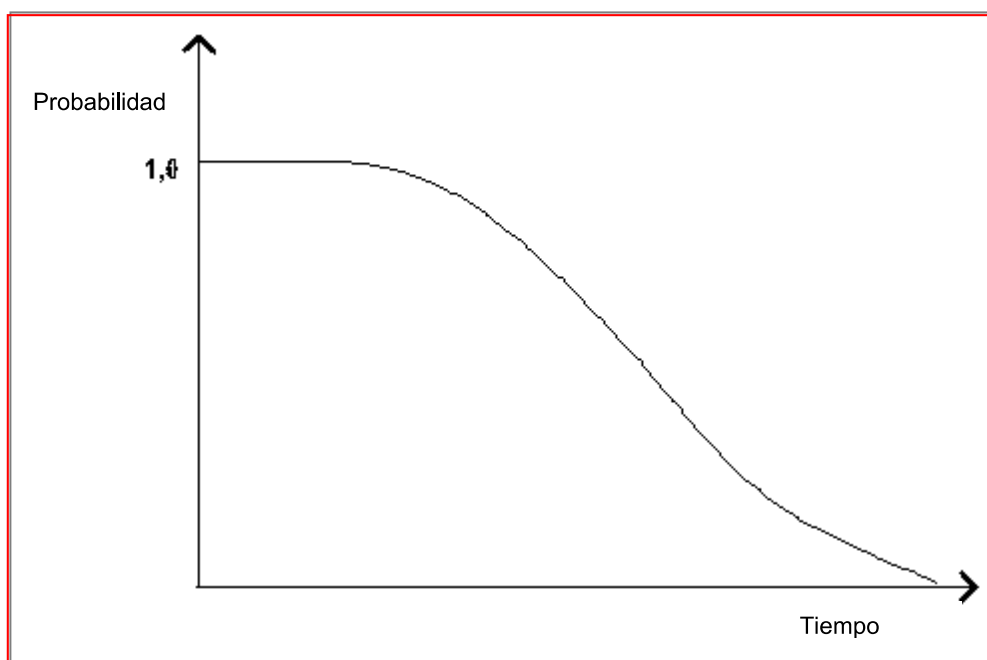
**Cadena de Markov.** Usan matrices que expresan la probabilidad de un grupo de pavimentos, de la misma edad y/o nivel de tráfico, para pasar de un estado de deterioro o índice compuesto, a otro estado en un tiempo específico. El uso de la matriz de transición de Markov sugiere que algunas hipótesis sean validas (por ejemplo, los procesos de transición son homogéneos).

El proceso de Markov describe una probabilidad de condición “antes” y “después” del pavimento. La condición “antes” es descrita por la probabilidad de que un pavimento se encontrará en cada uno de los estados previstos. La condición “después” es descrita de una forma similar, sin embargo, la probabilidad se mueve para un estado de condición inferior.

La matriz de transición puede ser construida para cualquier condición de deterioro y si las hipótesis fueran validas, puede ser usada para simular el desempeño de una red de pavimentos similares con iguales condiciones climáticas y padrones de tráfico.

Según Madanat et al., (1995), las transiciones que ocurren entre las condiciones son probabilísticas por naturaleza, ya que el deterioro de la infraestructura no puede ser previsto con absoluta certeza debido a variables explicativas no observadas, la presencia de errores de medición y la estocasticidad inherente de los procesos de deterioro.

Para Butt et al., (1987), se sabe que la tasa de deterioro es incierta. Por lo tanto, el modelo de predicción debería de describir esta incerteza en vez de usar hipótesis erróneas de comportamiento determinístico.



**Figura 2.5.** Curva de supervivencia (Adaptado de Lytton, 1987).

Según Carnahan et al., (1987), el proceso de Markov se ha mostrado superior a los métodos de ajuste de curvas por introducir una estructura racional en la interpretación de los datos de las condiciones de las estructuras. Por otra parte, puede ser utilizado para predecir las condiciones futuras de una forma probabilística.



## 2. Modelos de predicción de deterioros.

---

**Cadenas de Semi-Markov.** Son similares a las anteriores, excepto que se supone que el proceso es solamente estacionario o homogéneo durante una parte incremental del tiempo. Esta hipótesis es más realista, porque reconoce que las condiciones del pavimento, los cambios climáticos y las condiciones del tráfico afectan a los procesos de transición.

Para Haas et al., (1994), existen ventajas de usar modelos probabilísticos, la calibración local puede ser efectuada con auxilio de la experiencia personal de los profesionales del área y las curvas de desempeño pueden ser desarrolladas sin la necesidad de datos históricos. Después de la implementación del sistema de gestión, es posible calibrar los modelos con datos de campo. Sin embargo, el enfoque probabilístico requiere el desarrollo de matrices de transición para cada combinación de factores que afectan el desempeño del pavimento, lo que dificulta la inclusión de la historia del pavimento en los modelos, ya que la predicción del estado futuro se basa solamente en el estado presente del pavimento.

Los principios de aplicabilidad de los modelos probabilístico para predecir el deterioro del pavimento fueron intensamente discutidos en los principios de los años 70, por Darter y Hudson (1973) y Hudson (1975) (después Li *et al.*, 1997). En estos estudios, fueron desarrolladas relaciones cuantitativas entre confiabilidad y elementos básicos (probabilidad, desempeño, tiempo y medio ambiente) involucrados en el proyecto de un pavimento, con base en las investigaciones y los análisis estadísticos de todos los tipos de variaciones entre los valores de proyecto y los valores actuales.

Kulkarni (1984) presenta un estudio sobre las ventajas del uso de procesos probabilistas de decisión de Markov en la gestión de pavimentos. Sin embargo, el mayor desafío en cuanto a modelos probabilísticos es el establecimiento de las matrices de transición de probabilidad. Li *et al.*, (1997) propone dos métodos para la construcción de las matrices de transición.

Madanat *et al.*, (1995) presentaron un método para estimar las probabilidades de transición de Markov llamado “Método de Valor Esperado”. La metodología, que consiste en tres etapas es utilizada con un conjunto de datos observados con el tiempo fue empleada en varios estudios (Carnahan et al., 1987; Butt *et al.*, 1987; Silva et al., 2000). Después de estudios sobre ventajas y desventajas del método, otros clasificados como econométricos han surgido como soluciones a las limitaciones.

### ▪ **Aplicaciones de los modelos probabilistas.**

La literatura actual ha presentado los modelos probabilistas en virtud de diversos métodos estadísticos. En esta sección se presentan algunos ejemplos de la utilización de los procesos de Markov, homogéneo y no homogéneo, en el modelado de la predicción del desempeño de las estructuras del pavimento.

Carnahan *et al.*, (1987) desarrollaron un procedimiento para ser usado en las tomas de decisiones de mantenimiento para un sistema de gestión de pavimentos. En este estudio usaron un modelo basado en el proceso de Markov homogéneo para modelar el deterioro de los pavimentos. El modelo utiliza el concepto de ciclo obligatorio o duty-cycle, definido como los efectos de un año de exposición de la estructura a los efectos de las intemperies y del tráfico.

El estado de los pavimentos fue clasificado en términos del Índice de Condición del Pavimento (PCI), el cual varía de 0 a 100, siendo 100 la mejor condición del pavimento. Los estados fueron divididos en ocho intervalos de PCI, similar al modelo original de Markov para deterioros de pavimentos, desarrollado por Keane y Keane (1985) y también sugerido en software PAVER (Shahin y Kohn, 1981, después Carnahan *et al.*, 1987).





Fue usada la hipótesis básica de Markov o disminución del PCI, para el final de un ciclo obligatorio, el cual debe depender de una manera probabilística, solamente para el PCI del inicio del ciclo y el del ciclo obligatorio en sí, más es independiente de cómo los defectos se fueran acumulando después del inicio de tal ciclo (pasado). A pesar de ser una hipótesis razonable, existen varios métodos que transforman procesos que aparentemente no son Markov, en procesos de Markov, como por ejemplo, el método dado por Cox y Miller (1965) (después Carnahan *et al.*, 1987) que sugiere la modificación de vector de estado.

Para encontrar una matriz de probabilidad de transición que reflejase los datos disponibles de PCI versus la edad, los autores también siguieron un enfoque similar al presentado por Madanat *et al.*, (1995) (Método de Valor Esperado).

Butt *et al.*, (1987) también desarrollaron modelos de predicción de desempeño de pavimentos, basados en el PCI y la edad, usando el proceso de Markov, pero con una combinación de un proceso homogéneo con uno no homogéneo.

Para modelar los cambios en las cargas de tráfico y las diferentes políticas de mantenimiento en el ciclo de vida del pavimento, fueron introducidos varios ciclos obligatorios en los modelos de predicción. Lo ideal sería un ciclo diferente para cada uno de los análisis, sin embargo, en el inicio de cada año, existía un número limitado de datos de PCI. La solución presentada por Butt *et al.*, (1987) fue dividir la vida de los pavimento en zonas, donde una zona representa un periodo de seis años. Así, para cada zona, la tasa de deterioro es constante (ciclo obligatorio constante), usando en la modelación una cadena de Markov homogénea por zona. Los autores admiten la variación de la tasa de deterioro entre una zona y otra, con diferentes ciclos obligatorios entre ellas, como las cadenas no homogéneas de Markov para modelar las zonas de transición de unas zonas a otras.

El procedimiento adoptado se muestra más realista en la modelación del desempeño, ya que se sabe que las condiciones del pavimento y del tráfico alteran los procesos de transición. Este mismo modelos también fue usado por Jiang *et al.*, (1988), pero en la construcción de modelos de predicción de desempeño de puentes.

Li *et al.*, (1996) presentaron un ejemplo de transición no homogéneo para establecer las matrices de probabilidad de transición para el deterioro de pavimentos. El deterioro, medido por el índice de Estado de Condición del Pavimento (PCS por las siglas *Pavement Condition State*) fue modelado como un proceso de Markov dinámico dependiente del tiempo y cada elemento de la matriz fue determinado a través de una probabilidad basada en un modelo de confiabilidad.

El tráfico fue considerado el principal factor asociado al deterioro de los pavimento, por lo que, el análisis de confiabilidad del índice PCS para cada etapa (o años) se realizó por la comparación con un número de repeticiones equivalentes o eje estándar de 80 kN (N) que la estructura soportará antes de que sus condiciones cambien de su estado inicial para un nivel definido con un tráfico actual previsto anual ( $N_t$ ).

Como la variación de cada elemento en la matriz de transición de probabilidad afecta los valores previstos de la condición futura del pavimento, los autores ejecutaron un análisis de sensibilidad para investigar la variación de la matriz de transición con otros parámetros del proyecto, como la tasa de crecimiento de tráfico, la resistencia de la subrasante y las propiedades de los materiales.





## 2. Modelos de predicción de deterioros.

---

Según Li *et al.*, (2001), una de las ventajas de esta metodología probabilística de transición de Markov descrita en los ejemplos anteriores, sufre algunas limitaciones:

- No captura la verdadera estructura del proceso de deterioro, donde las condiciones cambian de un punto en el tiempo a otro, durante un periodo de inspección, las cuales no fueron explícitamente modeladas. Esta limitación ha creado la necesidad de segmentar el pavimento en secciones homogéneas en función de las variables explicativas. La falta de la estructura también no revela la naturaleza no estacionaria inherente, haciendo necesaria la segmentación de las observaciones en grupos de varios intervalos de edades diferentes. La segmentación parece no ser realista. Además de los problemas conceptuales asociados a la falta de estructuración, la segmentación dio como resultado muestras pequeñas restringiendo el número de parámetros que podían ser estimados. Esto impuso una estructura artificial para la matriz de transición con el fin de fijar algunas probabilidades a cero.
- El enfoque no reconoce el carácter latente del deterioro. El deterioro es un proceso no observable que se manifiesta a través de defectos de superficie y de la subrasante. Por lo tanto, no es directamente medible, sino por sus indicadores.
- El uso de la regresión lineal, como muestran los ejemplos dados por Carnahan *et al.*, (1987) y Jiang *et al.*, (1988), no fueron apropiados.

El método de regresión lineal para estimar las probabilidades de transición no es recomendable para capturar la estructura del proceso de deterioro por varios motivos, como:

- Las diferencias ocurridas en las condiciones de estado no monitoreadas no son explícitamente modeladas en función de las variables explicativas. La segmentación de los datos resulta en muestras pequeñas dentro de cada segmento, lo cual limita el número de parámetros a ser estimados. Como resultado algunas probabilidades de la matriz de transición son arbitrariamente establecidas como cero.
- El proceso no estacionario (es decir, dependencia del tiempo) solo es capturado indirectamente a través de la segmentación ad hoc del tiempo.
- La presencia de niveles de deterioro de las capas subyacentes no es reconocida.

El enfoque permite modelar el deterioro a través de un proceso continuo de Markov. En este proceso, el deterioro en el momento del levantamiento es independiente de los procesos de deterioro anteriores. A menudo, la hipótesis de Markov se hace sin ningún tipo de verificación, resultando en modelos de calidad cuestionable.

En respuesta a las limitaciones del método en los modelos mencionados, el Método de los Valores Esperados, es una clase estructurada de métodos econométricos como la regresión y la relación de Poisson "Probit orderer", se han utilizado para estimar los parámetros del modelo y calcular las probabilidades de transición (Madanat e Ibrahim, 1995, Madanat *et al.*, 1995, Madanat *et al.*, 1997). Por lo tanto, estos métodos también presentan limitaciones. La más crítica es la hipótesis de que las condiciones de estado observadas son independientes e idénticamente distribuidas (lo cual también aplica en el método de Valores Esperados). La hipótesis no es válida, pues todas las observaciones efectuadas entre las transiciones de estado consecutivas son iguales a las otras, por lo tanto, están determinísticamente relacionadas. Otra limitación está en la inconsistencia entre la naturaleza acumulativa del nivel de deterioro asumido y la naturaleza no acumulativa de las variables explicativas usadas. Esta inconsistencia surge debido a los eventos censurados (no observados), en donde las condiciones iniciales no están disponibles por falta de monitoreo en las construcciones y de levantamientos en tiempos discontinuos.



Mauch y Madanat (2001) dividieron los modelos probabilísticos para predecir el deterioro en dos grupos, los modelos basados en estados y los modelos basados en el tiempo. Los primeros modelos predicen la probabilidad de una estructura sometida a cambios en el estado de la condición en un tiempo dado, las condiciones de algunas variables explicativas, tales como el tráfico, los factores ambientales y el historial de mantenimiento. Ejemplos típicos de estos modelos son los procesos de Markov y semi-Markov.

Por otro lado, el modelo basado en el tiempo predice la distribución de probabilidad del tiempo empleado por una estructura de variar su condición de estado que se caracteriza por la función de densidad de probabilidad del tiempo, también está sujeto a las variables explicativas. Este modelo fue usado por Paterson y Cheser (1986) para predecir el momento de inicio de agrietamientos y Prozzi y Madanat (2000) para predecir el número de repeticiones de carga por eje necesarias para reducir el servicio por debajo del nivel de aceptabilidad.

Aunque los dos tipos de modelos se basaron en dos técnicas econométricas diferentes, tienen algunas similitudes. Es posible utilizar el enfoque de un tipo de modelo para predecir la variable dependiente de otro, o más específicamente, la probabilidad de transición de la condición de estado puede ser determinada a partir de la función densidad de probabilidad de duración de estado y viceversa. La relación entre los dos modelos probabilísticos es parecida, como la relación entre el proceso de Poisson y la distribución exponencial. El modelo basado en el estado proporciona la probabilidad de  $N$  eventos en un periodo de tiempo fijo, mientras que, el modelo basado en el tiempo proporciona la densidad de probabilidad de tiempo entre las transiciones de una condición de estado. La decisión de cual enfoque debe de ser utilizado debe de ser basada en consideraciones empíricas. Por ejemplo, la naturaleza de los datos disponibles para la modelación favorece un enfoque en relación a otro. Si las observaciones de campo son continuas a lo largo del tiempo, entonces debe de optarse por lo modelos basados en el tiempo. Por otro lado, si los levantamientos son efectuados con poca frecuencia o si los datos disponibles son relativos a un pequeño espacio de tiempo, la mejor modelación se basa en el estado.



## Capítulo 3.

# Indicadores de desempeño del pavimento.

### 3.1. Introducción

En las últimas tres décadas, las agencias de carreteras y los investigadores han dedicado un considerable tiempo y esfuerzo en desarrollar procedimientos de pruebas para campo bien establecidos aplicados a la evaluación de pavimentos y la toma de decisiones que incluyen todos los factores que afectan el desempeño del pavimento.

Los pavimentos deben de proporcionar a los usuarios un servicio cómodo, seguro y eficiente, además deben de poseer la suficiente capacidad estructural para soportar el efecto combinado de las cargas del tráfico y las condiciones ambientales (Solminihaç, 2001).

Para determinar como un pavimento se desempeña en un punto determinado en el tiempo y predecir cómo se comportará en el futuro, debe de hacerse un monitoreo periódico para determinar si sus tres funciones básicas (proveer un servicio cómodo, seguro y eficiente) se están cumpliendo.

La valoración cuantitativa del estado que guarda la superficie de rodamiento se obtiene a través de indicadores, resultado de inspecciones o auscultaciones. Estos datos, obtenidos de manera cuantitativa, apoyarán las decisiones o alimentarán los sistemas de gestión de pavimentos.

El desempeño del pavimento representa el deterioro con el tiempo bajo las cargas existentes del tráfico y el medio ambiente. Es controlado por muchos parámetros o medidas llamadas indicadores de condición o desempeño. Estos indicadores describen el desempeño funcional y estructural del pavimento.

El origen de todo indicador es una correlación entre una medición mecánica y un estado del pavimento al que se le asigna un calificativo y se establece un valor límite aceptable. Dentro de la acción de un “Indicador de Desempeño” para un pavimento se toma como un valor derivado para representar una característica técnica, que indica la condición del mismo (por ejemplo rugosidad, resistencia al deslizamiento, etc.) Un indicador de desempeño puede ser definido en forma de parámetros técnicos (dimensional) y/o en índices adimensionales (COST Action 354).



El alcance de la auscultación de pavimentos es por lo tanto crear una base de datos con características que describan su desempeño a través de varios indicadores.

Una evaluación de la condición es el proceso de recolección de datos para determinar la integridad estructural, la resistencia al deslizamiento y la calidad general de la conducción del pavimento. Tradicionalmente, el personal de mantenimiento o de ingeniería se basó en la experiencia y las inspecciones visuales para programar las acciones de mantenimiento. Los problemas con esta técnica son que la experiencia es difícil de transferir de una persona a otra y las decisiones tomadas a partir de datos similares a menudo varían considerablemente. Las evaluaciones de la condición proporcionan un método racional y coherente para la asignación de recursos limitados.

Dependiendo de cuales características sean inspeccionadas, la auscultación de los pavimentos puede ser clasificada en funcional o estructural.

- **Evaluación funcional.** Este tipo de evaluación proporciona información acerca de las características de superficie las cuales afectan directamente a la seguridad y confort del usuario o funcionalidad. Las principales características inspeccionadas en la auscultación funcional son resistencia al deslizamiento y textura de la superficie en términos de seguridad, así como la rugosidad en términos de serviciabilidad.
- **Evaluación estructural.** Proporciona información sobre si la estructura del pavimento se desempeña satisfactoriamente bajo las cargas del tráfico y las condiciones ambientales. Las características inspeccionadas pueden ser relacionadas con el desempeño estructural, deterioros de pavimentos y propiedades mecánicas/estructurales. Es importante mencionar que varios deterioros del pavimento indirectamente conducen a problemas funcionales como son el exudamiento en los pavimentos asfálticos, los cuales afectan la resistencia al deslizamiento, o los defectos en las juntas en los pavimentos de concreto hidráulico, que afectan la rugosidad.

## 3.2. Principales características comúnmente evaluadas

Las características claves de un pavimento consideradas en una auscultación son:

- Rugosidad.
- Textura.
- Resistencia al deslizamiento.
- Propiedades estructurales.
- Deterioros superficiales.

Estas características son medidas en campo a través de evaluaciones manuales o usando equipos especializados y son cuantificadas por medio de indicadores o índices de condición.

Existe una amplia variedad de equipos de auscultación disponibles para medir las características del pavimento. Debido a que diferentes tipos de equipos requieren diferentes metodologías para evaluar las características del pavimento, es necesario contar con indicadores para cuantificar una característica determinada. Se han desarrollado ecuaciones de correlación e indicadores internacionales para estandarizar algunos atributos, de forma que las mediciones con distintos equipos y tecnologías, a veces puedan ser comparables.



### 3. Indicadores de condición del pavimento.

En la tabla 3.1 se presenta un esquema que correlaciona las funciones de los pavimentos con sus características para cada tipo de evaluación (Crespo del Río, 1991). También se incluyen ejemplos de los indicadores e índices para cada característica del pavimento.

**Tabla 3.1.** Funciones y características de los pavimentos por tipo de evaluación.

| Tipo de evaluación     | Función del Pavimento | Características del pavimento | Ejemplos de Indicadores                                         |
|------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Evaluación funcional   | Nivel de Servicio     | Rugosidad                     | IRI, PSI, QI                                                    |
|                        | Seguridad             | Textura                       | Macrotextura, Microtextura                                      |
|                        |                       | Resistencia al deslizamiento  | Coefficiente de resistencia al deslizamiento, IFI               |
| Evaluación estructural | Capacidad estructural | Propiedades Estructurales     | Deflexiones                                                     |
|                        |                       | Deterioros en el pavimento    | Agrietamientos, Defectos superficiales, Deformaciones de perfil |

#### 3.2.1. Rugosidad

La rugosidad del pavimento es definida como “las desviaciones de la superficie del pavimento con respecto a una superficie plana con ciertas dimensiones características que afectan la dinámica de los vehículos y la calidad de conducción” (ASTM E867-87), la rugosidad está principalmente asociada con la funcionalidad, sin embargo, la rugosidad se relaciona también con las deficiencias estructurales y el deterioro acelerado de los pavimentos.

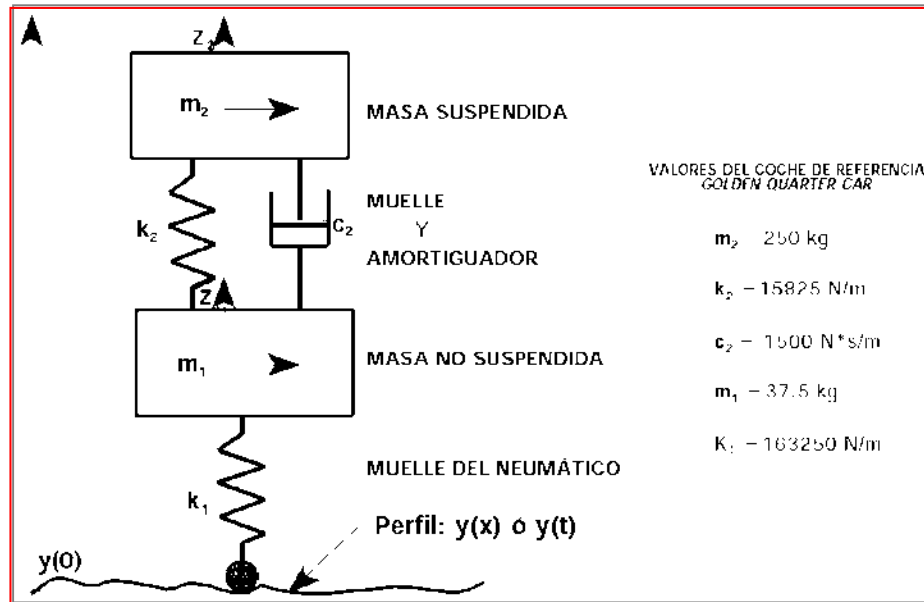
La rugosidad tiene un efecto significativo en los costos de operación de los vehículos, la seguridad, la comodidad y la rapidez de los viajes. Varios estudios han demostrado que la rugosidad es el criterio por el cual los usuarios juzgan el desempeño del pavimento y por lo tanto la condición de un sistema de carreteras (Budras, 2001)

Durante décadas, la rugosidad se ha medido recorriendo la carretera con un vehículo provisto de una rueda de medida. El equipo del departamento de Carreteras de U.S.A (BPR por las siglas Bureau of Public Roads) desarrolló esta idea en 1941, en un equipo llamado "Rugosímetro" que fue el primer intento de normalización de un vehículo de medida. El "Rugosímetro" consta esencialmente de una rueda de coche con un muelle y un amortiguador asociados (modelo de un cuarto de coche). El desplazamiento del neumático respecto a la llanta se registra como el movimiento vertical y es acumulado por un integrador. El índice de regularidad establecido fue la sumatoria en valor absoluto de los desplazamientos verticales para un intervalo de distancia dividido por la longitud del intervalo.

Algunas de las simulaciones de vehículos se conocen como modelos de "cuarto de coche" porque representan solo un cuarto del vehículo (aparentemente el neumático izquierdo del eje trasero). Se usa un sistema simplificado que consta de una masa suspendida (la masa de un cuarto de un coche "ideal"), conectada a una masa "no suspendida" (el eje y el neumático) a través un muelle y un amortiguador lineal (la suspensión); el neumático se representa como otro



muelle lineal. Las ecuaciones dinámicas de estos elementos forman un sistema de ecuaciones que utilizan como dato de entrada el perfil de la carretera (en la parte inferior del "muelle del neumático"). El movimiento vertical del eje respecto a la masa suspendida se calcula y acumula. El valor en m/km (metros verticales acumulados por la suspensión por kilómetro viajado) es la medida final de la regularidad. La figura 3.1 muestra una descripción esquemática de un modelo de cuarto de coche con los valores numéricos normalizados para obtener el IRI.



**Figura 3.1.** Modelo de cuarto de coche (fuente: Crespo del Rio, 1997).

El sistema de la figura es un sencillo modelo dinámico de dos grados de libertad (los desplazamientos  $z_1$  y  $z_2$  de las masas que representan el vehículo). El sistema dinámico está excitado por una "fuerza" exterior que es el "perfil de la carretera". Las ecuaciones del sistema son las siguientes:

$$m_2 \ddot{z}_2 + c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_2 (z_2 - z_1) = 0 \quad 3.1$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + m_1 \ddot{z}_1 + k_1 z_1 = k_1 y \quad 3.2$$

La resolución numérica de las ecuaciones diferenciales anteriores permite conocer el desplazamiento  $|z_2 - z_1|$  vertical de la masa superior respecto a la masa inferior (que es el mismo que el movimiento del usuario respecto a la carretera). Acumulando ese desplazamiento y dividiéndolo por la distancia horizontal recorrida se obtiene el IRI, si se aplican las condiciones que se señalan en el párrafo siguiente.

Al final de los años 70's, formando parte del programa de investigación "National Cooperative Highway Research Program" NCHRP en U.S.A, se estableció un método de calibración de los equipos de medida mediante un modelo de cuarto de coche de referencia estandarizado (Golden Quarter Car). Cuando se usan parámetros normalizados para el vehículo, las únicas variables que quedan son (a) la elección de la velocidad de vehículo y (b) si la simulación se genera del perfil de la carretera en una o en ambas de las huellas de las ruedas. El índice normalizado usa una velocidad de 80 km/h para una única trayectoria de rueda. El desplazamiento acumulado dividido por la distancia recorrida del cuarto de coche normalizado a 80 km/h define el **INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL, IRI**. Actualmente, este método de calcular el índice de regularidad mediante un modelo de cuarto de coche ha sido adoptado en todo el mundo.



### 3. Indicadores de condición del pavimento.

La escala y características involucradas en el IRI son las siguientes:

- Las unidades están en mm/m, m/km o in/mi
- El rango de la escala del IRI para un camino pavimentado es de 0 a 12 m/km. (0 a 760 in/mi), donde 0 es una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable. En la figura 3.2 se presentan las características de los pavimentos dependiendo del valor del IRI, según las experiencias recogidas por el Banco Mundial en diversos países.
- Para una superficie con pendiente constante sin deformaciones (plano inclinado perfecto), el IRI es igual a cero. Por lo que la pendiente, como tal, no influye en el valor del IRI, no así los cambios de pendiente.

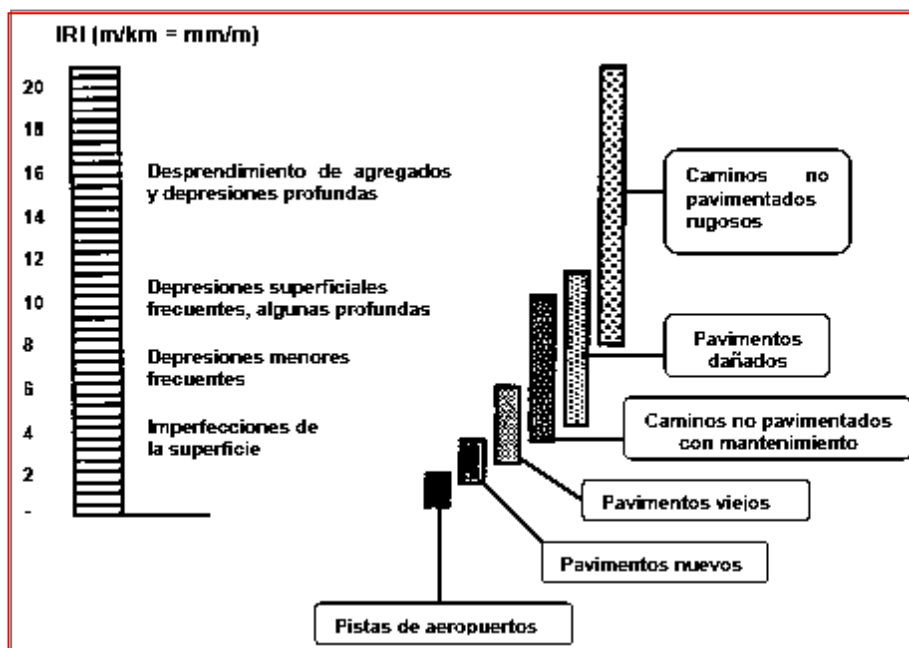


Figura 3.2. Escala de los valores de IRI y las características de los pavimentos (fuente: Aguerrebere y Cepeda, 1991).

#### 3.2.2. Textura

La textura del pavimento es principalmente asociada con las condiciones de seguridad, confort del usuario y con el ruido asociado a los neumáticos. En términos de seguridad, la textura afecta directamente la adherencia de los neumáticos con el pavimento en condiciones húmedas y afectan indirectamente a la resistencia al deslizamiento. La textura es también asociada con las emisiones de ruido causadas por el tráfico. Desde una perspectiva de gestión de pavimentos, la profundidad de la textura es importante ya que puede ser controlada con las actividades de mantenimiento e incluso activar las acciones de mantenimiento reactivo.

Se puede definir a la textura como las desviaciones de la superficie del pavimento respecto a una superficie plana menor o igual a 0.5 metros. La textura se subdivide en Microtextura, Macrotextura y Megatextura (PIARC, 1987). Esta subdivisión se muestra en la figura 3.3.

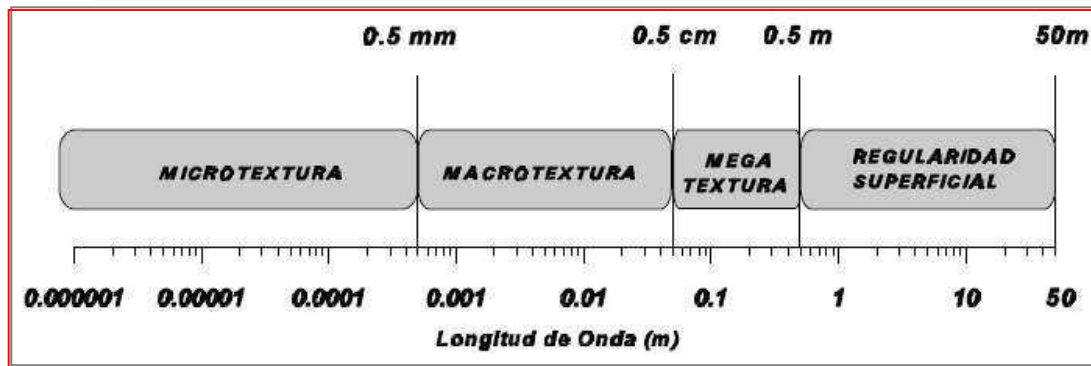


Figura 3.3. Clasificación del perfil según la AIPCR (fuente: PIARC, 1987).

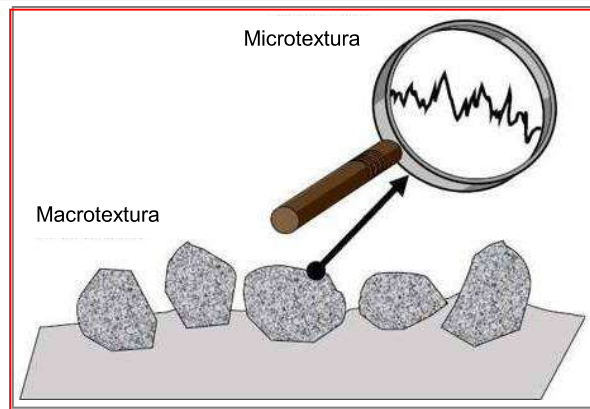
La **microtextura** es la característica global que comprende las longitudes de ondas más pequeñas. Se puede definir como la irregularidad superficial de los componentes individuales de la superficie de la carretera, por ejemplo los agregados utilizados en la capa de rodadura. Así por ejemplo, un alto grado de pulimento de los agregados en las superficies de las carreteras produce valores bajos de microtextura. Las irregularidades agudas en las partículas de los agregados superficiales (ó en el mortero asfáltico o de cemento que une estas partículas) proporcionan valores de amplitud elevados para las longitudes de ondas muy cortas.

La microtextura se considera particularmente importante en la valoración de la resistencia al deslizamiento (fricción) de la superficie; un exceso de pulimento en los agregados disminuye la fricción en la superficie. Una forma indirecta de medir la microtextura es determinando el coeficiente de fricción o rozamiento.

La **macrotextura** incluye longitudes de ondas mayores, desde el tamaño del agregado hasta la huella del neumático. Tiene relación con la capacidad vertical y lateral de drenaje y con los agregados de la capa superficial (tamaño de las partículas, orientación, densidad y distribución). La macrotextura influye en muchos aspectos del funcionamiento de la carretera. La medida de la macrotextura permite el control y predicción de muchos de los parámetros relacionados con la carretera, los neumáticos y con el comportamiento de vehículo y del conductor. La figura 3.4 muestra la diferencia entre microtextura y macrotextura.

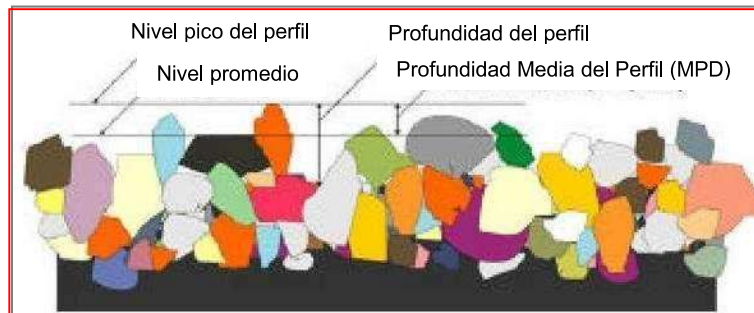
La **megatextura**, ha sido recientemente asociada con la regularidad superficial. El término intenta señalar los aspectos de las características superficiales que se repiten con longitudes de ondas entre medio centímetro y medio metro. Los casos que presentan irregularidades grandes incluidas en estas longitudes de ondas que no tienden a ser repetitivas se señalan como características locales, incluso sobre grandes tramos de pavimentos. Los baches son un ejemplo de megatextura elevada. El neumático podría “rebotar” o “chocar” sobre un parte de la megatextura, lo que significa que se pierde la adhesión momentáneamente en algunas partes de la interfaz neumático/pavimento. La megatextura es una característica de la superficie no deseada, mientras que la microtextura y macrotextura son altamente deseables.

Hasta hace poco, los métodos de prueba más comunes para la determinación de la macrotextura implicaban una labor intensiva y mucho tiempo. Los nuevos desarrollos en perfiles de alta resolución han producido métodos de estimación de profundidad de la macrotextura a velocidades de circulación. Específicamente, la gran potencia de los buscadores laser de tiro rápido, en conjunto con los equipos electrónicos de medición de distancia de alta precisión se ha pretendido (Administración Federal de Carreteras, 1997) que permitan la caracterización de las superficies de los pavimentos en un alto grado de detalle sin interrumpir el tráfico.



**Figura 3.4.** Macrotextura vs Microtextura (fuente: Crow, 2003).

Las mediciones de la macrotextura a alta velocidad se realizan usando sistemas basados en láser. Las mediciones son reportadas en términos de la “Profundidad Media del Perfil” (MPD de las siglas Mean Profile Depth) o como “la profundidad de textura medida con sensor” (SMTD por las siglas Sensor Measured Texture Depth). El cálculo de la MPD se define con la norma ISO/DIS 13477 (ver figura 3.5). Esto requiere de sistemas de muy alto desempeño. El SMTD es mucho más simple de medir, basado en la variación en torno a una línea de regresión ajustando los datos, pero no es tan robusto como la MPD.



**Figura 3.5.** Cálculo de la Profundidad Media del Perfil (fuente: Greenwood Engineering).

McGhee y Flintsch (2003), señalan que la profundidad de la macrotextura se puede considerar en términos de ser “positiva” (tal como la proporcionada por la superficie gruesa del pavimento) o “negativa” (tal como la proporcionada por los huecos creados en el pavimento).

#### 3.2.3. Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento es el parámetro que se emplea para determinar el nivel de adherencia entre el neumático y el pavimento. El valor del coeficiente de fricción depende de una serie de factores, algunos inherentes a la carretera mientras que otros son responsabilidad del usuario (como la velocidad y el estado de los neumáticos del vehículo) o de la naturaleza (lluvia, nieve o hielo sobre la calzada, etc). La demanda de rozamiento es función de la velocidad y de la cantidad de agua sobre la carretera. A su vez la capacidad de responder a esa demanda es función del tipo y del estado del pavimento.



Cenek (2004) ofrece la siguiente descripción de la resistencia al deslizamiento y la relación de la textura superficial con la resistencia al deslizamiento:

Un vehículo se deslizará cuando, al frenar, acelerar o maniobrar, la fricción “demandada” exceda los límites de la fuerza de rozamiento que se pueden generar en el interfaz neumático/pavimento. Por lo tanto, **la resistencia al deslizamiento** (o fricción) puede ser definida como el coeficiente de fricción límite entre el neumático y el pavimento y es el límite de la fuerza de fricción horizontal que se resiste al frenado, conducción y las fuerzas verticales en las curvas que actúan en el neumático debido al peso del vehículo.

La resistencia al deslizamiento proporcionada por una carretera es principalmente una función de su textura superficial. Cuando la microtextura entra en contacto con el neumático, una fuerza de fricción adhesiva (comúnmente conocida como “adherencia”) es generada. En condiciones de lluvia, la microtextura penetra la película de agua que se genera entre el neumático y el pavimento para establecer contacto directo con el neumático en movimiento. La macrotextura facilita el drenaje del agua en la zona de contacto de la llanta con el pavimento.

En condiciones de humedad, la microtextura domina la adherencia a baja velocidad (menos de 70 km/h). Sin embargo, a gran velocidad (superior a 70 km/h), tanto la microtextura y macrotextura están obligados a proporcionar un alto nivel de resistencia al deslizamiento. Esto se debe a que a mayores velocidades, la macrotextura es necesaria para permitir que el agua de la superficie pueda escapar y evite el acuaplaneo parcial o total. Por lo tanto, la macrotextura determina que tan rápido la resistencia al deslizamiento en condiciones húmedas disminuye con la velocidad. Sin embargo, incluso a altas velocidades, la microtextura sigue siendo la de mayor influencia, debido a que un nivel bajo de microtextura siempre dará lugar a una baja resistencia al deslizamiento, independientemente del nivel de macrotextura. Por esta razón y porque la función de drenaje de la macrotextura puede ser complementada con la banda de rodamiento del neumático (que también facilita la expulsión del agua del área de contacto neumático/pavimento), la gestión de la resistencia al deslizamiento de una red carretera tiende a estar dominada por consideraciones de la microtextura.

La resistencia al deslizamiento se mide indirectamente midiendo la resistencia de un neumático de prueba para un pavimento mojado. Dependiendo de la dirección de conducción y el desplazamiento de los equipos sobre el pavimento, se puede determinar una resistencia al deslizamiento transversal o longitudinal. La principal limitación es determinar la forma de combinar y comparar las mediciones con los diferentes dispositivos, ya que existe más de un tipo de coeficientes de resistencia al deslizamiento. Para solucionar esta limitación, la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC), publicó en 1995 los resultados de un experimento que compara y correlaciona la textura y las medidas de la resistencia al deslizamiento. Como resultado, el “Índice de Fricción Internacional” (IFI) fue creado, el cual define una escala de fricción general de referencia asociada a la velocidad del vehículo. Para la determinación de la resistencia al deslizamiento, esta metodología necesita tanto las medidas de la resistencia al deslizamiento y la textura relacionada al tipo de vehículo y velocidad de prueba (PIARC, 1995). Por desgracia, el IFI no ha resultado ser tan ampliamente adoptado como el IRI ya que, como Crow (2003) señala, hay una serie de problemas con la forma en que se calcula el valor y tiene deficiencias ya que no toma en cuenta la macrotextura.

Es importante darse cuenta de que independientemente de que tecnología sea aprobada, los resultados entre sistemas son generalmente comparables. Lo importante es poder identificar las zonas donde la resistencia al deslizamiento es baja comparado con otras zonas en las cuales no hay problemas de resistencia al deslizamiento.

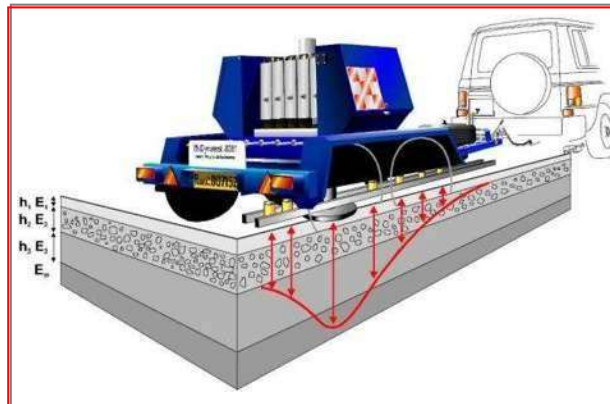


#### 3.2.4. Propiedades estructurales

La capacidad estructural de un pavimento denota la capacidad del pavimento para soportar y prevalecer ante las acciones de las cargas del tráfico. Así, una evaluación estructural debe de evaluar al pavimento en su capacidad general para cumplir satisfactoriamente ante las cargas de tráfico con el mínimo de deformaciones y deterioros (NCHRP, 1994).

La capacidad estructural del pavimento generalmente se determina mediante la evaluación de las propiedades mecánicas de cada capa del pavimento, tales como: módulo elástico, propiedades de fatiga, condiciones de deflexión, entre otros. Los dos métodos más comunes para evaluar estos parámetros son extracción de testigos, donde las muestras son analizadas en laboratorio, o los ensayos no destructivos realizados en campo.

En las últimas tres décadas, las mejoras en la tecnología han provocado que los métodos de ensayos no destructivos (NDT por las siglas non-destructive testing) sean más populares ya que no es necesario perturbar la integridad del material, ni la toma de muestras de la misma. Por otro lado, son bastante fáciles de usar, repetibles y se pueden realizar mucho más rápidamente que las pruebas destructivas. Estas ventajas resultan en general en un costo mucho menor a largo plazo en comparación con los métodos de pruebas destructivas. Contra todas las ventajas, la confiabilidad de los NDT ciertamente depende de la interpretación precisa de los resultados de las pruebas y la determinación precisa de las propiedades de los materiales de las capas de los pavimentos, como la rigidez o módulo de las capas y el espesor. El deflectómetro de impacto (FWD) es el método de prueba NDT más popular para la evaluación de pavimentos. Proporciona deflexiones de superficie del pavimento obtenidas por varios sensores de desplazamiento en respuesta a dejar caer una carga constante desde una distancia específica a una determinada frecuencia. Estas deflexiones se utilizan esencialmente para la evaluación estructural de los pavimentos.



**Figura 3.6.** Esquema de los principios del deflectómetro de impacto.

Las deflexiones dependen principalmente del tipo de pavimento, su estado, temperatura y tipo de carga aplicada. La información más valiosa obtenida de los deflectómetros de impacto es el valor de la deflexión máxima localizada bajo la carga aplicada y la forma de la cuenca de deflexiones. La figura 3.6 muestra el principio de funcionamiento del deflectómetro de impacto. La información de la deflexión es interpretada con la finalidad de determinar las propiedades mecánicas del pavimento.





En el área de la ingeniería de pavimentos, la práctica de la determinación de las propiedades de las capas del pavimento usando deflexiones de superficie comúnmente se conoce con el nombre de retrocálculo. El retrocálculo de las propiedades de las capas incluyendo el módulo y hasta los espesores de las capas desde la medición de las deflexiones de superficie juega un papel importante en la evaluación de pavimentos, diseño de sobrecarpetas y la gestión de los pavimentos en servicio.

#### 3.2.5. Inventario de deterioros

Los deterioros de superficie reflejan el detrimento causado por el tráfico, condiciones ambientales y envejecimiento (AASHTO, 1990). El tipo de deterioro, extensión y severidad son indicadores del desempeño del pavimento, relacionado directamente con la capacidad estructural e indirectamente con las condiciones funcionales.

Las evaluaciones de los deterioros superficiales son generalmente desarrolladas manualmente, aunque los equipos automatizados de inventarios de deterioros se están volviendo cada vez más comunes. Se han hecho esfuerzos importantes para estandarizar las metodologías de recolección de datos y si bien muchos países tienen sus propios manuales de recopilación de datos, no existe un acuerdo general sobre el monitoreo de los deterioros. Lo que diferencia a la forma de que los deterioros son cuantificados (por ejemplo, longitud del deterioro contra el área; área contra número) es la forma en que los resultados son aplicados en el proceso de gestión.

El Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP), desarrollo un manual de identificación de deterioros para el proyecto de Pavimentos de Desempeño a Largo Plazo (LTPP) el cual es de amplio uso, especialmente para realizar el inventario a nivel de proyecto (FHWA, 2003). Sin embargo, no existe una metodología estandarizada para la recolección de datos de deterioros que sea similar a la del IRI, principalmente porque este no es requerido en muchos sistemas de gestión de pavimentos.

Los indicadores valorados en la evaluación de deterioros superficiales son: agrietamientos, defectos superficiales, deformaciones del perfil longitudinal y transversal y diversos defectos del pavimento. Los agrietamientos y los defectos superficiales varían entre los tipos de pavimentos y se miden generalmente como porcentaje de la superficie total inventariada, con unidades lineales o con el número de deterioros. Por las deformaciones de superficie, los más comúnmente observados las roderas en el pavimento asfáltico y el escalonamiento en los pavimentos de concreto hidráulico. Ambos deterioros son medidos respecto a la deformación vertical de la superficie del pavimento con respecto al nivel de referencia del pavimento, aunque de forma diferente.

### 3.3. Técnicas de recolección de datos

Un equipo de recolección de datos debe de garantizar una evaluación de pavimentos confiable, eficiente y segura. Estos equipos pueden ser divididos en tres clases, de acuerdo con el tipo de característica del pavimento que se evalúa: servicio, seguridad y capacidad estructural (Bennett et al., 2007).

Cada categoría de equipo se divide por tipo de acuerdo a la exactitud de los datos recogidos, el tipo de datos recogidos y la metodología utilizada para determinar las características del pavimento. En la tabla 3.2 se presenta un resumen de los equipos por categorías.





### 3. Indicadores de condición del pavimento.

**Tabla 3.2.** Tipos de equipos de medida por clase (adaptado de Bennett, 2007).

| Función               | Clase de equipo              | Tipos de equipos de medición                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nivel de Servicio     | Rugosidad                    | Clase I: Perfiles de precisión <ul style="list-style-type: none"><li>▪ laser</li><li>▪ Manual</li></ul> Clase II: Otros métodos de Perfiles<br>Clase III: IRI estimado de correlaciones<br>Clase IV: Clasificaciones subjetivas |
| Seguridad             | Macrotextura<br>Microtextura | Estática<br>Estática<br>Dinámica                                                                                                                                                                                                |
|                       | Resistencia al deslizamiento | Estática<br>Dinámica                                                                                                                                                                                                            |
| Capacidad estructural | Propiedades Estructurales    | Deflectómetro de impacto<br>Vigas de deflexión<br>Penetrómetro de Cono Dinámico<br>Pruebas de laboratorio                                                                                                                       |
|                       | Deterioros en el pavimento   | Video análisis de deterioros<br>Evaluaciones visuales<br>Perfiles transversales                                                                                                                                                 |

Es más rentable recoger múltiples características del pavimento durante un solo paso del vehículo de recolección de datos. Esto no solo disminuye los costos de la evaluación sino que también asegura que la referencia de los datos sea consistente. Existen dos grandes enfoques para cumplir este objetivo:

- Los sistemas portátiles: este tipo de sistemas se pueden instalar en cualquier vehículo y se han diseñado para ser modular y portátil
- Vehículos especializados: este tipo de vehículos cuentan con los instrumentos instalados de forma permanente

Los sistemas portátiles son adecuados para la mayoría de aplicaciones y son generalmente menos costosos. Los vehículos especializados son necesarios donde instrumentos más sofisticados y grandes volúmenes de información se requieren, por ejemplo la detección de agrietamientos por video.

#### 3.3.1. Rugosidad

Los dispositivos para medir la rugosidad se clasifican según la norma ASTM E 950-94 en cuatro grupos de acuerdo a la precisión y la metodología utilizada para determinar el IRI.

Como se mencionó anteriormente, las mediciones de rugosidad se suelen expresar en términos de IRI m/km. Karamihas (2004), presenta los resultados de un estudio comparativo entre las mediciones de la rugosidad de los diferentes dispositivos en los mismos caminos, además muestra que hay un gran número de diferentes tipos de equipos en el mercado para la medición de la rugosidad.



**Clase I. Perfiles de precisión.** Esta clase es de una alta precisión estándar para los dispositivos de medición de la rugosidad. El perfil se mide como una serie de puntos muy próximos de elevación precisa en la trayectoria de la rueda del vehículo. La distancia entre los puntos tiene que ser corta para alcanzar una alta precisión en describir el perfil de la carretera. Algunas recomendaciones sugieren que esta distancia no debe de ser superior a 0.25 m (Sayers et al., 1986). Los equipos comprendidos en esta clase se pueden dividir en dos grandes grupos, los de uso de tecnología láser y los operados manualmente.

**Clase II. Otros métodos de Perfiles.** En esta clase se consideran los métodos de medición del perfil dinámico el cual determina las elevaciones del perfil de otros datos de elevaciones o del resumen de estadísticas calculado a partir de datos de elevación. El perfil de una o ambas roderas se mide con perfilómetros de contacto o sin contacto. La precisión de estos dispositivos depende de la tecnología utilizada, siendo menos precisos que los de la clase I.

**Clase III. IRI estimado de ecuaciones de correlación.** Los equipos de clase III incluyen dispositivos mecánicos o electrónicos que, indirectamente, evalúan los perfiles del pavimento. Las medidas obtenidas con estos dispositivos requieren de calibración a través de correlaciones con los valores de la rugosidad normalizada. Los instrumentos de la clase III son particularmente útiles para la medición de carreteras llenas de baches, especialmente las que están sin pavimentar. Se puede emplear en condiciones muy altas de rugosidad y en condiciones que podrían comprometer seriamente a la calibración de los instrumentos de la clase I y II.

**Clase IV. Clasificación subjetiva y mediciones sin calibración.** Esta clase es la menos precisa. Las evaluaciones subjetivas se producen ya sea por la conducción en el tramo o al llevar a cabo una inspección visual. Las valoraciones subjetivas de este tipo suelen ser adoptadas cuando una mayor precisión no es esencial o no es costosa. Los costos operativos pueden ser relativamente altos cuando se realiza una inspección visual, especialmente en lo que respecta al entrenamiento con el fin de garantizar que las calificaciones de los diferentes individuos sean consistentes.

#### 3.3.2. Macrotextura

Debido a que la microtextura se mide a través de pruebas de laboratorio, la discusión aquí se centra en la macrotextura. Los dispositivos de medición de la macrotextura se clasifican en dos grandes grupos, dinámicos y estáticos.

**Mediciones dinámicas.** Las mediciones dinámicas utilizan tecnología láser similar a la presentada en la clase I de la rugosidad. A menudo, el mismo equipo utilizado para medir la rugosidad puede ser usado para medir la textura. En algunos casos, la textura se mide tanto en las roderas y entre las roderas. La diferencia en las mediciones proporciona una indicación del cambio de textura que ocurre bajo el tráfico.

**Mediciones estáticas.** El método más comúnmente utilizado para medir la textura de forma estática es el “parche de arena” o método “volumétrico”. Esta prueba simple es una evaluación aproximada de la macrotextura superficial, de forma indirecta evaluada a través de la altura media de la textura. Un volumen conocido estandarizado de arena o esferas de vidrio es circularmente colocado sobre el pavimento y la altura media es medida. Las diferencias en el diámetro medido y el volumen inicial proporcionan una estimación inicial de la profundidad de la textura. El método volumétrico es barato y no necesita mantenimiento complejo o procedimientos de calibración, pero es muy lento y no muy preciso.



#### 3.3.3. Resistencia al deslizamiento

Los equipos de medición de la resistencia al deslizamiento incluyen dispositivos estáticos y dinámicos. En ambos casos, el equipo disponible puede medir la resistencia al deslizamiento transversal o longitudinal.

**Mediciones dinámicas.** Este tipo de mediciones se hacen por medio de un procedimiento de ruedas parcialmente bloqueadas, bloqueadas o por un método de ruedas oblicuas. Este tipo de equipos pueden subdividirse en dos grupos: los dispositivos instalados en vehículos y los dispositivos portátiles. El costo y las características operacionales son sustancialmente diferentes en ambos grupos.

Los equipos de rueda bloqueada y parcialmente bloqueada operan con el mismo principio. El equipo es remolcado a una velocidad estándar. Se aplica agua al pavimento y una rueda del equipo esta parcial o totalmente bloqueada. La fuerza de fricción entre la rueda y el pavimento mojado se mide. Un ejemplo de este tipo de equipo es el descrito en la norma ASTM E-274.

Los equipos de rueda oblicua mantienen una rueda en ángulo con respecto a la dirección del viaje. El coeficiente de deslizamiento transversal es medido de forma continua sobre la longitud de la sección. El SCRIM (Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine) y el MuMeter son ejemplo típicos de este tipo de vehículos.

Los equipos de rueda parcialmente bloqueada (por ejemplo, Grip Tester) y los de deslizamiento transversal, proporcionan mediciones continuas de la resistencia al deslizamiento en las roderas de los vehículos, mientras que los equipos de ruedas bloqueadas solo pueden dar mediciones intermitentes, generalmente de dos segundos para cada medición antes de hacer una pausa. El método de rueda bloqueada tiene la desventaja de una más corta duración de los neumáticos de ensayo debido a un desgaste excesivo en las pruebas rutinarias y por lo general solo se puede utilizar en tramos rectos de la carretera.

**Mediciones estáticas.** El dispositivo estático más comúnmente conocido para medir la resistencia al deslizamiento es el Péndulo Británico. Se trata de un dispositivo portátil y fácil de usar que comprende una zapata de goma que cuelga de un péndulo. Las pruebas se realizan generalmente de acuerdo con el método de prueba de la norma ASTM E 303, o similar.

El péndulo se desliza sobre el pavimento mojado desde una altura conocida. Como resultado de la pérdida de energía causada por la fricción del brazo, se obtiene un número de deslizamiento denominado "BPN" (British Pendulum Number), que se correlaciona con un coeficiente de resistencia al deslizamiento. Una desventaja del péndulo británico es que los resultados pueden variar con el operador encargado de realizar las pruebas, sobre todo en texturas superficiales gruesas donde pueden ocurrir diferencias en la longitud del deslizamiento de la zapata.

Este tipo de equipos no son tan caros como los dispositivos dinámicos. Sin embargo, debido a que la prueba es estática, no es compatible con otros dispositivos y su funcionamiento es muy lento. El uso de dispositivos estáticos también requiere de un control de tráfico, debido a que este debe detenerse durante la prueba y estas pruebas solo proporcionan mediciones en un solo lugar en vez de a lo largo de una sección, lo cual se logra con los dispositivos dinámicos.

#### 3.3.4. Propiedades mecánico/estructurales

El rango de métodos de prueba es desde el deflectómetro de impacto hasta las vigas de deflexión. Para ambos métodos de prueba las propiedades mecánico/estructurales de los pavimentos se miden indirectamente a través de las deflexiones del pavimento.



**Deflectómetros de impacto.** Son dispositivos de carga que aplican cargas con frecuencia y magnitud muy similar a la aplicada por el tráfico pesado. Se utilizan sensores o geófonos para medir las deflexiones en varios puntos de la cuenca de deflexión.

Estos dispositivos varían en función de los sistemas de aplicación de carga, que pueden ser por impulsos vibratorios o estáticos. Estos pueden ser subdivididos en tres grupos: los tradicionales FWD, deflectómetros ligeros (LWD por las siglas Light Weight Deflectometers) y los deflectómetros pesados (HWD por las siglas Heavy Weight Deflectometers).

Operativamente, este método tiene varias ventajas en comparación con las vigas de deflexión, tales como una mayor precisión y mayor velocidad de muestreo. Sin embargo, este equipo necesita personal especializado para calibrar los instrumentos y analizar los datos. Los datos del deflectómetro pueden ser utilizados para un análisis más detallado que los de las vigas de deflexión.

En algunos casos los FWDs se han montado dentro de un vehículo en lugar de ser arrastrados en un remolque. Hay ventajas de tener montado el FWD en el vehículo en términos de portabilidad y eficiencia operativa (por ejemplo, es más fácil de maniobrar y tiene un radio más pequeño de giro), pero puede haber desventajas en términos de alteraciones comprometiendo los diseños seguros de los vehículos y potencialmente altos niveles de ruido para los operadores. También puede provocar que sea más difícil el mantenimiento del equipo.

Los HWD operan en un principio similar a los FWD, a menos que apliquen una carga mucho más pesada, la cual se utiliza para pavimentos muy fuertes o aeropuertos. Los LWD son unidades portátiles.

**Vigas de deflexión.** Este grupo considera todas las metodologías de movimiento de rueda para medir las deflexiones en el pavimento, usualmente referidos a la viga Benkelman y los Deflectógrafos. La viga Benkelman es un dispositivo manual que se coloca sobre la superficie de la carretera. La deflexión máxima de rebote se registra mientras el camión se aleja. El dispositivo es fácil de operar y tiene bajos costos iniciales y de operación, sin embargo, también es muy lento y no tan preciso como el FWD.

Los deflectógrafos son versiones móviles de la viga Benkelman. Dos vigas se colocan en la parte trasera de un camión pesado y un mecanismo especial coloca las vigas en el suelo y las mueve hacia adelante después de que se ha hecho cada medición. Los costos iniciales y de mantenimiento son bastante altos, sin embargo, la velocidad de operación es mayor en comparación con una viga Benkelman, pero por lo general menos de 25 km/h.

**Radar de penetración de tierra** (GPR por las siglas Ground penetrating Radar). Es un pulso eco técnico que utiliza ondas de radio para penetrar en el pavimento a través de la onda de energía desde una antena en movimiento. Como la energía viaja a través del pavimento, se crean ecos en los límites de materiales diferentes. La fuerza de los ecos y el tiempo que les lleva viajar por el pavimento pueden ser utilizados para el cálculo de los espesores de las capas del pavimento y otras propiedades (FHWA, 2004).

Algunas de las aplicaciones más comunes en las evaluaciones mecánicas y estructurales de los pavimentos son: determinación de los espesores de las capas para el retrocálculo, las evaluaciones de los daños de congelación y descongelación, control de calidad de las barras de acero de refuerzo, evaluaciones de las condiciones del subsuelo, determinación de la existencia y naturaleza del espaciamiento de juntas, determinación de parches en pavimentos perpetuos y la determinación de huecos y la acumulación de la humedad.



### 3. Indicadores de condición del pavimento.

---

Las mediciones por medio del GPR para pavimentos se pueden hacer manualmente o con equipos montados en vehículos. Independientemente de si los datos del GPR se recogen de forma manual o desde un vehículo, es necesario calibrar los sistemas a las condiciones locales antes del inicio de la evaluación. De lo contrario, puede comprometerse la validez de los datos obtenidos. Del mismo modo, es importante que el personal sea debidamente capacitado en la recopilación de datos e interpretación para garantizar los resultados.

**Penetrómetro de cono dinámico** (DCP por las siglas Dynamic Cone Penetrometer). Según lo descrito por el TRL (1986) es un instrumento diseñado para la medición rápida in situ de las propiedades estructurales de los pavimentos contruidos con materiales no consolidados. Las mediciones pueden hacerse a una profundidad de 1200 mm. Cuando las capas del pavimento tienen diferentes calidades, los límites pueden ser identificados y el espesor de las capas determinado dentro de aproximadamente unos 10 mm.

El DCP consiste en un eje con un martillo de 8 kg que cae desde una altura de 575 mm. El extremo del eje está equipado con un cono de 60 grados con un diámetro de 20 mm. El instrumento es operado primero para cavar un agujero en la capa superior no estabilizada. Posteriormente se coloca en posición vertical y el martillo se deja caer. El número de golpes necesarios del martillo para que el cono penetre una cierta distancia se registra. Este dispositivo es generalmente operado manualmente, aunque un número de fabricantes lo ofrecen los sistemas montados en un vehículo o un remolque.

#### 3.3.5. Inventario de deterioros

Las mediciones de los deterioros de superficie cubren un amplio rango de deterioros, desde los baches y agrietamientos hasta las deformaciones de superficie tales como las roderas. McGhee (2004) proporciona una buena revisión de las técnicas automatizadas de recolección de deterioros y las experiencias de los usuarios.

Existen tres grupos de tecnologías utilizadas para el registro de estos deterioros. Las técnicas manuales se basan en la evaluación visual de los deterioros observados y posteriormente registrar los datos en papel o con algún tipo de técnica informática. Las técnicas de imagen implican la toma de fotografías de la superficie, ya sea de forma discreta o continuamente y luego analizar las imágenes para reportar los defectos de superficie. Los perfiles usan técnicas de laser o acústicas para medir las deformaciones.

**Registro manual de deterioros.** Se basa en observaciones visuales del deterioro y el registro de la extensión, gravedad y localización de los deterioros en formularios de papel o utilizando un registro de sistema de datos. Como describen Bennett y Paterson (2000), hay una serie de métodos utilizados para describir los defectos superficiales. Estos pueden variar desde niveles de programación de análisis donde las calificaciones se resumen a una serie de defectos, hasta los niveles de detalle o investigación, donde se guarda la información precisa sobre los defectos.

Con el advenimiento del bajo costo de los sistemas de Asistencia Digital Personal (PDA por las siglas Personal Digital Assistant), muchas agencias han transferido sus métodos de trabajo basados en papel a métodos electrónicos. Esto tiene grandes ventajas ya que permite una mejor garantía en la calidad de los datos. Mediante la integración de receptores GPS en los PDA, la referencia a la ubicación de los datos se ha mejorado considerablemente.





**Imagen análoga y digital.** Este tipo de imágenes se utilizan para registrar y cuantificar los deterioros de superficie y los agrietamientos. El sistema está compuesto de una unidad de imagen que graba imágenes fijas o continuas del pavimento (ya sea en película o digital) y un medio para el análisis de las imágenes (ya sea manual o automático).

Una ventaja importante de los sistemas automatizados es su repetición. Al eliminar el elemento manual de identificación de deterioros, se puede obtener medidas coherentes y repetibles de los deterioros.

Los sistemas analógicos se utilizaron por algún tiempo para registrar los datos del pavimento. La tendencia actual es la digitalización de las imágenes analógicas. Por ejemplo, el proyecto LTPP se encuentra en proceso de convertir las imágenes analógicas a digitales. Tradicionalmente, se prefirió la imagen analógica a la digital, debido a la mayor resolución de las imágenes analógicas (píxeles de 2 mm). Sin embargo, la tecnología digital actual ofrece resoluciones de 1 mm por lo que la mayoría de los sistemas se basan en las cámaras digitales.

Hay dos tipos de cámaras digitales utilizadas para la grabación de los deterioros: área de escaneo y digitalización de línea. La mayoría de sistemas utiliza cámaras de escaneo, en la que un dispositivo de acoplamiento de carga (DAC) de la matriz (generalmente de forma rectangular) de píxeles ofrece una visión de un objeto que contiene la longitud y el ancho. Con una cámara de escaneo en línea, el DAC contiene una sola línea de píxeles. El escaneo en línea ofrece las imágenes más precisas y potencialmente elimina la necesidad de iluminación adicional.

La resolución de la cámara determina el tamaño del deterioro que se puede observar. Por ejemplo, una cámara de 1300 píxeles puede identificar las grietas de 3 mm de ancho, una cámara de 2048 píxeles de 2 mm y una cámara de 4096 píxeles de 1 mm (8 bits o 256 escala de grises). El tamaño de las imágenes es proporcional al número de píxeles. Cada imagen de 2048 píxeles es de 1.6 GB, comparados con 6.6 GB para 4096 píxeles. Las técnicas avanzadas de compresión puede reducir el tamaño de imagen a 70 MB o 280 MB, respectivamente, sin embargo, los requisitos de almacenamiento de datos de la imagen digital son significativos, incluso con la mejor compresión.

McGhee (2004) describe como las imágenes se procesan utilizando técnicas manuales, semiautomáticas o totalmente automatizadas. En las manuales y semiautomáticas es necesaria la intervención humana. La importancia de la intervención puede variar significativamente entre los sistemas. Los sistemas totalmente automatizados identifican y cuantifican los deterioros a través de ninguna o mínima intervención humana.

**Profundidad de rodera.** Se mide de forma manual utilizando una regla recta (usualmente de 1.2 o 2.0 m) a través de la rodera y midiendo la diferencia de la altura con el pavimento o usando un perfil. Los perfiles operan por tener sensores de registro de la elevación de un sensor en relación con el pavimento. De estos, se establecen los perfiles transversales. Posteriormente, se analizan los datos para determinar la extensión de la rodera.



## Capítulo 4.

# Análisis de los modelos utilizados.

### 4.1. Introducción

El estudio y desarrollo de los modelos de predicción del desempeño han recibido el mayor impulso de los usuarios de las agencias que están empezando a desarrollar o mejorando sus Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS). Un modelo de predicción del desempeño del pavimento confiable es indispensable para cualquier diseño práctico y esfuerzo conservación de pavimentos. La necesidad de la predicción del desempeño abarca la planificación financiera y las funciones de presupuestación. La responsabilidad de las agencias recae en la necesidad de evaluar que tanto una sección determinada de pavimento proporciona un nivel adecuado de servicio antes de que requiera de mantenimiento o reconstrucción. Este conocimiento, junto con el conocimiento de las estrategias de mantenimiento disponibles, sus costos y beneficios, permite la estimación de las necesidades de financiación a largo plazo para la conservación de pavimentos y proporciona un medio para analizar las consecuencias de las diferentes hipótesis en el estado de la red de pavimentos.

Identificar y analizar los factores que afectan el desempeño del ciclo de vida de las estructuras de los pavimentos es esencial para el desarrollo de los modelos de predicción. Estos factores pueden ser identificados a partir de los resultados históricos o de pruebas de fallas aceleradas. Hudson et al., (1997) enumera los deterioros que afectan la infraestructura en cinco categorías. Estas categorías son: 1) de carga/uso, 2) ambientales, 3) material, 4) calidad de la construcción y 5) los efectos de la interacción.

En este capítulo se hace una descripción de los modelos utilizados en el estudio, para los cuales se hace una breve reseña de cómo fueron desarrollados y la base de su funcionamiento. En el caso del HDM-4 se describen las ecuaciones con las que se desarrollaron los modelos de predicción que se aplican en la sección de estudio y las variables que influyen en estas, así como los niveles de calibración propuestos por los creadores del sistema.



## 4.2. Modelos del MicroPaver

### 4.2.1. Antecedentes

El desarrollo del sistema PAVER comenzó como resultado de una visita al Fuerte Eustis, Virginia, por una investigación técnica del Monitor del Cuerpo de Ingenieros. El Monitor técnico se vio muy impresionado por la forma en la que el jefe de instalaciones gestionaba el mantenimiento de los pavimentos. El cual había estado trabajando en el Fuerte Eustis durante más de 20 años. Su sistema consistía en dividir la red de los pavimentos en secciones uniformes basadas en la historia de la construcción y el uso del pavimento. También estableció un sistema de archivos de tarjetas donde guardaba el historial de mantenimiento de cada sección en una tarjeta separada. El utilizó la información de las tarjetas y su conocimiento de las condiciones del pavimento para establecer planes de mantenimiento de 5 años. El coloreaba a mano cada año, los lugares donde mostraba el programa de las secciones del pavimento para la conservación y reparación (M&R).

Después de examinar el sistema de archivos de tarjetas el Monitor técnico consideró que todas las instalaciones del Ejército deberían tener tal sistema. En 1968 el Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Construcción del Ejército de los EE.UU. (CERL, por sus siglas en ingles) comenzó el desarrollo de un sistema similar al utilizado en el Fuerte Eustis.

El Investigador Principal (PI) líder en el desarrollo del sistema poseía una sólida experiencia en investigación de operaciones. También mantuvo como consultor, a un profesor de investigación en operaciones de una importante universidad. El equipo de investigaciones visitó al jefe de mantenimiento del Fuerte Eustis para estudiar su sistema de archivos de tarjetas, para mejorar y automatizar su sistema para operar en una computadora central.

Este esfuerzo continuo desde 1968 a 1972. El producto preliminar fue un sistema llamado PAVER, que consistía principalmente de una estructura de datos diseñada para su uso con el sistema 2000 de gestión de base de datos. La estructura de datos contenía una larga lista de elementos de datos, incluyendo información de las capas del pavimento, los datos del tráfico y los datos climáticos. En 1973 el sistema fue probado en el Fuerte Eustis y se encontró que era inaceptable. Esta primera versión de PAVER era demasiado detallada, consumía mucho tiempo, era difícil de usar y sobre todo, no añadía ninguna tecnología al pavimento en comparación con el sistema de archivos existente. Esta última razón fue encontrada como el principal inconveniente del PAVER. Concluyeron que un sistema de gestión de pavimentos debe ser más que una simple base de datos con información, sino que debe de incluir el estado del arte de la última tecnología de gestión de pavimentos.

### 4.2.2. Desarrollo del sistema

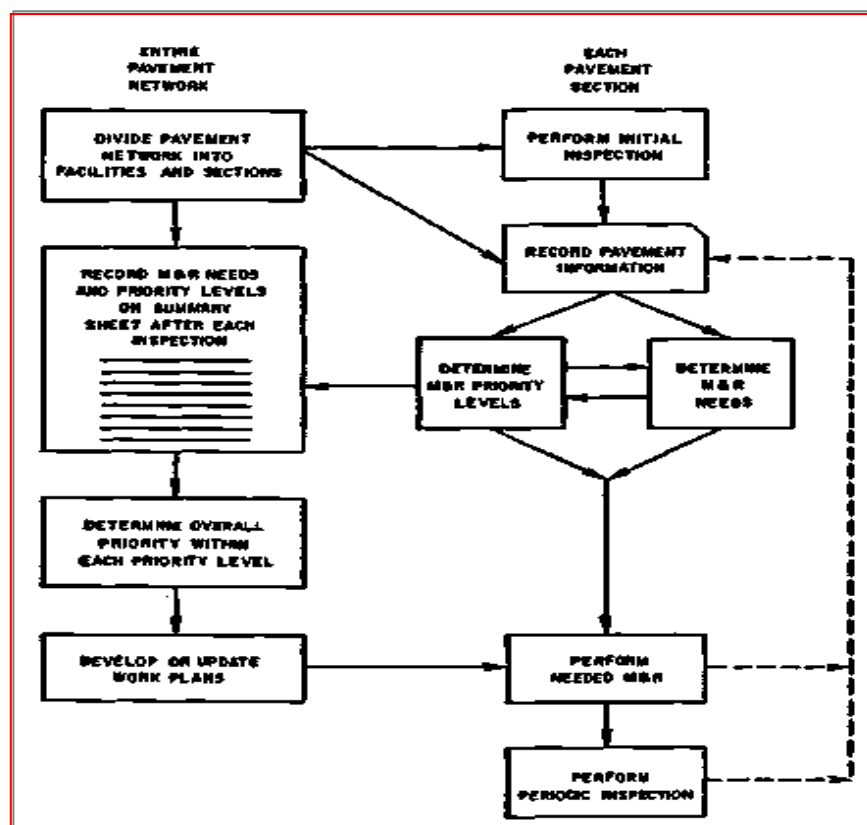
Sobre la base de las lecciones aprendidas desde 1968 hasta 1974, se decidió desarrollar en primer lugar un sistema manual que pudiera ser probado antes de ser automatizado. El principio rector fue “personalizar antes de informatizar” la figura 4.1 muestra un diagrama de flujo del sistema que fue desarrollado. Se trataba de procedimientos para llevar a cabo un inventario de los deterioros del pavimento, dividiendo la red en secciones de gestión uniformes, almacenando la información del pavimento y tráfico en un formato manual de tarjetas y el desarrollo de los planes de trabajo de M&R.

También en 1974, la Fuerza Aérea de los EE.UU financio al CERL para desarrollar un índice de condición para la calificación de los pavimento en aeropuertos. Fue a través de un gran número de experimentados ingenieros de pavimentos de la Fuerza Aérea, que el Índice de Condición



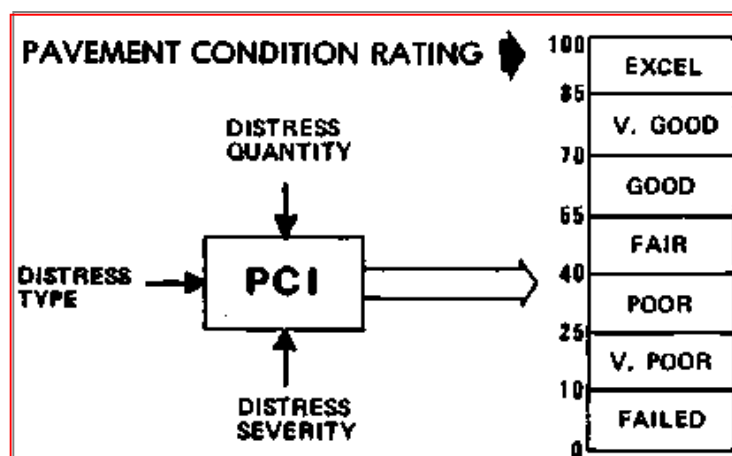
#### 4. Análisis de los modelos utilizados.

del Pavimento (Pavement Condition Index, PCI) fue desarrollado en 1976. El PCI (Shahin ed. al., 1976) se determina sobre la base de medidas de deterioros y se mide en una escala numérica de 0 a 100, con 100 representando “excelente” y el 0 “representa la falla total del pavimento” figura 4.2.



**Figura 4.1.** Resumen del diagrama de flujo para el Sistema Manual de Gestión de Mantenimiento desarrollado en 1975 (fuente: Shahin ed. al., 1975).

En 1976, el Ejército decide financiar el desarrollo del PCI para carreteras y estacionamientos similar al de aeropuertos. Este desarrollo se finalizó en 1978 (Shahin ed. al., 1979).



**Figura 4.2.** Índice de Condición del Pavimento (PCI) Concepto Desarrollado para Aeropuertos y Carreteras (fuente: Shahin, 1992).



En 1978, el Ejército y la Fuerza Aérea acordaron combinar toda la tecnología de gestión de pavimentos desarrollada hasta ese tiempo (para aeropuertos, carreteras y calles) en un solo sistema de gestión de pavimentos. También se decidió que el sistema fuera automatizado para su uso en una computadora central y mantener el nombre de PAVER. El sistema fue automatizado mediante el diseño de una estructura de datos utilizando el sistema gestor de bases de datos 2000. Automatizaron los reportes utilizando la información de la base de datos incluyendo inventario, PCI, deterioros y localizando los requerimientos de M&R basados en una política de mantenimiento de deterioros predefinida por el usuario. El sistema también incluía otros programas de análisis para realizar los costos del ciclo de vida y la predicción estadística de los deterioros independientemente de la base de datos.

En 1979, una evaluación formal del PAVER se realizó mediante la prueba de implementación en el Fuerte Eustis. El jefe de mantenimiento del Fuerte participó comparando los planes de M&R desarrollados con el PAVER y su sistema actual de archivos de tarjetas. Los resultados de la prueba de implementación fueron supervisados y evaluados por un comité de más de 20 ingenieros del Ejército. Basados en los resultados de la prueba, el PAVER fue adoptado como el sistema de gestión de pavimentos estándar del Ejército. El sistema fue aprobado como un sistema voluntario (en lugar de ser obligatorio). Este fue el inicio del PMS MicroPAVER que existe actualmente.

De 1980 a 1985, la tecnología de la computadora central del PAVER mejoró y se añadieron capacidades de reportes. La investigación de tecnología del pavimento se llevó a cabo principalmente en el área de modelación de predicción de la condición. El desarrollo y muchas investigaciones fueron financiados por la Fuerza Aérea para el desarrollo de los modelos de predicción del PCI para pavimentos de aeropuertos. Dos modelos fueron desarrollados uno para pavimentos asfálticos y otro para pavimentos de concreto, los cuales predicen el PCI basados en la estructura del pavimento, cargas y clima (Shahin ed. al., 1979). La evaluación de los modelos mostró que la utilidad de estos se limitaba a la predicción de la condición media. Esto se debe a una considerable variación en las condiciones de los sitios utilizados para desarrollar los modelos. La realidad es que es casi imposible considerar con precisión todas las variaciones con variables conocidas como tráfico, clima y propiedades de la subrasante. El uso de los modelos para predecir el PCI para una sección específica de pavimento proporcionaba resultados cuestionables. La proyección de una línea recta del PCI de una sección a otra sección daba lugar a una predicción más confiable, pero con limitaciones. Por lo tanto, se decidió limitar todas las proyecciones a 5 años, hasta que modelos de predicción mejores fueran desarrollados.

En 1985, La Administración Federal de Aviación (FAA) financió al CERL para el desarrollo de un sistema PAVER para ser usado en microcomputadoras compatible con IBM. El desarrollo de este sistema se completó en 1987, el sistema fue llamado "Micro PAVER".

Desde 1985, la mayoría de los CERL de investigación y desarrollo (R&D) fueron dirigidos hacia el desarrollo de mejores modelos de predicción del PCI y la mejoría del Micro PAVER. El modelo de predicción R&D fue financiado por el Ejército y dio como resultado la exitosa técnica de Análisis por Familia (Nuñez y Shahin, 1986). Además, un gran esfuerzo en R&D fue financiado por el Ejército para el desarrollo optimizado de programas de M&R de diferentes escenarios presupuestarios. Dos técnicas fueron desarrolladas, basadas en la programación dinámica (Shahin ed. al., 1988) y el concepto crítico (Shahin y Walther, 1990). El PCI crítico se define como el valor del PCI a partir del cual la tasa del deterioro aumenta considerablemente. Este concepto recomienda que los pavimentos se deban de mantener por encima del PCI crítico. La técnica de análisis de modelos de familias y el desarrollo optimizado de M&R basado en PCI crítico fueron incorporados al MicroPAVER 3.1 en 1991.





### 4.2.3. Tecnología de pavimentos desarrollada

La primera cuestión de tecnología de pavimentos importante usada en el desarrollo de PAVER fue la creación del PCI. El cual se utiliza para la predicción del desempeño del pavimento, la estimación del presupuesto y otras funciones de los PMS. Una característica importante del PCI es que debe de ser reproducible. También debe de proporcionar una medida significativa de las necesidades de M&R y aceptables niveles de servicio al usuario. El PCI fue desarrollado específicamente para el sistema PAVER para cumplir los objetivos mencionados. Se basa en las medidas del tipo de deterioro, severidad y cantidad. El PCI se ha desarrollado para indicar la integridad general de una estructura de pavimento y la condición operacional de la superficie.

También está directamente relacionado con la cantidad de mantenimiento y reparación necesaria, ya que se basa en la cuantificación del deterioro del pavimento. El PCI tomó tres años en desarrollarse y su éxito representa un hito importante en el desarrollo del PAVER. De hecho, el PCI puede considerarse la base del sistema PAVER.

Una cuestión igualmente importante en el desarrollo de tecnología de pavimentos es el desarrollo de los modelos de predicción de la condición. Hay una variedad de técnicas con las cuales los modelos de predicción de deterioros se pueden desarrollar. Estos incluyen las experiencias, el análisis de regresión de la condición con respecto a variables como la edad y el tráfico, el análisis mecanicista puro y una combinación de todo lo anterior. Todas estas técnicas fueron investigadas durante varios años en el desarrollo de los modelos para su uso en PAVER. Los modelos resultantes fueron decepcionantes para predecir la condición de una sección a otra sección de pavimento. Este problema se puede esperar cuando se trata de explicar el complejo comportamiento del pavimento con un modelo que se utilizará en climas diferentes, para diferentes condiciones de subrasante y con materiales que provienen de diferentes fuentes. Por lo tanto, para el sistema PAVER, se decidió que se crearía una técnica de modelación en el sistema en lugar de desarrollar o adaptar un modelo específico. La técnica de modelación resultante se denomina Análisis de Familia. Esta técnica permite al usuario identificar pavimentos con características de desempeño similares y luego desarrollar una curva de cuarto grado usando el error de los mínimos cuadrados entre el PCI y la edad del pavimento. Hay varias ventajas de esta técnica:

- 1) Puede haber tantos modelos como sea necesario para cada red de pavimento. Por ejemplo, puede haber un modelo para carreteras asfálticas principales y otro modelo para carreteras asfálticas principales que han recibido una o más sobrecarpetas.
- 2) Los modelos son fáciles de desarrollar y asignar a las secciones de pavimento apropiadas.
- 3) Los modelos son sencillos y se actualizan continuamente cuando nuevos datos de la inspección del PCI se agregan a la base de datos.
- 4) Los diferentes modelos de familias de pavimentos pueden ser utilizados para realizar comparaciones de costos de ciclo de vida entre alternativas de M&R.

La precisión en la predicción de la condición es extremadamente importante en los PMS, porque esto afecta el futuro MR&R en los requisitos de previsión presupuestaria. Si la predicción de deterioro no es exacta, los costos del ciclo de vida a nivel de análisis de proyecto serán erróneos. También hay que destacar que a la hora de determinar las necesidades de MR&R, el PCI es solo una de las variables consideradas. Otras variables incluyen el deterioro y si el deterioro es relacionado con las cargas.



#### 4.2.4. Procedimiento para el cálculo del PCI

El Índice de Condición del Pavimento (PCI) constituye una de las metodologías más completa para la evaluación y calificación objetiva de pavimentos, flexibles y rígidos, dentro de los PMS. La metodología es de fácil implementación y no requiere de herramientas especializadas más allá de las que constituyen el sistema.

El PCI es un indicador numérico de los rangos de la condición de la superficie del pavimento. Proporciona una medida de la condición actual del pavimento basado en el deterioro observado en la superficie del pavimento, que también indica la integridad estructural y la condición operacional de la superficie (rugosidad localizada y seguridad). El PCI no puede medir la capacidad estructural ni proporciona una medición directa de la resistencia al deslizamiento o la rugosidad. Proporciona una base objetiva y racional para determinar las necesidades de mantenimiento, necesidades de reparación y prioridades. La monitorización continua del PCI se utiliza para establecer la tasa de deterioro del pavimento, que permita la identificación temprana de las necesidades de rehabilitación importantes. Además, proporciona retroalimentación sobre el desempeño del pavimento para la validación o mejora de los métodos de diseño de pavimentos actuales y los procedimientos de construcción (ASTM D 6433-03).

El deterioro de la estructura de pavimento es una función de la clase de daño, su severidad y cantidad o densidad del mismo. La formulación de un índice que tuviese en cuenta los tres factores mencionados ha sido problemática debido al gran número de posibles condiciones. Para superar esta dificultad se introdujeron los "*valores deducidos*", como un arquetipo de factor de ponderación, con el fin de indicar el grado de afectación que cada combinación de clase de daño, nivel de severidad y densidad tiene sobre la condición del pavimento.

El PCI es un índice numérico que varía desde cero (0), para un pavimento fallado o en mal estado, hasta cien (100) para un pavimento en perfecto estado. En la tabla 4.1 se presentan los rangos de PCI con la correspondiente descripción cualitativa de la condición del pavimento.

El cálculo del PCI se fundamenta en los resultados de un inventario visual de la condición del pavimento en el cual se establecen CLASE, SEVERIDAD y CANTIDAD que cada daño presenta. El PCI se desarrolló para obtener un índice de la integridad estructural del pavimento y de la condición operacional de la superficie. La información de los daños obtenida como parte del inventario ofrece una percepción clara de las causas de los daños y su relación con las cargas o con el clima.

**Tabla 4.1.** Rangos de calificación del PCI.

| Rango    | Clasificación |
|----------|---------------|
| 100 - 85 | Excelente     |
| 85 - 70  | Muy Bueno     |
| 70 - 55  | Bueno         |
| 55 - 40  | Regular       |
| 40 - 25  | Malo          |
| 25 - 10  | Muy Malo      |
| 10 - 0   | Fallado       |



#### 4. Análisis de los modelos utilizados.

##### 4.2.4.1. Procedimiento de evaluación de la condición del pavimento

La primera etapa corresponde al trabajo de campo en el cual se identifican los daños teniendo en cuenta la clase, severidad y extensión de los mismos. Esta información se registra en formatos adecuados para tal fin. La Figura 4.3 ilustra el formato para la inspección de pavimentos asfálticos. La figura es ilustrativa y en la práctica debe proveerse el espacio necesario para consignar toda la información pertinente.

| EXPLORACIÓN DE LA CONDICIÓN POR UNIDAD DE MUESTREO |                               |                      |                               | ESQUEMA |              |                |
|----------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|---------|--------------|----------------|
| ZONA                                               | ABSCISA INICIAL               | UNIDAD DE MUESTREO   |                               |         |              |                |
| CÓDIGO VÍA                                         | ABSCISA FINAL                 | ÁREA MUESTREO (m²)   |                               |         |              |                |
| INSPECCIONADA POR                                  | FECHA                         |                      |                               |         |              |                |
|                                                    |                               |                      |                               |         |              |                |
| No.                                                | Daño                          | No.                  | Daño                          |         |              |                |
| 1                                                  | Piel de cecodillo.            | 11                   | Parcheo.                      |         |              |                |
| 2                                                  | Exudación.                    | 12                   | Pulimento de agregados.       |         |              |                |
| 3                                                  | Agrietamiento en bloque.      | 13                   | Huecos.                       |         |              |                |
| 4                                                  | Abultamientos y hundimientos. | 14                   | Cruce de vía férrea.          |         |              |                |
| 5                                                  | Corrugación.                  | 15                   | Ahuellamiento.                |         |              |                |
| 6                                                  | Depresión.                    | 16                   | Desplazamiento.               |         |              |                |
| 7                                                  | Grieta de borde.              | 17                   | Grieta parabólica (slippage)  |         |              |                |
| 8                                                  | Grieta de reflexión de junta. | 18                   | Hinchamiento.                 |         |              |                |
| 9                                                  | Desnivel carril / balsa.      | 19                   | Desprendimiento de agregados. |         |              |                |
| 10                                                 | Grietas long y transversal.   |                      |                               |         |              |                |
| Daño                                               | Severidad                     | Cantidades parciales |                               | Total   | Densidad (%) | Valor deducido |
|                                                    |                               |                      |                               |         |              |                |
|                                                    |                               |                      |                               |         |              |                |
|                                                    |                               |                      |                               |         |              |                |

**Figura 4.3.** Hoja de datos para el inventario de la condición de pavimentos flexibles en una unidad de muestra (fuente: ASTM D 6433-03).

#### A) Unidades de muestreo.

Una unidad de muestra es una parte apropiadamente definida de una sección de pavimento designada solamente para propósitos de inspección del pavimento. Se divide la vía en secciones o "unidades de muestreo", cuyas dimensiones varían de acuerdo con los tipos de vía y de capa de rodadura.

Carreteras con capa de rodadura asfáltica y ancho menor que 7.30 m. El área de la unidad de muestreo debe estar en el rango  $230.0 \pm 93.0 \text{ m}^2$ . MicroPaver sugiere se seleccionen unidades de muestra cercanas a la media para más precisión.

Debido a las longitudes de las secciones, algunas unidades de muestra pueden tener una longitud diferente a las demás. No todas las unidades de muestra deben de ser del mismo tamaño, pero si tienen que estar dentro de los lineamientos recomendados en las unidades de muestra para asegurar precisión en la estimación del PCI. Para cada tramo de pavimento que se esté inspeccionando, es recomendable hacer croquis que muestre el tamaño, la ubicación y orientación de las unidades de muestra. Estos croquis se pueden utilizar para reubicar unidades de muestra en futuras inspecciones (TxDOT, 2000).

**B) Determinación de las unidades de muestreo para evaluación**

La inspección de cada unidad de muestra en un pavimento requiere un considerable esfuerzo y tiempo, especialmente para secciones de gran tamaño. Con la creación de un plan de muestreo, se minimiza la cantidad de recursos necesarios, sin comprometer la precisión en la estimación del PCI (Shahin, 1994). El grado de muestreo depende de la importancia del pavimento y si la inspección se realiza a nivel de red o de proyecto. Para un nivel de red un número limitado de muestras se inspeccionan. Por ejemplo, MicroPaver requiere de un número de 5 muestras. La tabla 4.2 muestra los criterios típicos a nivel de red utilizados por algunas agencias.

**Tabla 4.2.** Criterio de muestreo a nivel de red (Shahin, 1994).

| Número de unidades de muestra en una sección | Mínimo número de unidades a ser inspeccionadas              |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1-5                                          | 1                                                           |
| 6-10                                         | 2                                                           |
| 11-15                                        | 3                                                           |
| 16-40                                        | 4                                                           |
| Más de 40                                    | 10 % (redondeado a la siguiente unidad de muestra completa) |

Para análisis a nivel de proyecto, se necesita de más precisión en los datos para hacer los informes de la sección. Por lo tanto, más unidades de muestra son inspeccionadas en comparación con una inspección a nivel de red. La cantidad mínima de unidades de muestra ( $n$ ) que tiene que ser inspeccionadas para obtener adecuadamente el PCI en una sección puede ser calculada utilizando la siguiente formula (Shahin, 1994):

$$n = \frac{N * S^2}{\left[ \left( \frac{e^2}{4} \right) * (N-1) + S^2 \right]} \quad 4.1$$

Donde:

$N$  = Número total de unidades de muestra en la sección.

$e$  = Error permisible en la estimación del PCI en la sección, generalmente  $e = 5 \pm$  puntos.

$S$  = Desviación estándar del PCI entre las unidades de muestra de la sección. Al realizar una inspección por primera vez o a falta de datos, la desviación estándar se supone igual a 10 para pavimentos asfálticos y 15 para pavimentos de concreto de cemento Portland.

Una vez que el número de unidades de muestra se haya determinado, el siguiente paso es calcular el intervalo de separación de las unidades. Se recomienda espaciar las unidades utilizando un método sistemático de muestreo aleatorio, cuando las muestras están igualmente espaciadas en toda la sección y la primera se selecciona al azar. El intervalo de muestreo ( $i$ ) se determina con la siguiente formula redondeada al número más pequeño del conjunto:

$$i = \frac{N}{n} \quad 4.2$$



#### 4. Análisis de los modelos utilizados.

---

Donde:

N = Número total de unidades de muestra.

n = Número de unidades de muestra a ser inspeccionadas.

Adicionalmente se deben de inspeccionar unidades de muestra cuando se encuentren deterioros no representativos o inusuales. Estas unidades inusuales de muestra deben de ser consideradas como unidades adicionales y no sustituyen a las unidades obtenidas al azar (Shahin, 1994).

#### C) Condiciones para la realización de la inspección

Después de que las secciones del pavimento se han dividido en unidades de muestra y se han determinado las unidades a inspeccionarse, la inspección visual puede llevarse a cabo mediante la identificación del tipo y severidad del deterioro presente en cada unidad de muestra seleccionada. El deterioro medido durante la inspección visual será ingresado en el MicroPaver para obtener PCI para todas las secciones de la red. Las definiciones de deterioros para pavimentos asfáltico y de concreto hidráulico son muy diferentes.

Por lo tanto, el procedimiento empleado para llevar a cabo una inspección de la condición del PCI variará dependiendo del tipo de superficie que se esté inspeccionando. Shahin, 1994 y ASTM, 1995 proporcionan datos específicos sobre los procedimientos de inspección para asfalto y concreto, así como las definiciones de los deterioros. Las definiciones de los deterioros deben de ser consideradas adecuadamente para generar un PCI en cada sección. Que a su vez estas inspecciones generarán un PCI para todas las secciones de la red.

#### D) Cálculo del PCI

Una vez que la inspección de las condiciones se ha completado, el valor del PCI para cada unidad de inspección se calcula. Solo después de que el PCI para cada unidad estudiada se ha calculado, el PCI para la sección del pavimento se puede calcular. El cálculo del PCI se basa en la deducción de valores, que son factores de peso de 0 a 100 que indican el impacto para cada deterioro en la condición del pavimento. Un valor de deducción de 0 indica que el deterioro no tiene efecto sobre el desempeño del pavimento, mientras que un valor de 100 representa un deterioro extremadamente grave. El PCI se puede calcular utilizando varios métodos: manual, utilizando una hoja de cálculo o utilizando el MicroPaver. El software del MicroPaver calcula automáticamente el PCI para cada unidad inspeccionada de cada sección una vez ingresados los datos de los deterioros. Pudiéndose generar un reporte para cada unidad de muestra inspeccionada o para cada sección de la red.

Para nuestro caso se utilizó el MicroPaver para calcular el PCI de las unidades de muestra para posteriormente calcular su respectivo valor de la sección evaluada.





### 4.3. Modelos del HDM-4

El sistema para el desarrollo y gestión de carreteras (*Highway Development and Management System*), conocido por las siglas HDM-4, originalmente desarrollado por el Banco Mundial para uso internacional, es un conjunto de herramientas para el análisis técnico y económico de alternativas de inversión relacionadas con la conservación y mejoramiento de carreteras. El HDM-4 puede proporcionar la predicción del desempeño de las carreteras, programación de tratamientos, estimación de los fondos, asignación del presupuesto, evaluación de proyectos, estudios de impacto de las políticas y una amplia gama de aplicaciones especiales. Sin embargo, su eficacia depende de su capacidad de modelar con precisión y predecir el desempeño del pavimento, que se ve afectado por números factores, incluyendo el diseño estructural, materiales, variabilidad de la construcción, tráfico, costos de operación de los vehículos, consideraciones ambientales, así como las practicas de mantenimiento y rehabilitación. Por lo tanto, con el fin de utilizar eficazmente el HDM-4, sus modelos de predicción deben de ser calibrados a las condiciones locales.

El HDM-4 simula los cambios futuros en las redes de carreteras respecto a las condiciones actuales. La confiabilidad de los resultados depende de dos consideraciones principales.

- Que tan bien los datos proporcionados en el modelo representan la realidad de las condiciones actuales y los factores que influyen, con respecto a las relaciones del modelo.
- Que tan bien las predicciones del modelo se ajustan al comportamiento real y a las interacciones entre diversos factores para la variedad de condiciones en las que se aplica.

La aplicación del modelo HDM-4 implica dos pasos importantes.

- Una correcta interpretación de los requerimientos de los datos de entrada y lograr una calidad de los datos de entrada que sea apropiada con la confiabilidad deseada de los resultados.
- Ajuste de los parámetros del modelo para mejorar la forma de las previsiones y los resultados representen los cambios e influencias en el tiempo y en diversas intervenciones.

Las relaciones del modelo HDM-4 tienen factores de calibración individuales. El usuario puede ajustar estos factores, de forma que las predicciones dadas por el modelo reflejen las observaciones realizadas en las condiciones locales bajo investigación.

#### 4.3.1. Antecedentes

El primer paso hacia el desarrollo de una completa integración de los modelos de valoración de la inversión en carreteras para países en desarrollo fue hecho por el Banco Mundial en 1968, cuando se inicio un estudio para desarrollar un sistema de evaluación de los efectos en los procedimientos de construcción y mantenimiento en los costos de los usuarios para carreteras de bajos volúmenes de tráfico.

De 1973 a 1982 se llevaron a cabo cuatro estudios de campo para desarrollar modelos de predicción del deterioro de carreteras y costos de operación vehicular en una variedad de circunstancias. Estos fueron los siguientes:

Estudio en Kenia (Abaynayaka, et al., 1977). Fue el primer estudio para el desarrollo de las relaciones de deterioro y costos de los usuarios de carreteras.



#### 4. Análisis de los modelos utilizados.

Estudio del Caribe (Morosiuk y Hide 1982). Se investigaron los efectos de la geometría de la vía en los costos de operación de los vehículos.

Estudio de la India (CRRI, 1982). Se estudiaron los problemas operativos específicos de las carreteras de la India en términos de pavimentos estrechos y una larga proporción de transporte no motorizado.

Estudio de Brasil (GEIPOT, 1982). Extendió la validez de las relaciones de los modelos.

De los estudios realizados se elaboraron una serie de modelos matemáticos (llamados modelos de deterioro), que eran capaces de predecir el tiempo de iniciación y el nivel de progresión de diversos tipos de deterioro que presentan comúnmente los pavimentos asfálticos. A estos modelos se les otorgó la capacidad de que fueran generales, es decir, que se pudieran aplicar en cualquier región del planeta, previa a una calibración. Esta consiste en la evaluación de ciertos parámetros en base a las características del clima y a los procesos constructivos del lugar dónde se quisieran implementar los modelos.

En 1987, un modelo exhaustivo conocido como HDM-III (Watanatada et. al.) fue desarrollado por el Banco Mundial, haciendo uso de las investigaciones anteriores. Gracias a que la tecnología había avanzado el Banco mundial elaboro una versión de microordenador del programa HDM-III, conocido como HDM-95.

#### 4.3.2. Deterioros en pavimento

Las fallas en pavimentos se manifiestan en diferentes tipos de deterioros, cada uno de ellos es modelado por separado en el HDM-4. La tabla 4.3 ofrece un resumen de los defectos del pavimento que son modelados. Como cada modo de deterioro se desarrolla y progresa a ritmos diferentes en ambientes diferentes, es importante que las relaciones de los modelos de deterioro (Road Model, RD) sean calibradas a las condiciones locales antes de usarlos para el análisis de las inversiones en carreteras. Para facilitar este proceso, las relaciones ofrecen una serie de factores de deterioro definibles por el usuario para cambiar la escala de un deterioro en particular. Los coeficientes del modelo se deben de utilizar para ajustar los tipos de deterioro para los diferentes tipos de materiales del pavimento.

**Tabla 4.3.** Defectos de pavimentos modelados en HDM-4 (Adaptado Odoki & Kerali, 2000).

| Bituminosos                  | Concreto            | Sin sellar       |
|------------------------------|---------------------|------------------|
| Agrietamiento                | Agrietamiento       | Perdida de grava |
| Desprendimiento              | Fallas en la juntas | Rugosidad        |
| Baches                       | Escalonamiento      |                  |
| Rotura de borde              | Fallas              |                  |
| Deformación                  | Perdida de servicio |                  |
| Textura superficial          | Rugosidad           |                  |
| Resistencia la deslizamiento |                     |                  |
| Rugosidad                    |                     |                  |



Los modelos de deterioro del HDM-4 permiten analizar el comportamiento de una amplia gama de pavimentos asfálticos. Para ello, se utilizan variantes de los modelos específicos en la estimación de cada tipo de daño, o se modifican los coeficientes de los mismos. Los pavimentos son clasificados en función del tipo de superficie y del tipo de base, como puede apreciarse en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4.** Clasificación de los pavimentos asfálticos en el HDM-4 (Adaptado Odoki & Kerali, 2000).

| Tipo de pavimento | Tipo de superficie | Tipo de base | Descripción                                       |
|-------------------|--------------------|--------------|---------------------------------------------------|
| AMGB              | AM                 | GB           | Mezcla asfáltica sobre base granular              |
| AMAB              |                    | AB           | Mezcla asfáltica sobre base asfáltica             |
| AMSB              |                    | SB           | Mezcla asfáltica sobre base estabilizada          |
| AMAP              |                    | AP           | Mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico        |
| STGB              | ST                 | GB           | Tratamiento superficial sobre base granular       |
| STAB              |                    | AB           | Tratamiento superficial sobre base asfáltica      |
| STSB              |                    | SB           | Tratamiento superficial sobre base estabilizada   |
| STAP              |                    | AP           | Tratamiento superficial sobre pavimento asfáltico |

Hay muchas maneras de expresar el deterioro de los pavimentos, para el caso el HDM-4 se clasifican en los siguientes tipos:

#### **Deterioros superficiales.**

En esta categoría se incluyen:

- Agrietamiento
- Desprendimientos
- Baches
- Rotura de borde

De los deterioros anteriores, los tres primeros se caracterizan por dos fases, denominadas *de inicio* y *de progreso*. La fase de inicio se refiere al lapso de tiempo previo al desarrollo de un determinado tipo de deterioro. La fase de progreso comprende el periodo durante el cual se incrementa el área afectada y la magnitud del deterioro. La rotura de borde se modela considerando únicamente la fase de progreso.

#### **Deterioros relacionados con la deformación del pavimento.**

En el HDM-4, la deformación de la estructura del pavimento se modela con:

- Roderas
- Depresiones

Se considera que este tipo de deterioros varían en forma continua, por lo que sólo se modelan mediante ecuaciones de progresión.



### Deterioros relacionados con la textura superficial.

Están relacionados con la capacidad del pavimento para evitar el deslizamiento de vehículos, particularmente en presencia de agua sobre la superficie. Para evaluar el estado del pavimento en este rubro, el HDM-4 utiliza los siguientes indicadores:

- Profundidad de la textura
- Resistencia al deslizamiento

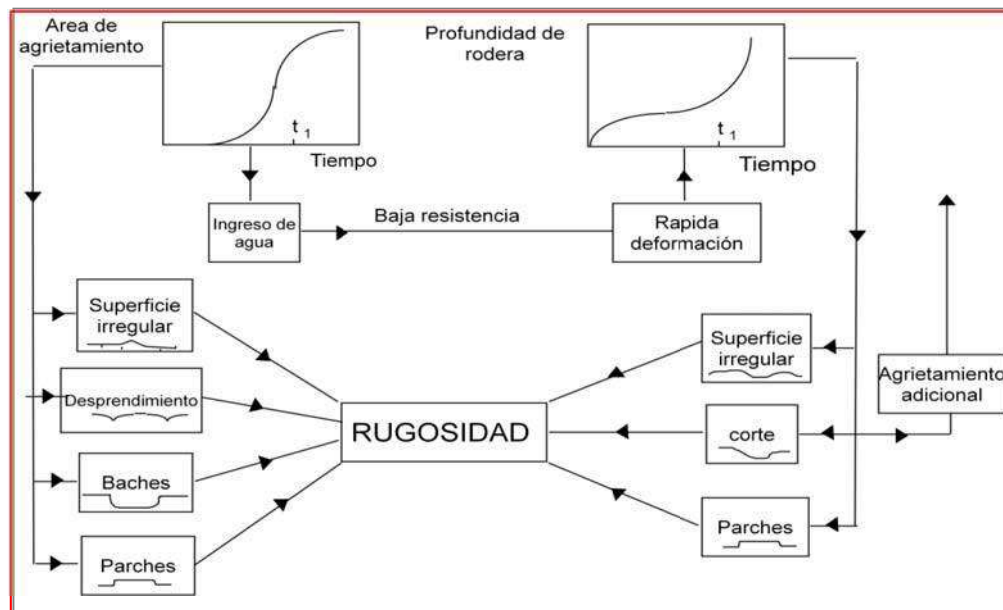
Los parámetros anteriores también varían en forma continua, por lo que, como las roderas o las depresiones, sólo se modelan mediante ecuaciones de progreso.

El HDM-4 modela cada uno de los deterioros anteriores en forma separada, sin embargo, en última instancia, combina los resultados para obtener un pronóstico de la rugosidad del pavimento. La rugosidad del pavimento no es en sí un modo de deterioro, pero es una combinación de los grupos definidos anteriormente.

La tasa de deterioro del pavimento depende de muchos factores, principalmente:

- Las cargas del tráfico
- El medio ambiente
- La resistencia del pavimento (incluyendo la subrasante)
- Los tipos de materiales utilizados en la estructura

Se han llevado a cabo muchas investigaciones para analizar la influencia de estos factores en el deterioro del pavimento. Paterson (1987) describe la investigación sobre las relaciones fundamentales del HDM-III, este fue uno de los primeros análisis que dio origen a los modelos RD. El esquema en que los modelos interactúan entre los diferentes tipos de deterioros se ilustra en la figura 4.4.



**Figura 4.4.** Interacción de los modelos de deterioro del HDM-4 (Adaptado de Riley, 1994).



### 4.3.3. Modelos de deterioro de carreteras (Road Deterioration, RD)

Un estudio de colaboración internacional conocido como “Estudio Internacional de Desarrollo y Gestión de Carreteras” (ISOHDM, por sus siglas en inglés) se inició en 1993 para ampliar el alcance de los modelos del HDM-III. Los modelos del HDM-III fueron estadísticamente estimados de datos recolectados un estudio empírico de varios años realizado en Brasil (GEIPOT, 1982). Las relaciones estadísticas fueron validadas y extendidas a partir de datos de varios estudios de deterioros, tales como, los de Kenya, el Caribe, la India, Texas, etc.

A continuación se hace una breve descripción de las ecuaciones que constituyen los modelos calibrados en nuestro estudio (agrietamiento, roderas e IRI).

#### 4.3.3.1. Modelación del agrietamiento

El agrietamiento es uno de los más importantes deterioros en los pavimentos asfálticos. La fatiga y el envejecimiento han sido identificados como los principales factores que contribuyen al agrietamiento de las capas asfálticas. La propagación de las grietas se acelera a través de la fragilidad provocada por el envejecimiento y el ingreso de agua, que puede debilitar considerablemente las capas inferiores del pavimento.

El HDM-4 considera dos tipos de agrietamientos:

- Agrietamiento estructural. Asociado a las cargas del tráfico y edad/ambiente.
- Agrietamiento térmico. Este es generalmente causado por grandes cambios de temperatura diurna o en condiciones de congelación/deshielo, por lo que solo se produce en ciertos climas. Por lo tanto, no será cubierto en este estudio.

Se utilizan modelos separados para cada tipo de agrietamiento, considerando para su predicción los factores que contribuyen a su desarrollo y progresión.

El análisis del agrietamiento está conformado por dos etapas: la de inicio y la de progreso; además considera dos tipos de agrietamiento, el llamado agrietamiento total, y el agrietamiento ancho, basados en las relaciones desarrolladas por Paterson (1987). El primero, se refiere a la totalidad del agrietamiento estructural, independientemente de su magnitud. El agrietamiento ancho, sólo considera grietas mayores de 3 mm.

#### Inicio del agrietamiento estructural total.

Se supone que se produce cuando el 0.5 % de la superficie de la calzada esta agrietada; el inicio de este tipo de agrietamiento depende del tipo de base. Para el caso de una base estabilizada con una carpeta original (sin sobrecarpeta), como el nuestro, el HDM-4 utiliza la siguiente ecuación para modelar el deterioro:

$$ICA = K_{cia} \{ CDS^2 a_0 \exp[a_1 HSE + a_2 \log_e CMOD + a_3 \log_e DEF + a_4 (YE4)(DEF)] + CRT \} \quad 4.3$$

#### Inicio del agrietamiento estructural ancho.

$$ICW = K_{ciw} MAX[(a_0 + a_1 ICA), a_2 ICA] \quad 4.4$$

Donde:

ICA: tiempo de inicio del agrietamiento estructural total (años)

ICW: tiempo de inicio del agrietamiento estructural ancho (años)

CDS: indicador de defectos de construcción para superficies asfálticas





#### 4. Análisis de los modelos utilizados.

YE4: número anual de ejes equivalentes estándar (millones/carril)

SNP: número estructural promedio

CRT: retardo en la aparición de grietas debido al mantenimiento

DEF: deflexión medida con la viga Benkelman (mm)

CMOD: módulo resiliente del suelo cemento (GPa)

HSE: MIN [100, HSNEW + (1 - KW) HSOLD]

$K_{cia}$ : factor de calibración para el inicio del agrietamiento estructural total

$K_{ciw}$ : factor de calibración para el inicio del agrietamiento estructural ancho

$a_0 - a_4$ : coeficientes del modelo

#### Progresión del agrietamiento estructural total.

La forma general para el modelo de progresión del agrietamiento estructural es la siguiente:

$$dACA = K_{cpa} \left[ \frac{CRP}{CDS} \right] Z_A \left[ (Z_A a_0 a_1 \delta t_A^{a_1})^{1/a_1} - SCA \right] \quad 4.5$$

$$\delta t_A = \text{MAX} \{ [0, \text{MIN}(\text{AGE2} - \text{ICA}), 1] \} \quad 4.6$$

La forma general para el modelo de progresión del agrietamiento estructural ancho es la siguiente:

$$dACW = K_{cpw} \left[ \frac{CRP}{CDS} \right] Z_W \left[ (Z_W a_0 a_1 \delta t_w + SCW^{a_1})^{1/a_1} - SCW \right] \quad 4.7$$

$$\delta t_w = \text{MAX} \{ 0, \text{MIN}[(\text{AGE2} - \text{ICW}), 1] \} \quad 4.8$$

Donde:

$dACA$ : incremento en el área del agrietamiento total durante el año de análisis

$dACW$ : incremento en el área del agrietamiento ancho durante el año de análisis

$\delta t_a$ : fracción del año de análisis, en la cual ocurre el progreso del agrietamiento total

$\delta t_w$ : fracción del año de análisis, en la cual ocurre el progreso del agrietamiento ancho

AGE2: edad del pavimento desde el último resello, sobrecarpeta, reconstrucción o nueva construcción

ICA: tiempo para el inicio del agrietamiento total

ICW: tiempo para el inicio del agrietamiento ancho

CRP: retardo en el progreso del agrietamiento, debido al tratamiento preventivo

$K_{cpa}$ : factor de calibración para la progresión del agrietamiento estructural total

$K_{cpw}$ : factor de calibración para la progresión del agrietamiento estructural ancho

$a_0$  y  $a_1$ : coeficientes del modelo

#### 4.3.3.2. Profundidad de rodera

Las roderas se definen como la deformación permanente o irrecuperable asociada a las cargas del tráfico dentro de las capas del pavimento, la cual se manifiesta en las huellas de las llantas de los vehículos, se acumula con el tiempo y se manifiesta como una depresión (Paterson, 1987).

La modelación de la profundidad de rodera se realiza después de evaluar todos los deterioros de superficie (es decir, agrietamiento, desprendimiento, baches y rotura de borde) al final del año en estudio.



La profundidad total de roderas se basa en la suma de las siguientes componentes:

- Densificación inicial
- Deformación estructural
- Deformación plástica
- Uso de llantas con aditamentos

#### Densificación inicial.

Este fenómeno se relaciona con el grado de compactación relativa de la base, subbase y capas de relleno (COMP). Dicho parámetro se introduce como parte del segmento carretero; cabe destacar que la densificación inicial sólo se modela para el año que sigue a la construcción de la base de un pavimento; no se toma en cuenta para superficies con más de un año de antigüedad.

Esta componente de la profundidad de roderas se calcula como:

$$RDO = K_{rid} [a_0 (YE4^6)^{(a_1 + a_2 DEF)} SNP^{a_3} COMP^{a_4}] \quad 4.9$$

Donde:

RDO: profundidad de las roderas debidas a la densificación inicial

YE4: número anual de ejes equivalentes (millones/carril)

DEF: deflexión promedio medida con viga Benkelman

SNP: número estructural ajustado del pavimento

COMP: compactación relativa (%)

$K_{rid}$ : factor de calibración para la densificación inicial

$a_0 - a_4$ : coeficientes del modelo

#### Deformación estructural.

El modelo de deformación estructural utilizado en HDM-III, fue simplificado en una forma lineal para su inclusión en el HDM-4 (Morosiuk, 1998c). Términos separados son propuestos para la deformación estructural sin agrietamiento y la deformación estructural después del agrietamiento.

Deformación estructural sin agrietamiento.

$$\Delta RDST_{uc} = K_{rst} (a_0 SNP^{a_1} YE4^{a_2} COMP^{a_3}) \quad 4.10$$

Deformación estructural después del agrietamiento.

$$\Delta RDST_{crk} = K_{rst} [a_0 SNP^{a_1} YE4^{a_2} MMP^{a_3} ACX_a^{a_4}] \quad 4.11$$

Donde:

$\Delta RDST_{uc}$ : incremento de la profundidad de roderas debido a la deformación estructural sin agrietamiento, en el año de análisis (mm)

$\Delta RDST_{crk}$ : incremento de la profundidad de roderas debido a la deformación estructural cuando ya existe agrietamiento, en el año de análisis (mm)

MMP: precipitación media mensual (mm/mes)

$ACX_a$ : área del agrietamiento indexado (se refiere a un parámetro que se calcula mediante una ponderación del agrietamiento total y el agrietamiento ancho), al inicio del año de análisis (% del total del área de la calzada)



#### 4. Análisis de los modelos utilizados.

SNP: número estructural ajustado  
 YE4: número anual de ejes equivalentes (millones/carril)  
 $K_{rst}$ : factor de calibración para la deformación estructural  
 $a_0 - a_4$ : coeficientes del modelo

#### Deformación plástica.

El modelo de deformación plástica incluye una variable, CDS, que indica si la superficie es susceptible a la deformación plástica.

Un método más exacto para determinar la deformación plástica de una superficie asfáltica se detalla en La Guía de Calibración y Adaptación del HDM-4. El método incluye el uso de variables para predecir cambios en las propiedades del material, como el punto de reblandecimiento del ligante y los vacíos en la mezcla, para modelar el incremento de la deformación plástica.

El modelo general de la deformación plástica (es decir, sin las propiedades del material) es el siguiente.

$$\Delta RDPD = K_{rpd} CDS^3 a_0 YE4 Sh^{a_1} HS^{a_2} \quad 4.12$$

Donde:

$\Delta RDPD$ : incremento en la deformación plástica durante el año de análisis  
 CDS: indicador de defectos en la construcción de superficies asfálticas  
 YE4: número anual de ejes equivalentes  
 Sh: velocidad de los vehículos pesados  
 HS: espesor total de las superficies asfálticas  
 $K_{rpd}$ : factor de calibración de la deformación plástica  
 $a_0 - a_2$ : coeficientes del modelo

#### Uso de llantas con aditamentos.

Este tipo de componente no fue calibrado debido a que aplica para vehículos con clavos en las llantas para facilitar su desplazamiento en superficies cubiertas de nieve, condición que no se presenta en la sección en estudio.

#### Profundidad total de roderas.

Si la edad de la construcción del pavimento es menor o igual a un año, entonces:

$$\Delta RDM = RDO + \Delta RDPD + \Delta RDW \quad 4.13$$

De otra manera:

$$\Delta RDM = \Delta RDST + \Delta RDPD + \Delta RDW \quad 4.14$$

Donde:

$\Delta RDM$ : incremento en la profundidad media de las roderas en ambas huellas, en el año de análisis  
 RDO: profundidad de roderas debida a la densificación inicial en el año de análisis  
 $\Delta RDST$ : incremento en la profundidad de roderas debida a la deformación estructural en el año de análisis



$\Delta RDPD$ : incremento en la profundidad de roderas debida a la deformación plástica en el año de análisis

$\Delta RDW$ : incremento en la profundidad de roderas debida a la deformación por el uso de llantas con aditamentos

La profundidad total media de roderas para cualquier año es:

$$RDM_b = \text{MIN}[(RDM_a + \Delta RDM_b), 100] \quad 4.15$$

Donde:

$RDM_b$ : profundidad media de roderas en ambas huellas al final del año de análisis

$RDM_a$ : profundidad media de roderas en ambas huellas al inicio del año de análisis

### Desviación estándar de la profundidad de roderas

De acuerdo con los estudios tomados en cuenta para el desarrollo de los modelos de deterioro del HDM-4, la irregularidad del pavimento se correlaciona con la desviación estándar de la profundidad de roderas, la cual se calcula con la expresión:

$$RDS_b = \text{MAX} [0.3, (0.9 - 0.04RDM_b)] RDM_b \quad 4.16$$

Donde:

$RDS_b$ : desviación estándar de la profundidad de roderas al final del año de análisis

$RDM_b$ : profundidad media de roderas al final del año de análisis

### 4.3.3.3. Rugosidad (IRI)

El modelo de rugosidad consiste en la predicción para cada componente de la rugosidad (agrietamiento, desintegración, deformación y mantenimiento). El incremento total de la rugosidad es la suma de estos componentes. Los valores de deterioro de superficie utilizados en la predicción de la rugosidad son los que han sido ajustados para que el área total de la superficie dañada más el área en buen estado sea igual a 100 %.

*Estructural.*

La componente estructural de la rugosidad está relacionada con la deformación de los materiales del pavimento bajo los esfuerzos de corte impuestos por las cargas del tráfico.

$$\Delta RI_s = a_0 \exp (m K_{gm} AGE^3) (1 + SNPK_b)^{-3} YE^4 \quad 4.17$$

Con:

$$SNPK_b = \text{max} [(SNPK_a - dSNPK), 1.5] \quad 4.18$$

Y:

$$dSNPK = K_{snpk} a_0 \{ \min (a_1, ACX_a) HSNEW + \max [\min (ACX_a - PACX, a_2), 0] HSOLD \} \quad 4.19$$

Donde:

$\Delta RI_s$ : incremento de la irregularidad debido a la pérdida de capacidad estructural durante el año de análisis

$dSNPK$ : reducción en el número estructural debido al agrietamiento

$SNPK_b$ : número estructural ajustado, al final del año de análisis



#### 4. Análisis de los modelos utilizados.

$SNP_a$ : número estructural ajustado, al inicio del año de análisis  
 $ACX_a$ : área del agrietamiento indexado (asigna diferentes pesos al área de agrietamiento total y al área de agrietamiento ancho), al inicio del año de análisis  
 $PACX$ : área del agrietamiento indexado de la capa superficial anterior  
 $HSNEW$ : espesor de la carpeta más reciente  
 $HSOLD$ : espesor de la carpeta o carpetas anteriores  
 $AGE3$ : edad del pavimento desde la colocación de la última sobrecarpeta  
 $YE4$ : número anual de ejes equivalentes  
 $m$ : coeficiente del medio ambiente  
 $K_{gm}$ : factor de calibración para el coeficiente del medio ambiente  
 $K_{snpk}$ : factor de calibración para SNPK  
 $a_0 - a_2$ : coeficientes del modelo

##### Agrietamiento.

El cambio en el incremento de la rugosidad debido al agrietamiento está dado por:

$$\Delta RI_c = a_0 \Delta ACRA \quad 4.20$$

Donde:

$\Delta RI_c$ : incremento de la irregularidad debido al agrietamiento durante el año de análisis  
 $\Delta ACRA$ : incremento del área total agrietada durante el año de análisis  
 $a_0$ : coeficiente del modelo

##### Rodera.

El cambio en el incremento de la rugosidad debido a la variación de la profundidad de rodera, está dado por:

$$\Delta RI_r = a_0 \Delta RDS \quad 4.21$$

Donde:

$\Delta RI_r$ : incremento de la irregularidad relacionado con las roderas durante el año de análisis  
 $\Delta RDS$ : incremento de la desviación estándar de la profundidad de roderas durante el año de análisis

##### Baches.

El efecto que producen los baches en la rugosidad depende del número de vehículos que realmente los golpean, el cual a su vez depende del volumen del tránsito y de la libertad de maniobra. Esta última se obtiene como:

$$FM = \{ \max [\min \{0.25 (CW - 3), 1\}, 0] \} \max \{1 - AADT/5000, 0\} \quad 4.22$$

Donde:

$FM$ : libertad de maniobra  
 $CW$ : ancho de calzada  
 $AADT$ : tránsito diario promedio anual





El cambio en la rugosidad es calculado como sigue:

Si no hay parches (TFL = 1) o se especifican las opciones de política de parches al 100%, a continuación:

$$\Delta RI_t = a_0(a_1 - FM) [(NPT_a * TLF + (\Delta NPT * TLF)/2)^{a_2} - NPT_a^{a_2}] \quad 4.23$$

En caso contrario (opciones de políticas parciales):

$$\Delta RI_t = a_0(a_1 - FM) \Delta NPT * (NPT_a + NPT/2)^{a_2} \quad 4.24$$

Donde:

$\Delta RI_t$ : Incremento de la irregularidad debido a los baches durante el año de análisis

$\Delta NPT$ : incremento en el número de baches por km durante el año de análisis

$NPT_a$ : número de baches por kilómetro al inicio del año de análisis

$TLF$ : factor de tiempo debido al mantenimiento de baches

$a_0 - a_2$ : coeficientes del modelo

#### *Efectos ambientales.*

El incremento en el IRI debido a las condiciones ambientales es generado, entre otros factores, por variaciones en la humedad y temperatura de la zona de estudio, y se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta RI_e = m * K_{gm} RI_a \quad 4.25$$

Donde:

$\Delta RI_e$ : Incremento de la irregularidad debido a los efectos climáticos durante el año de análisis

$RI_a$ : Irregularidad al inicio del año de análisis

$m$ : Coeficiente ambiental

$K_{gm}$ : Factor de calibración para el componente de efectos ambientales

#### *Incremento total de la rugosidad.*

El incremento total de la irregularidad del pavimento es:

$$\Delta RI = K_{gp} [\Delta RI_s + \Delta RI_c + \Delta RI_r + \Delta RI_t] + \Delta RI_e \quad 4.26$$

La irregularidad al final del año de análisis está dado por:

$$RI_b = \min [(RI_a + \Delta RI), a_0] \quad 4.27$$

El promedio anual del IRI se obtiene como:

$$RI_{av} = 0.5 * (RI_a + RI_b) \quad 4.28$$

Donde:

$\Delta RI$ : Incremento total de la irregularidad durante el año de análisis

$K_{gp}$ : Factor de calibración para el progreso de la irregularidad

$RI_b$ : Irregularidad del pavimento al final del año de análisis

$RI_a$ : Irregularidad del pavimento al inicio del año de análisis

$RI_{av}$ : Promedio de la irregularidad para el año de análisis



a0: Límite máximo de irregularidad permitido por el HDM-4, (por omisión =16)

#### 4.3.4. Calibración de los modelos HDM

Los datos relacionados con la calibración incluyen principalmente la información de la sección longitudinal referida a los atributos observados al paso del tiempo. Los datos históricos, por ejemplo, que relacionan el desempeño del pavimento para una estrategia de mantenimiento conocida, son necesarios para calibrar las ecuaciones de deterioro.

En este sentido Howard (1994) señala que la calibración efectiva de la predicción del desempeño requiere de datos históricos confiables y representativos que son relacionados al entorno pasado (combinación de estructura, clima, tráfico y actividades de mantenimiento) para el deterioro del pavimento en un periodo sustancial.

En la mayoría de los casos, con respecto al desempeño del pavimento, es posible reunir un número razonablemente fiable de datos relacionados con la construcción del pavimento, pero en general una historia adecuada de la progresión de la rugosidad o de otros parámetros de deterioro no se encuentra disponible. Por lo general, la información que está disponible, por ejemplo, es una estimación (basada en el conocimiento del proceso de construcción) de la rugosidad obtenida después de la construcción y una mediada de la rugosidad actual y de los agrietamientos.

En general se reconoce que los datos fiables son un problema importante, especialmente en las economías de bajos ingresos en los que la práctica moderna de los PMS se encuentra en una etapa de desarrollo. Cabe destacar que cualquier intento de calibrar los modelos, por lo tanto, debe de ser una evaluación crítica en contra de la restricción de los datos. La validez del modelo calibrado dependerá principalmente de las suposiciones o aproximaciones formuladas por el consultor o investigador. Es importante para el usuario final evaluar la suficiencia y pertinencia de todas las hipótesis, usadas en la recalibración. Howard (1994) concluye que:

“Un estudio de calibración muy controlado, no siempre es posible. La calibración del desempeño, aunque se base en lo posible en el retrocálculo de los resultados observados, (en la mayoría de las veces) se basan en el juicio del razonamiento de los resultados previstos por la experiencia local”.

En el mismo tema de la falta de datos suficientes para la calibración (Robertson, 1994) concluye que la calibración de las relaciones del HDM-III eventualmente se basan en una de las tres opciones siguientes:

- 1) Adopción de unos parámetros por defecto, si se considera que las suposiciones por defecto no tendrán una incidencia significativa en el análisis.
- 2) Calibración de datos históricos, por ejemplo, simular el desempeño previsto al “instante” de las observaciones de pavimentos a diferentes edades.
- 3) Calibración de la experiencia, es decir, del juicio basado en el desempeño esperado, sobre la base de conocimientos de ingenieros con experiencia en pavimentos.

Se ha sugerido y de hecho la mayoría de usuarios confían en calibrar los modelos de desempeño del HDM basados en el método de análisis de dispersión del “instante” o “ventanas de observación” de los pavimentos a distintas edades, en vez de la difícil tarea de conseguir el ciclo de vida o una serie de observaciones en el tiempo (Rohde, 1994). El análisis de dispersión se basa en la recolección “al mismo tiempo” de datos de la condición de varios “similares” pavimentos de diferentes edades y diferentes niveles de carga de tráfico. Estos pavimentos diferentes proveen de distintos puntos de la curva de deterioro para una estructura de



pavimento en particular e intensidades de tráfico. En esencia, este proceso implica que la forma fundamental de la relación de predicción individual es aceptable y que la “ampliación” en lugar del cambio de la forma del modelo es suficiente.

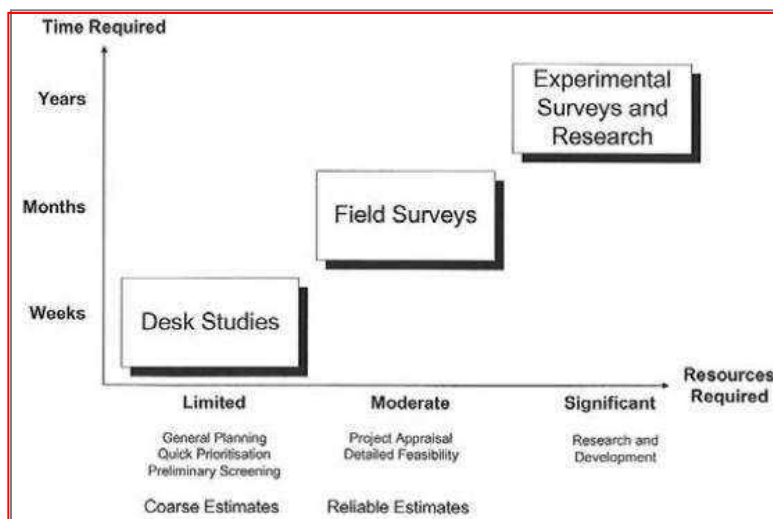
Este enfoque puede lograr resultados razonables si se cuenta con los datos de la construcción del pavimento, así como el histórico de las cargas del tráfico y registros del medio ambiente. Otra vez, en esta suposición es importante que la aplicación de una auscultación al mismo tiempo sea válida para extender el desempeño de la condición a través del punto de observación “al mismo tiempo” el cual ha sido sujeto a continuos factores uniformes como se refleja en la clase factorial adoptada. También se asume que se selecciona una muestra tal que abarca (y es más equilibrado) el espectro de edad que se puede obtener de la red para cada clase de estructura del pavimento y combinación de intensidad de tráfico.

#### 4.3.4.1. Niveles de calibración

El proceso de calibración difiere desde aspectos relacionados con la información que sirve de insumo ya que tiene por objetivo adaptar las predicciones del modelo. Lo cual es relevante debido a que los sub-modelos del HDM, RUE y RDWE contienen un gran número de parámetros que pueden ser ajustados.

Es posible obtener diferentes niveles de calibración empírica en función de la disponibilidad de datos, la financiación de la investigación y el tiempo disponible antes de que los resultados se definan. Un resultado más detallado y sólido se puede esperar si la calibración se basa en datos de alta precisión recogidos y analizados de acuerdo a los principios estadísticos. La realidad de la información de la condición de las carreteras es que se pueden recolectar con diferentes niveles de precisión, exactitud y sofisticación. Para la calibración de orden inferior, datos de la condición normal de nivel de red pueden ser apropiados. Sin embargo, con cualquier aumento de la precisión requerida en el proceso de calibración, el correspondiente aumento en la calidad de los datos también será requerido. Esto incluso puede requerir una prueba de desempeño a gran escala para obtener los datos necesarios (Henning, 2006).

El enfoque de modelación del HDM permite diferentes niveles de calibración, dependiendo del resultado previsto en el estudio. La figura 4.5 ilustra la relación entre los recursos y el tiempo requerido para completar los diferentes niveles de estudios de calibración.



**Figura 4.5.** Presentación conceptual de los recursos y el tiempo requeridos para la calibración (Adaptado de Bennett & Paterson 2000).



##### **Nivel 1. Aplicación.**

En un nivel más bajo, sólo los estudios de escritorio se realizan y se limitan sobre todo a los datos de nivel de red. Este nivel corresponde al nivel 1- Aplicación de acuerdo a la terminología del HDM.

Para ejecutar el HDM siempre es necesario llevar a cabo por lo menos el nivel 1 de calibración, lo que puede ser visto como una puesta a punto de una inversión para el modelo. Una vez que esto se ha realizado, por lo general no necesita ser repetido para la mayoría de los archivos de datos utilizados para alimentar el modelo en aplicaciones futuras en el mismo país ya que varios elementos de datos y la mayoría de los parámetros del modelo son relativamente estables en el tiempo.

El nivel 1 de calibración se basa principalmente en fuentes secundarias, es decir, se trata de un deterioro teórico. Por ejemplo, los parámetros RUE se pueden estimar a partir de datos de fuentes tales como las publicaciones del gobierno y la industria, organizaciones profesionales o varios informes de RUE a partir de estudios anteriores. Para el deterioro de las carreteras, las fuentes pueden incluir datos estadísticos del clima, tráfico y de la condición, normas de proyecto geométrico, programas de mantenimiento y presupuestos.

Se puede suponer que la mayoría de los parámetros por defecto del modelo HDM son apropiados para las condiciones locales de modo que solo es necesario abordar los más críticos.

- Costos unitarios (RUE y RDWE)
- Ciertas características representativas de los vehículos.
- Análisis económico de los datos (tasas de descuento y periodo de análisis)
- Características del pavimento (estudios RDWE)
- Composición del tráfico y tasas de crecimiento
- Tipos regionales de clima

Mientras que a menudo el HDM requiere una amplia gama de datos de entrada y parámetros de calibración, pero solo que es necesario establecer los más importantes para el nivel 1 de calibración, por lo que muchos de los valores predeterminados del HDM deben de ser utilizados exclusivamente.

##### **Nivel 2. Calibración.**

El siguiente nivel consiste en algunos estudios de campo y un aumento de los recursos comprometidos con el análisis de la calibración. Este es el nivel 2-Calibración. Por lo general, se esperaría que los coeficientes del modelo sean ajustados basados en este nivel de estudio.

El nivel 2 de calibración utiliza mediciones directas de las condiciones locales para verificar y ajustar la capacidad predictiva del modelo. Se requiere de un mayor grado de recolección de datos y precisión en comparación con el nivel 1 de calibración y ampliar el ámbito de aplicación. Para RUE, se concentra en la velocidad, el consumo de combustible, el consumo de neumáticos, consumo de partes y costos fijos relacionados con la vida y utilización del vehículo. Para RDWE, se concentra en la iniciación de los modos de deterioro de superficie, progresión del ahuellamiento y efectos de mantenimiento y aumenta la estimación de los impactos ambientales. Para el análisis económico, los datos vinculados a los costos están más de cerca a los datos observados y los niveles de los precios se obtienen a través de encuestas de datos.

Con el nivel de calibración 2, los datos de entrada son recolectados también con más detalle que con el nivel 1.



### Nivel 3. Adaptación.

Al más alto nivel, las auscultaciones experimentales y de investigación a gran escala se llevan a cabo. Corresponde a los niveles de investigación utilizados durante el desarrollo inicial de los modelos de deterioro. Por lo tanto, es posible desarrollar nuevos modelos o ajustar los formatos de los modelos en este nivel de calibración.

El nivel 3 de calibración consta generalmente de dos componentes:

- Una mejor recopilación de datos
- Una investigación fundamental

Algunos elementos de los datos se pueden estimar con una precisión razonable utilizando cuentas a corto plazo, por ejemplo, la distribución horaria del volumen de tráfico, pero la confiabilidad es mucho mayor mediante la recopilación de datos a través de varios sitios durante periodos más largos.

La investigación fundamental considera las relaciones utilizadas en el HDM. Consiste en auscultaciones estructuradas y estudios experimentales realizados bajo condiciones locales los cuales llevan a relaciones alternativas. Por ejemplo, las funciones alternativas pueden ser desarrolladas para la predicción del consumo de combustible o el deterioro del pavimento y nuevas funciones de efectos de mantenimiento para diferentes tipos de pavimentos. Este trabajo requiere de un gran compromiso con la buena calidad, investigación de campo bien estructurada y el análisis estadístico en un periodo de varios años. La investigación del deterioro en el pavimento es un esfuerzo particular a largo plazo, por lo general requiere un mínimo de 5 años.



## Capítulo 5.

# Descripción y características de la sección de estudio.

### 5.1. Introducción

Debido a que el proceso de aplicación de los modelos de predicción requiere incorporar parámetros referentes a la sección de estudio, en este capítulo mencionaremos los procedimientos adoptados para realizar esta tarea.

En primer lugar haremos una descripción de la sección en estudio, los motivos por los que se seleccionó y las características que le dan un alto valor experimental al estudio. Posteriormente describiremos la información de la condición del pavimento, este apartado se dividió en dos etapas: los trabajos realizados en campo en el año 2010 y la información recopilada de la evolución de la condición del desempeño a partir de los trabajos de reconstrucción, además de los históricos del tráfico y las condiciones climáticas de la zona.

Los trabajos de campo consistieron en medir las características del pavimento por medio de equipos de alto rendimiento, como el vehículo PathRunner para medir las características superficiales (IRI, Macrotextura, Inventario de Deterioros y Profundidad de rodera). El equipo Mu Meter fue utilizado para evaluar la resistencia al deslizamiento y el deflectómetro de impacto (HWD) para evaluar la capacidad estructural del pavimento.

Las tareas de recopilación de información consistieron en obtener la evolución de los indicadores evaluados con campañas anuales de monitoreo de la sección de estudio, los datos históricos del tráfico a partir de los trabajos de reconstrucción y las condiciones ambientales de la zona.





## 5.2. Sección de estudio.

La autopista México-Querétaro es una de las carreteras más transitadas de México, además de que es una vía de gran importancia que comunica la zona Centro-Sur con el Norte del país, a través de dos ejes troncales: México-Nuevo Laredo y Querétaro-Cd. Juárez. El tramo comprendido entre la ciudad de México y Querétaro es el que mayor volumen vehicular presenta y actualmente con la apertura del Arco Norte de la Cd. de México se ha incrementado sustancialmente, sobre todo en la circulación de vehículos pesados.

La sección en estudio forma parte de la autopista México-Querétaro, iniciando en el kilómetro 132+800 y finaliza en el 147+915 en la caseta de Palmillas, con una longitud de 15.11 km y cuenta con tres carriles de circulación en cada sentido. En la figura 5.1 se observa la localización de la sección de estudio.



Figura 5.1. Localización de la sección de estudio (fuente: Google Maps)

Se seleccionó esta sección ya que se cuenta con información de la evolución del desempeño del pavimento desde su reconstrucción en el año 2005 hasta el año 2010, además de que es una de las carreteras de mayor importancia del país, datos de la Dirección General de Conservación de Carreteras señalan que esta carretera es la segunda más transitada del país. Según la información recopilada del proyecto de reconstrucción la estructura actual se diseñó para un periodo de vida de 15 años, con un Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) de 28, 098 para el proyecto, con una tasa de crecimiento del 4%.

Los trabajos consistieron en fresar y recuperar 210 mm de espesor del pavimento existente, este material fue colocado como subrasante en las ampliaciones, posteriormente se fresaron 300 mm para conformar la base estabilizada, a este material se le agregó material con calidad de base en un 30 % del PVSS del material fresado y para estabilizarlo se mezcló con un 9 % de cemento Portland para formar una capa estabilizada de 400 mm. Después se colocó una capa de mezcla asfáltica densa con espesor de 100 mm y una capa de rodadura de 40 mm de espesor. La estructura final se muestra en la tabla 5.1, la clasificación del material fue hecha en base a sondeos simplificados para verificar los espesores obtenidos con el GPR en el año 2008.



**Tabla 5.1.** Capas constituyentes del pavimento.

| Capa                          | Espesor (mm) | Clasificación del material                                                 |
|-------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Asfáltica                     | 140          | Capas asfálticas                                                           |
| Base estabilizada con cemento | 400          | Mezcla de grava arena y cemento Portland. TM $\frac{3}{4}$ " seca y densa. |
| Sub-base                      | 200          | Mezcla de grava con arena limosa gris, humedad regular y compacta          |
| Subrasante                    | 200          | Arena limosa café con grava, humedad regular y compacta.                   |

### 5.3. Información de la sección de estudio

Durante esta etapa de la investigación se realizaron diversas tareas para obtener la información de la sección de estudio, sin embargo, para acotar la descripción de los datos obtenidos, la dividiremos en dos bloques. El primer bloque describe las pruebas de campo realizadas en el año 2010 en la sección de estudio para evaluar los indicadores de desempeño que servirán de insumo para la aplicación de los modelos de predicción. En el segundo bloque se muestra la información recopilada de la evaluación del desempeño de la sección del año 2005 al año 2009, la información de la estructura del pavimento, los datos del tráfico y las condiciones climáticas.

La información descrita en este apartado es esencial para la aplicación de los modelos de predicción analizados en la investigación, cada uno estos modelos requiere de distintos parámetros para ser aplicado, sin embargo, el procesamiento realizado a los datos antes de introducirlos a los sistemas de gestión se describirá en el siguiente capítulo.

#### 5.3.1. Evaluaciones de campo

Para evaluar las características del pavimento de la sección de estudio en junio del año 2010 se realizó una evaluación de las condiciones funcionales (IRI, profundidad de rodera, macrotextura, resistencia al deslizamiento) y estructurales (con deflectómetro de impacto e inventario de deterioros) empleando equipos de alto rendimiento, a continuación se describe cada uno de los equipos utilizados en la evaluación, su principios de funcionamiento y la información recogida con ellos.

##### 5.3.1.1. Características de superficie

Las condiciones de superficie se evaluaron con el equipo automatizado "PathRunner" (figura 5.2). Este es un vehículo de alto rendimiento que puede operar en un rango de 20 a 120 km/h, cuenta con un software de recolección de datos que permite al personal de operación contar con controles en tiempo real para verificar la precisión de la información recogida. Este permite observar gráficos en tiempo real de la operación de los acelerómetros, sensores laser, transductores de distancia, receptor GPS, etc., para comprobar el buen funcionamiento del sistema. Cuenta con una aplicación de monitoreo para el auto-análisis de datos recopilados y una animación de voz que proporciona la regeneración audible de datos o equipos que operan fuera de los límites esperados.



A continuación se hace una breve descripción de la metodología empleada por el PathRunner para recoger la información de la condición del pavimento.



Figura 5.2. Vistas frontal y trasera del PathRunner

**Datos de la rugosidad de la carretera.** El sistema de recolección incluye laser de perfiles tipo Dakota del Sur fabricados en base al activo clase 1 (ASTM E950). La recolección del perfil dinámico de la superficie del pavimento se utiliza para calcular el IRI y otros índices como el HRI y PSI. El modelo de cuarto de carro puede ser utilizado para proporcionar datos de IRI tanto para la rodera izquierda y derecha. Estos índices de rugosidad del pavimento se pueden presentar como el promedio de las dos roderas y con diferentes intervalos definidos por el usuario. Los datos también pueden ser clasificados en base a una gama de rangos definidos por el usuario como bajo, medio y alto. En este caso el sistema produce un informe que muestra el porcentaje de la sección analizada que cae bajo cada intervalo.

Los sensores incluyen un acelerómetro en cada trayectoria de las ruedas, un sensor laser y un transductor de distancia. A continuación se presenta una breve descripción del procedimiento para calcular el perfil:

“La señal del voltaje de entrada de la aceleración es convertida en una distancia que representa la altura por medio de un proceso de filtrado e integración matemática a una frecuencia específica. Para cada distancia definida el sistema computacional lee las salidas del sensor laser y calcula la altura del vehículo al pavimento. El perfil es calculado restando la distancia calculada desde el acelerómetro a partir de la distancia calculada del sensor laser. El perfil es filtrado y almacenado en el disco duro de la computadora en tiempo real”.

La evaluación de la rugosidad de la sección de estudio consistió en evaluar cada uno de los carriles de circulación, en las gráficas de la figura 5.3 y 5.4 se observa la variación del IRI para cada carril evaluado.

**Sistema de medición de roderas.** El sistema de recolección del PathRunner permite las opciones para obtener los datos de rodera usando tecnología de tres, cinco o un escaneo de sensores laser. Para este proyecto, el vehículo PathRunner tiene incorporados laser marca INO en el Sistema de Medición de Roderas Laser (LRMS) para detectar y caracterizar las roderas del pavimento. La capacidad de adquisición de este sistema es de 3.60 metros de ancho de perfil a cada 1.2-1.5 metros a velocidad de tráfico normal, el sistema utiliza dos perfiles laser



## 5. Descripción y características de la sección.

para adquirir la sección del pavimento. La óptica personalizada y los laser de alta potencia por pulsos de línea permiten al sistema recolectar y procesar el perfil de las carreteras en tiempo real. Además, los algoritmos de análisis de roderas fueron desarrollados para la medición automática de roderas de radio corto o amplio y para la medición de la profundidad de rodera. Cerca de 1300 puntos en un ancho de 3.60 m de carril son recopilados y almacenados cada 0.25 mm para cada rodera del carril, en las gráficas 5.5 y 5.6 se muestra la información de la profundidad de rodera medida en cada carril de circulación. Estos datos detallados de rodera la pueden ser mostrados simultáneamente con todos los datos de los demás sensores laser, incluyendo la geometría del camino mediante una representación gráfica de la superficie transversal del perfil del pavimento.

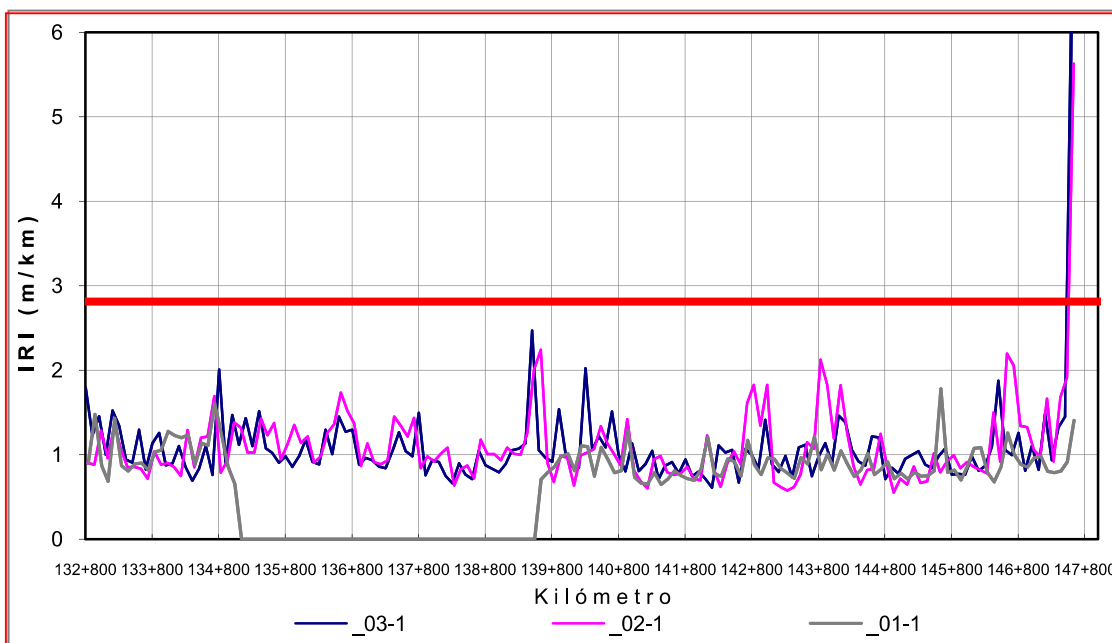


Figura 5.3. Datos de IRI para el cuerpo 1 de la sección de estudio.

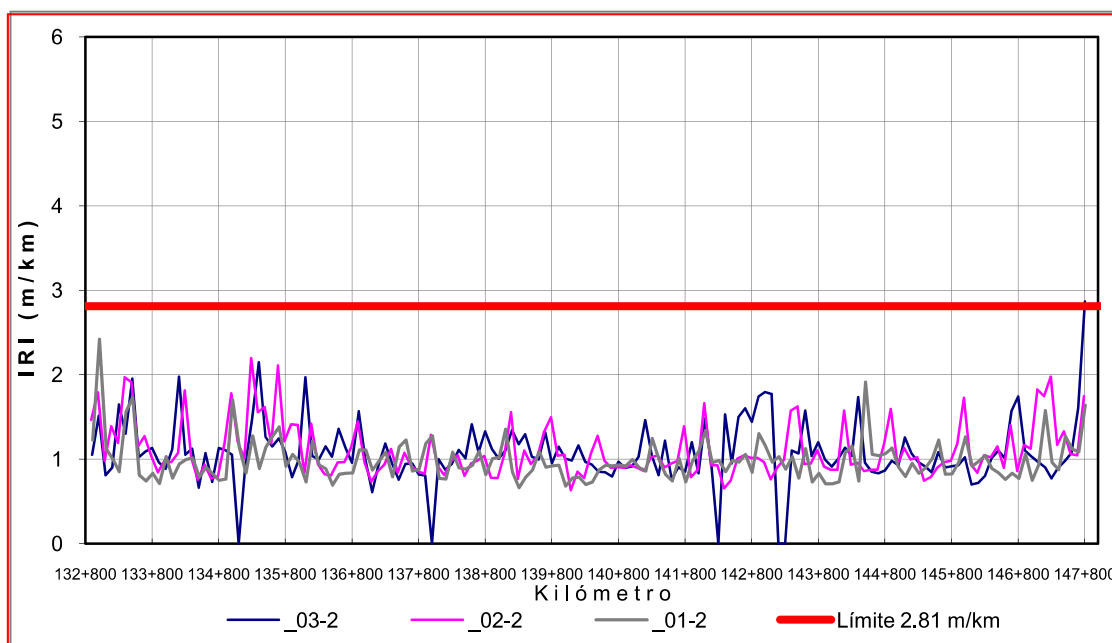


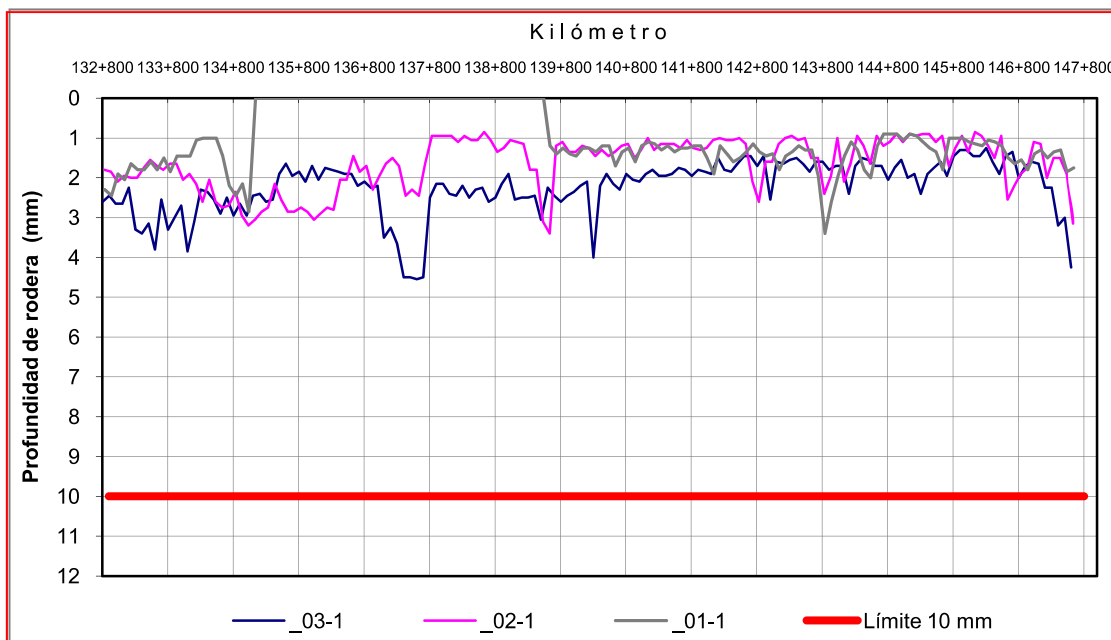
Figura 5.4. Datos de IRI para el cuerpo 2 de la sección de estudio.



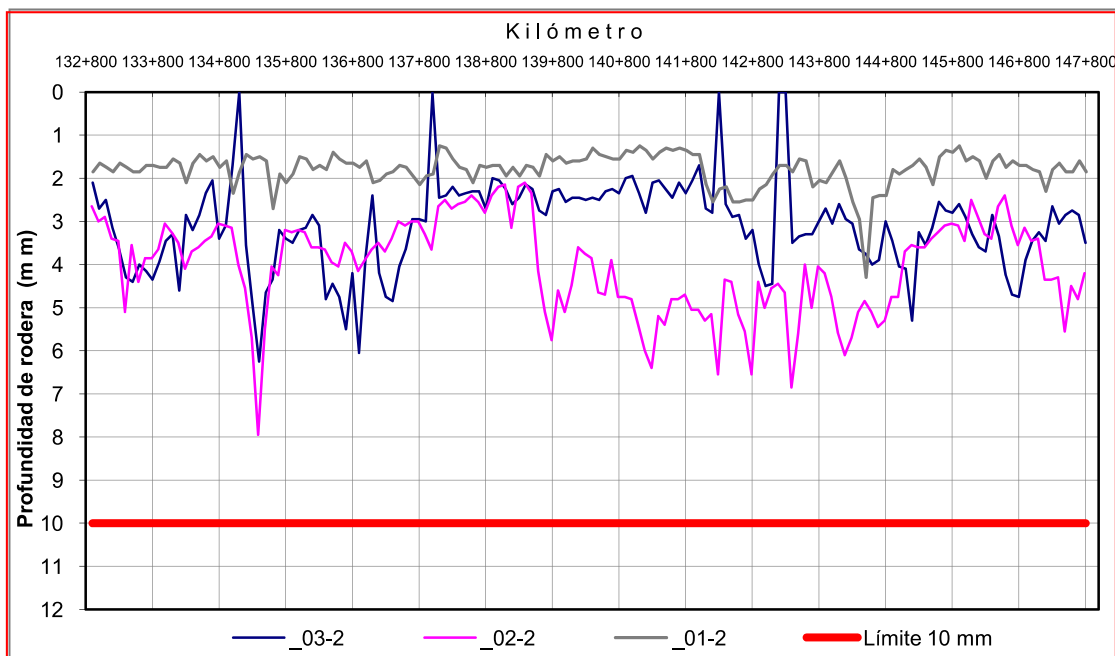


## 5. Descripción y características de la sección.

Dentro de las funciones de la estación de trabajo del PathRunner también permite mostrar los datos de roderas en una imagen de tres dimensiones, la cual proporciona una rotación completa de la simulación del perfil de la carretera (incluyendo una visión de la superficie de la carretera desde abajo) para representaciones gráficas inigualables de la superficie del pavimento.



**Figura 5.5.** Datos de Profundidad de rodera para el cuerpo 1 de la sección de estudio.

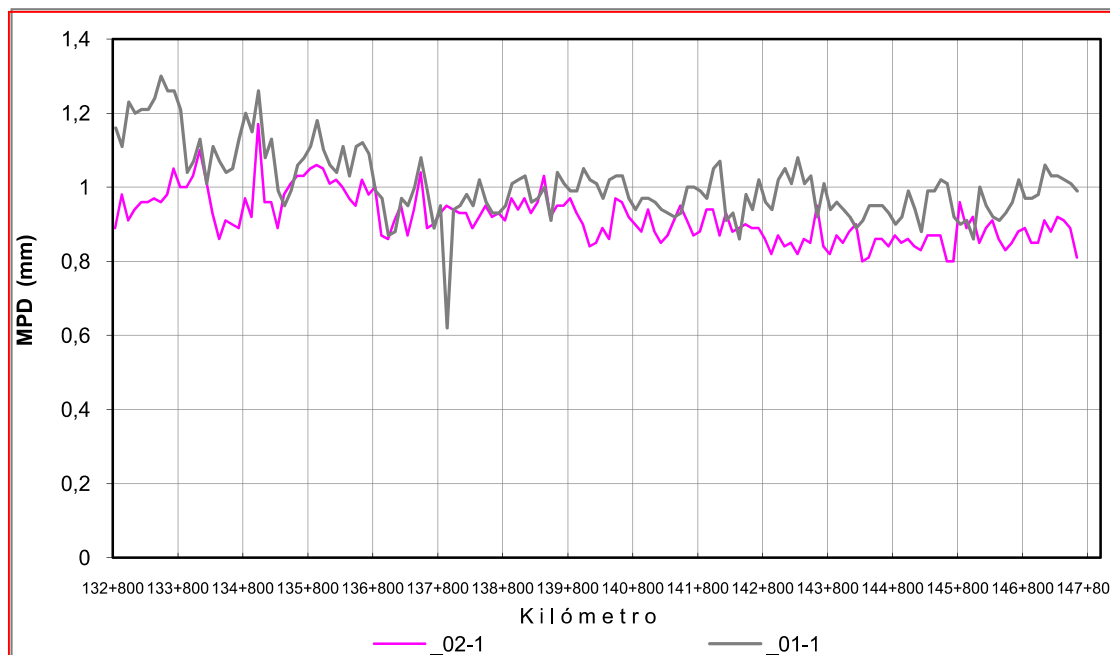


**Figura 5.6.** Datos de Profundidad de rodera para el cuerpo 2 de la sección de estudio.

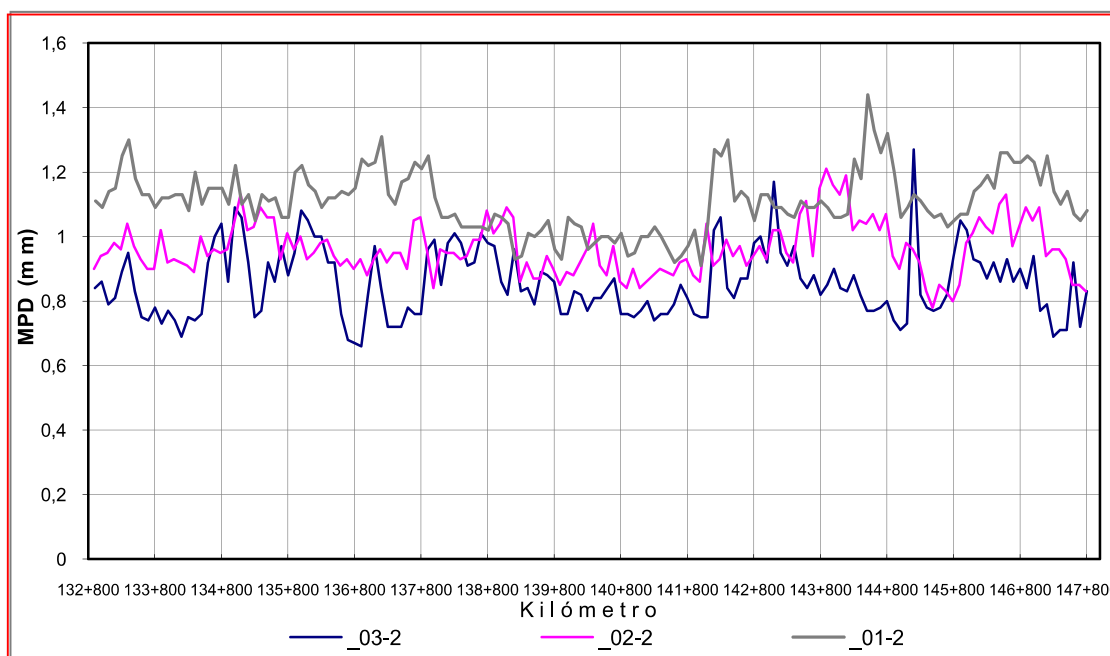


## 5. Descripción y características de la sección.

**Macrotextura.** Otras de las funciones de equipo permiten obtener la profundidad media del perfil a velocidades de operación de las carreteras. Capturando 100 mm de ráfagas de datos cada metro a hasta una velocidad de 120 km/h, el sistema es capaz de capturar y reportar los datos de la profundidad media del perfil de macrotextura de acuerdo a la norma ASTM E1845-01. En las gráficas 5.7 y 5.8 se observan las profundidades medias del perfil de macrotextura obtenidos en cada carril de la sección de estudio.



**Figura 5.7.** Profundidad media del perfil de macrotextura para el cuerpo 1 de la sección de estudio.



**Figura 5.8.** Profundidad media del perfil de macrotextura para el cuerpo 2 de la sección de estudio.





**Imágenes de perspectiva.** Este tipo de imágenes permite recolectar y posteriormente cuantificar los activos de la red, como pueden ser señales, marcadores, puentes, defensas metálicas y la geometría de la superficie. Todo este tipo de imágenes y los datos obtenidos con el PathRunner se encuentran referenciados con un sistema de posicionamiento global, ya que incorpora un GPS de alta definición.



**Figura 5.9.** Imagen de perspectiva obtenida con el PathRunner.

En la tabla 5.2 se presenta un resumen de los diferentes indicadores evaluados con el equipo PathRunner, así como los límites especificados para este tipo de carretera en la sección de estudio de la autopista México-Querétaro del kilómetro 132+800 al 147+917.

**Tabla 5.2.** Valores de características auscultadas.

| Característica             | Carril central (promedio) |          | Límite |
|----------------------------|---------------------------|----------|--------|
|                            | Cuerpo A                  | Cuerpo B |        |
| IRI (m/km)                 | 1.09                      | 1.11     | 2.81   |
| Profundidad de rodera (mm) | 1.64                      | 3.98     | 10     |
| Macrotextura (mm)          | 0.92                      | 0.96     | -      |

### 5.3.1.2. Resistencia al deslizamiento

Una de las principales características que debe cumplir un pavimento, es la de disponer de una superficie que asegure una buena adherencia con los neumáticos especialmente en zonas de frenado, curvas y en condiciones de pavimento mojado, la resistencia al deslizamiento es una característica fundamental para la seguridad de los usuarios con lo que se disminuye el riesgo potencial de accidentes.

La resistencia al deslizamiento va disminuyendo con el tiempo, llegando a constituirse en un indicador del comportamiento funcional del pavimento, haciendo necesario la implementación

## 5. Descripción y características de la sección.

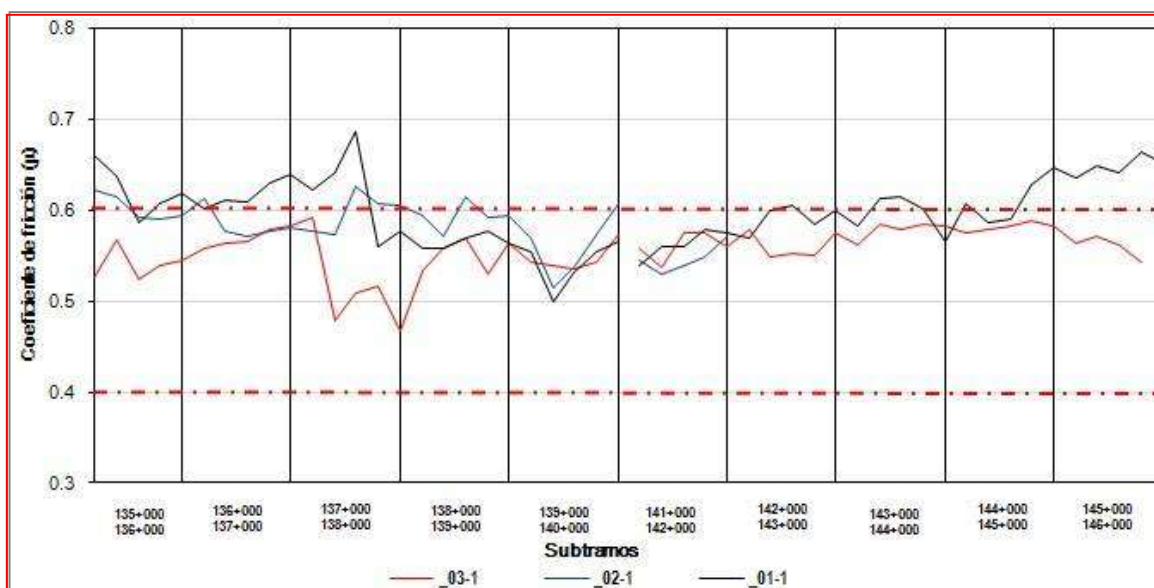
de programas de gestión que aseguren que la superficie cuente con la fricción necesaria para reducir al mínimo el riesgo de accidentes producidos por deslizamiento.

El coeficiente de fricción es una forma indirecta de estimar la resistencia al deslizamiento y se puede medir en forma continua, mediante el uso de equipos de alto rendimiento. Para el caso de nuestra evaluación se realizó con el equipo denominado Mu-Meter MK6 (figura 5.10), que cumple con los requerimientos especificados en la norma ASTM E-670-94.

Debido a la influencia del agua en esta propiedad, el ensayo esta normalizado en condiciones de pavimento mojado, velocidad y tipo de neumáticos. En la evaluación realizada en la autopista México-Querétaro, la velocidad de prueba fue de 75 km/h y se aplicó un espesor de película de agua de 0.5 mm, conforme a la norma de la SCT N CTR CAR 1 04 010/09; Capas de Rodadura con Mezcla Asfáltica en Caliente. En las figuras 5.11 y 5.12 se observan los datos obtenidos del coeficiente de fricción en el carril central para los dos cuerpos.



**Figura 5.10.** Equipo Mu-Meter MK6.



**Figura 5.11.** Coeficiente de fricción obtenido con el Mu-Meter MK6, cuerpo 1.

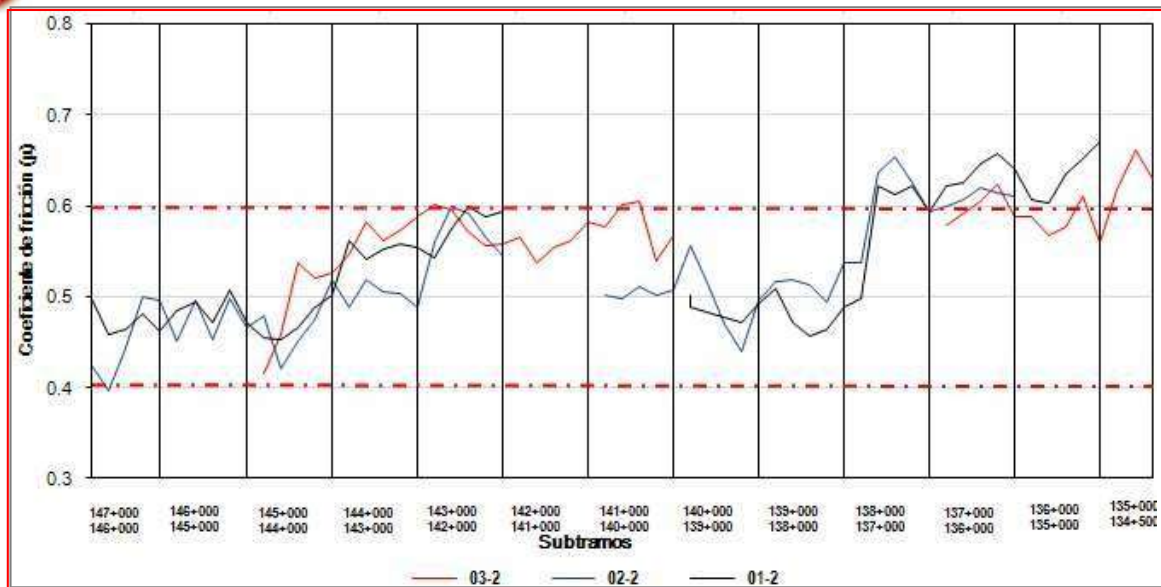


Figura 5.12. Coeficiente de fricción obtenido con el Mu-Meter MK6, cuerpo 2.

### 5.3.1.3 Propiedades estructurales.

Dentro de todo sistema de gestión de pavimentos el conocimiento de la condición o capacidad estructural es indispensable para definir el alcance y la estrategia de los trabajos de mantenimiento o rehabilitación adecuados para una sección de pavimento.

El deflectómetro de impacto (HWD) (figura 5.13), es un dispositivo de prueba no destructivo capaz de aplicar un impulso de carga con una duración de 20-30 milisegundos de duración, el cual se aproxima al efecto producido por una rueda de un vehículo a una velocidad de 50-80 km/h, pudiendo incluso simular el efecto producido por un avión Boeing 727.



Figura 5.13. Deflectómetro de Impacto (HWD).

Las condiciones a las que se evaluó la sección de prueba fueron las siguientes:

- Carga aplicada: 40 KN
- Número de geófonos: 7
- Número de golpes: 4



## 5. Descripción y características de la sección.

De la información obtenida con el deflectómetro de impacto, los valores de deflexión máxima ( $D_0$ ) (figuras 5.14 y 5.15) son los de mayor importancia ya que son un dato indispensable para alimentar los programas de gestión. Otro de los parámetros de interés obtenidos con el HWD son los módulos de las capas de la estructura del pavimento, los cuales se obtienen a través de una técnica conocida como “retrocálculo”.

Existen diversos programas con los cuales se puede realizar el proceso de retrocálculo, en nuestro caso emplearemos el ELMOD6 (Evaluation of Layer Moduli and Overall Design) creado por Dynatest. Fundamentalmente este programa se basa en los modelos de un pavimento con un sistema de capas elásticas usando la solución de las ecuaciones de Odemark-Boussinesq, que incorpora soluciones para materiales con propiedades no lineales (comúnmente exhibidos en subrasantes compuestas de materiales cohesivos). La tabla 5.3 contiene los módulos obtenidos para las capas del pavimento en la sección de estudio.

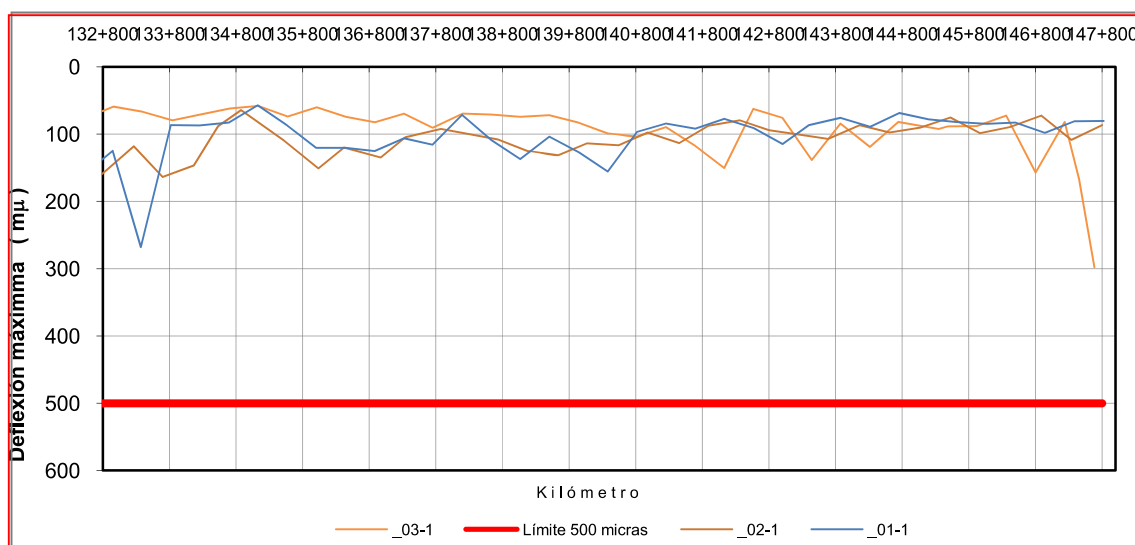


Figura 5.14. Deflexiones máximas obtenidas para el cuerpo 1.

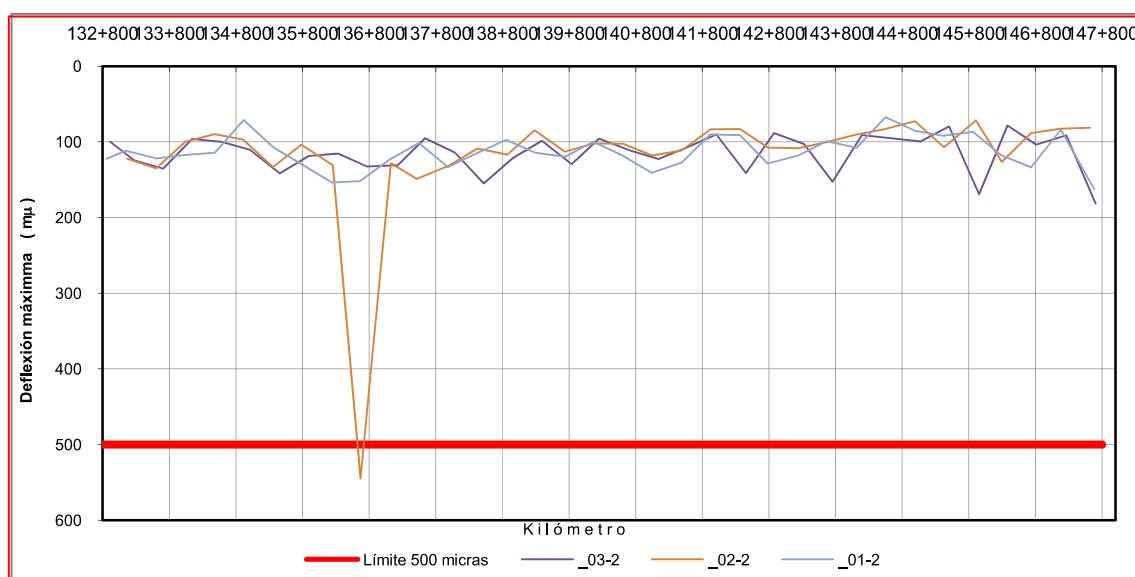


Figura 5.15. Deflexiones máximas obtenidas para el cuerpo 2.





#### 5.3.1.4 Inventario de deterioros

La medición de los deterioros de superficie abarca una amplia gama de daños, desde baches y agrietamientos hasta deformaciones de superficie como las roderas.

Hay tres tipos de metodologías para la recolección de los deterioros.

- Técnicas manuales, las cuales se basan en las inspecciones visuales de los deterioros por parte de personal de campo, los datos son anotados en formatos preestablecidos generalmente de papel.
- Técnicas de imágenes, implica tomar fotografías de la superficie, ya sea de forma puntual o continua y posteriormente las imágenes son analizadas para identificar y reportar los deterioros.
- Empleando perfiles obtenidos mediante laser o técnicas acústicas.

**Tabla 5.3.** Módulos elásticos obtenidos por retrocálculo (MPa).

| Cuerpo | Subrasante | Base estabilizada<br>(cemento Portland) | Capa asfáltica |
|--------|------------|-----------------------------------------|----------------|
| 1      | 242        | 7669                                    | 4479           |
| 2      | 233        | 7772                                    | 3505           |

Para propósitos de realizar el inventario de deterioros en la sección de prueba se tomaron imágenes de la superficie y posteriormente en la estación de trabajo se identificaron y cuantificaron los deterioros; debido a que cada modelo utilizado clasifica a los deterioros de forma distinta, se emplearon dos metodologías para cuantificar los deterioros en la sección de estudio. En la imagen 5.16 se observa un ejemplo de los deterioros observados en el tramo de prueba.



**Figura 5.16.** Imagen de la estación de trabajo en el proceso de las imágenes de superficie.





### 5.3.2. Información del historial del desempeño, tráfico y clima

La evolución del desempeño evaluado a partir de los trabajos de reconstrucción consistió en mediciones anuales del IRI y profundidad de rodera por medio de equipos automatizados de alto rendimiento con laser en la tabla 5.4 y 5.5 se presenta un resumen de los valores obtenidos en las evaluaciones.

**Tabla 5.4.** Resumen de los datos de las campañas anuales de evaluación de IRI.

| Año  | CUERPO 1 |       |       | CUERPO 2 |       |       |
|------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
|      | _01-1    | _02-1 | _03-1 | _01-2    | _02-2 | _03-2 |
| 2005 | 1.95     | 1.73  | 3.32  | 2.40     | 2.26  | 3.33  |
| 2006 | 1.50     | 1.40  | 1.34  | 1.62     | 1.61  | 1.85  |
| 2007 | 1.36     | 1.28  | 1.29  | 1.23     | 1.45  | 1.26  |
| 2008 | 1.05     | 1.19  | 1.09  | 1.14     | 1.23  | 1.13  |
| 2009 | 1.44     | 1.40  | 1.38  | 1.39     | 1.45  | 1.40  |

**Tabla 5.5.** Resumen de los datos de las campañas anuales de evaluación de Profundidad de rodera.

| Año  | CUERPO 1 |       |       | CUERPO 2 |       |       |
|------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
|      | _01-1    | _02-1 | _03-1 | _01-2    | _02-2 | _03-2 |
| 2005 | 2.13     | 2.53  | 1.31  | 1.43     | 1.40  | 2.22  |
| 2006 | 0.53     | 0.47  | 1.16  | 1.53     | 0.68  | 1.50  |
| 2007 | 1.31     | 1.35  | 0.82  | 1.46     | 0.91  | 1.09  |
| 2008 | 0.39     | 1.43  | 1.22  | 0.85     | 1.03  | 1.10  |
| 2009 | 2.22     | 2.61  | 2.30  | 2.97     | 2.33  | 5.70  |

Durante el año 2008 se realizó una campaña de evaluación de la condición de la sección de estudio, durante esta evaluación se midieron las características funcionales (IRI, resistencia al deslizamiento, macrotextura) y estructurales (con deflectómetro de impacto e inventario de deterioros).

**Tabla 5.6.** Evolución del tráfico en la sección de estudio.

| Tipo de Vehículo | TDPA 2005 | TDPA 2006 | TDPA 2007 | TDPA 2008 | TDPA 2009 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                  | % X VEH   | % X VEH   | % X VEH   | % X VEH   | % X VEH   |
| A                | 57.10     | 56.80     | 57.25     | 57.27     | 57.70     |
| B                | 4.50      | 4.70      | 5.65      | 4.67      | 5.00      |
| C2               | 7.90      | 7.70      | 6.75      | 7.17      | 7.00      |
| C3               | 8.90      | 8.60      | 7.75      | 7.87      | 7.70      |
| T3-S2            | 15.70     | 16.10     | 16.25     | 16.67     | 16.30     |
| T3-S3            | 2.30      | 2.40      | 2.25      | 2.07      | 1.90      |
| T3-S2-R4         | 3.60      | 3.70      | 4.10      | 4.30      | 4.40      |



Los datos anuales de tráfico fueron obtenidos de los datos viales publicados por la Dirección General de Servicios Técnicos. Los volúmenes de tránsito utilizados fueron registrados en las casetas de cobro de Autopistas y Puentes de Cuota, los datos se tomaron en la caseta de Palmillas, en el km 147+917, en la tabla 5.6 se muestra un resumen de los datos. Estos representan el volumen de tráfico para los dos sentidos de circulación, dentro de la información recopilada también se incluye la composición vehicular.

Las características de las condiciones climáticas son relevantes sobre todo para la aplicación del HDM-4, ya que este incorpora al análisis los aspectos climatológicos mediante parámetros relacionados con la humedad y la temperatura. Para caracterizar las condiciones de humedad se utilizan variables que describen la precipitación y la humedad libre en la zona de estudio, mientras que las condiciones de temperatura se especifican con base en promedios anuales, rangos de variación mensual y número de días con temperaturas por arriba de un cierto límite. En la tabla 5.7 se resumen los datos obtenidos para el año 2010 de la estación climatológica CEA-PROTECCION CIVIL SJR, San Juan Del Rio, QUERETARO, así como la información requerida del clima por el HDM-4.

**Tabla 5.7.** Condiciones climáticas relacionadas para la sección de estudio.

| Mes        | Temp MAX °C | Temp MIN °C | TRANGE °C | Temp Prom °C | Precip mm |
|------------|-------------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Enero      | 26.4        | 3.3         | 23.1      | 12.9         | 9.4       |
| Febrero    | 24.9        | 3.3         | 21.6      | 13.9         | 81.8      |
| Marzo      | 28.5        | 6.5         | 22        | 18           | 2         |
| Abril      | 30.7        | 10.8        | 19.9      | 19.7         | 7.1       |
| Mayo       | 33.3        | 12.6        | 20.7      | 23           | 3.8       |
| Junio      | 32.1        | 14.2        | 17.9      | 22.3         | 46.2      |
| Julio      | 27.7        | 13.7        | 14        | 19.3         | 156.2     |
| Agosto     | 28.8        | 13.5        | 15.3      | 19.8         | 40.9      |
| Septiembre | 28.2        | 9.8         | 18.4      | 19.1         | 202.7     |
| Octubre    | 28.1        | 5.9         | 22.2      | 17.3         | 1.5       |
| Noviembre  | 27          | 3.1         | 23.9      | 16.3         | 0         |
| Diciembre  | 24.2        | 1.9         | 22.3      | 13.7         | 0         |



## Capítulo 6.

# Aplicación de los modelos de predicción

### 6.1. Introducción

Como se ha mencionado anteriormente la predicción del desempeño de los pavimentos es una tarea difícil de realizar ya que influyen una gran cantidad de factores asociados con el comportamiento de este tipo de estructuras.

Los modelos de predicción incluidos en los sistemas de gestión de pavimentos fueron creados para cumplir con esta difícil tarea. Por otro lado, la precisión con la que estos modelos predicen la condición futura de un pavimento depende en gran medida de cuan tan bien estos modelos se adapten a las condiciones locales donde se pretende aplicarlos.

Dentro de este capítulo se hace una descripción del proceso efectuado para aplicar los modelos de predicción del sistema Micro PAVER y HDM-4. En primer lugar se describe la metodología planteada para analizar la sección de estudio, la cual es la base para aplicar los modelos utilizados; posteriormente se detalla el procedimiento realizado para aplicar el modelo Micro PAVER describiéndose los pasos a seguir para llevar a cabo este proceso. Por último se comenta la aplicación del HDM-4 y la calibración de los modelos de deterioro realizada.

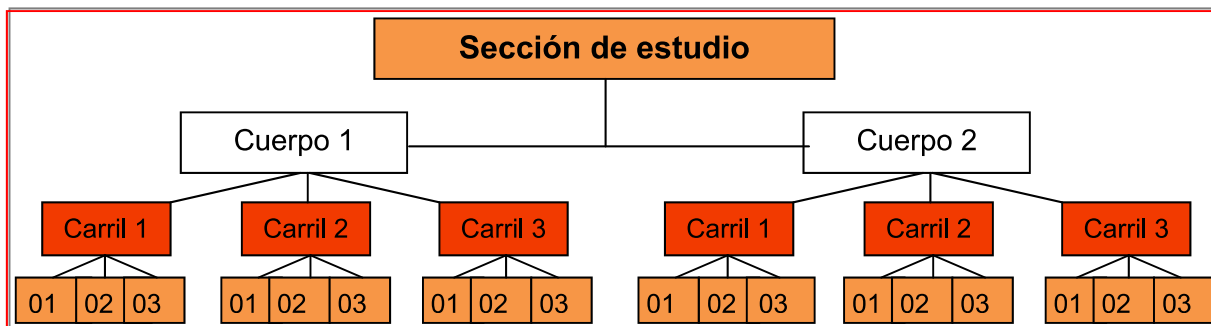
### 6.2. Metodología de aplicación de los modelos

Cada uno de los sistemas analizados requiere de parámetros distintos para su aplicación, sin embargo, en los dos sistemas es necesario incorporar información de la red carretera y de las secciones a analizar.

Para propósitos de tener un mayor número de datos y minimizar la dispersión de la información, se analizó por separado cada sentido de circulación, identificándolos como cuerpo 1 y cuerpo 2; los carril de cada cuerpo también fueron analizados por separado y se identificaron del número 1 al 3 del carril de alta velocidad al de baja.



Por último, los carriles se dividieron en subtramos de 5.0 km de longitud, de acuerdo a sus características de alineamiento horizontal y vertical, estos fueron identificados con los números 01 al 03, resultando en 18 subtramos; para realizar la identificación de los subtramos se empleó un código en donde el primer número identifica el subtramo, el segundo número el carril y por último el tercero el cuerpo. Por ejemplo, el código 01\_1-1 se refiere al subtramo 01, del carril 1 y el cuerpo 1. En la figura 6.1 se observa el diagrama planteado para subdividir la sección de estudio.



**Figura 6.1.** Subdivisión de las secciones para la aplicación de los modelos.

### 6.3. Aplicación del modelo Micro PAVER

Los recientes desarrollos en la tecnología informática y la gestión de pavimentos han proporcionado las herramientas necesarias para gestionar los pavimentos de forma eficaz y económica. Uno de los sistemas de gestión de pavimentos de mayor uso por parte de las agencias de carreteras es el sistema Micro PAVER, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los EE.UU. la versión 6 utilizada en la investigación trabaja en un ambiente de Windows y tiene incorporada la última tecnología en pavimentos. Para Shahin y Schmidt (1998) las tres partes más importantes del sistema son: Predicción de la Condición, Análisis de la Condición y Planeación de los Trabajos.

La predicción de la condición es una herramienta que permite a los usuarios desarrollar sus propias curvas de deterioro (tendencias). El sistema permite desarrollar las tendencias de deterioro que sean necesarias para asegurar la homogeneidad en los datos utilizados para el desarrollo de cada tendencia. Por ejemplo, una tendencia puede ser desarrollada para carreteras clasificadas como principales, mientras que otra tendencia puede ser desarrollada para carreteras secundarias. Una vez que la curva se desarrolla, se le asigna una familia adecuada de pavimentos, para ser usada en la predicción de la condición en lugar de una línea recta. La versión utilizada del sistema permite seleccionar diferentes variables dependientes para la predicción de la condición del pavimento (PCI, IRI, etc.) en el caso del presente estudio se utilizó el Índice de Condición del Pavimento (PCI) como variable dependiente.

La herramienta de Análisis de la Condición permite evaluar el pasado, así como la condición futura en los diferentes niveles de gestión.

La planeación de los trabajos es una herramienta que identifica el nivel óptimo de acciones de M&R para cada sección del pavimento basado en los deterioros del pavimento, estado actual y tasa de progresión del deterioro.

En este capítulo se describe el proceso realizado para efectuar la predicción de la condición en la sección de estudio, en el capítulo siguiente se describirá el desarrollo de las otras dos



herramientas. Para realizar la predicción de la condición es necesario obtener el PCI para cada sección, por lo que, dentro de este capítulo también se detalla este proceso.

### 6.3.1. Proceso de gestión en Micro PAVER

Antes de realizar la predicción de la condición es necesario definir ciertas características de la sección de estudio en el Micro PAVER. Las siguientes tareas principales son necesarias para la creación de un proceso de gestión de pavimentos en el sistema.

- Definición de la red del pavimento
- Definición de la ramificación del pavimento
- Definición del seccionamiento del pavimento
- **Medición de la condición del pavimento**
- Predicción de la condición del pavimento
- Gestión a nivel de red
- Gestión a nivel de proyecto

El primer paso dentro del Micro PAVER es crear una base de datos para almacenar toda la información que se empleará en el proceso de gestión. Una vez realizada esta tarea se realiza identificación y definición de la red, la cual se identifica por el sistema como una agrupación lógica de pavimentos para la gestión de acciones de M&R. La sección de estudio fue denominada como **“MEX – 057”**.

Un ramal es una parte fácilmente identificable de la red del pavimento y que tiene una función distinta. Micro PAVER identifica los ramales de dos formas distintas: por un nombre alfanumérico descriptivo de 35 caracteres de largo, llamado el “nombre del ramal” y por un código alfanumérico de 10 caracteres, llamado “identificación del ramal”. La sección de estudio fue dividida en dos ramales, que representan cada uno de los sentidos de circulación de la autopista México – Querétaro (ver figura 6.1), la división se realizó para propósitos de realizar una mejor comparación de los datos del PCI calculados y se identificaron como: **Cuerpo 1** y **Cuerpo 2**.

Un ramal no siempre tiene características constantes a lo largo de toda su superficie o longitud. Por este motivo, los ramales se dividen en componentes más pequeños llamados “secciones” para fines de gestión. Una sección debe de ser vista como la unidad más pequeña de gestión cuando se considera la aplicación y selección de los trabajos de M&R. Una sección debe de ser del mismo tipo de superficie en toda su longitud. Cada ramal se compone de por lo menos una sección, pero puede consistir de más si las características del pavimento varían dentro del mismo ramal. En Micro PAVER una sección está representada por un código alfanumérico. Este código se conoce como “ID de la sección” y se utiliza para almacenamiento y recuperación de toda la información almacenada en la sección de la base de datos. Las secciones fueron divididas de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 6.2 (ver figura 6.1).

### 6.3.2. Medición de la condición del pavimento

Para estimar la condición del pavimento es necesario calcular el PCI, en el capítulo 4 se describe el procedimiento para llevar a cabo dicha tarea. El PCI se obtiene de la información de los inventarios de deterioros realizados, en nuestro caso se cuenta con información de dos





evaluaciones realizadas una en el año 2008 y otra en el 2010. El procedimiento descrito a continuación aplica para procesar la información de las dos evaluaciones.

El cálculo del PCI, se fundamenta en los resultados de un inventario visual de la condición del pavimento en el cual se establecen CLASE, SEVERIDAD y CANTIDAD que cada daño presenta. Los procedimientos para realizar la medición de la condición se presentan con detalle en ASTM D 6433-03.

En primer lugar se divide la sección a analizar en unidades de muestra. Una unidad de muestra es una parte apropiadamente definida de una sección de pavimento designada solamente para propósitos de inspección del pavimento. Se divide la vía en secciones o "unidades de muestreo", cuyas dimensiones varían de acuerdo con los tipos de vía y de superficie. En nuestro caso las secciones se dividieron en **80 unidades de muestra** con una área de **231.35 m<sup>2</sup>** para cada unidad de muestra.

Posteriormente se determinan las unidades de muestra a evaluar, esta etapa es importante debido a que, la inspección de cada unidad de muestra en un pavimento requiere un considerable esfuerzo y tiempo, especialmente para secciones de gran tamaño. Con la creación de un plan de muestreo, se minimiza la cantidad de recursos necesarios, sin comprometer la precisión en la estimación del PCI. Para estimar el número de unidades a inspeccionar se utilizó la fórmula 6.1, de las 80 unidades de muestra para cada sección, se calculó que solo era necesario inspeccionar **13**, de acuerdo al plan de muestreo efectuado.

$$n = \frac{N \cdot s^2}{\left[\left(\frac{e^2}{4}\right) \cdot (N-1) + s^2\right]} = \frac{80 \cdot 10^2}{\left[\left(\frac{5^2}{4}\right) \cdot (80-1) + 10^2\right]} = 13 \quad 6.1$$

Donde:

N = Número total de unidades de muestra en la sección (80).

e = Error permisible en la estimación del PCI en la sección, generalmente e = 5 ± puntos.

S = Desviación estándar del PCI entre las unidades de muestra de la sección. Al realizar una inspección por primera vez o a falta de datos, la desviación estándar se supone igual a 10 para pavimentos asfálticos y 15 para pavimentos de concreto de cemento Portland.

Una vez que el número de unidades de muestra a inspeccionar se haya determinado, el siguiente paso es calcular el intervalo de separación de las unidades. Se recomienda espaciar las unidades utilizando un método sistemático de muestreo aleatorio, cuando las muestras están igualmente espaciadas en toda la sección y la primera se selecciona al azar. Para determinar el intervalo de separaciones se utilizó la ecuación 6.2, resultando en un intervalo separación de **6** unidades de muestra; en la tabla 6.1 se muestra la sección inicial a evaluar de acuerdo al muestreo aleatorio realizado.

$$i = \frac{N}{n} = \frac{80}{13} = 6 \quad 6.2$$

Donde:

N = Número total de unidades de muestra (80).

n = Número de unidades de muestra a ser inspeccionadas (13).



## 6. Aplicación de los modelos de predicción.

El paso siguiente es definir las condiciones para realizar la inspección, ya que el procedimiento empleado para llevar a cabo una inspección de la condición del PCI variará dependiendo del tipo de superficie que se esté inspeccionando. Es necesario tener en cuenta los datos específicos sobre los procedimientos de inspección. En ASTM D 6433-03 se describen los procedimientos para realizar la inspección y se definen los deterioros a evaluar.

**Tabla 6.1.** Secciones iniciales a muestrear para cada intervalo.

| Sección | Unidad de muestra inicial | Sección | Unidad de muestra inicial |
|---------|---------------------------|---------|---------------------------|
| 01_1-1  | 5                         | 01_1-2  | 5                         |
| 02_1-1  | 5                         | 02_1-2  | 5                         |
| 03_1-1  | 1                         | 03_1-2  | 3                         |
| 01_2-1  | 6                         | 01_2-2  | 2                         |
| 02_2-1  | 6                         | 02_2-2  | 5                         |
| 03_2-1  | 4                         | 03_2-2  | 1                         |
| 01_3-1  | 1                         | 01_3-2  | 4                         |
| 02_3-1  | 5                         | 02_3-2  | 2                         |
| 03_3-1  | 1                         | 03_3-2  | 4                         |

La tarea final para efectuar la medida de la condición del pavimento es calcular el PCI. El cual se basa en la deducción de valores o factores de peso de 0 a 100 que indican el impacto para cada deterioro en la condición del pavimento. Un valor de deducción de 0 indica que el deterioro no tiene efecto sobre el desempeño del pavimento, mientras que un valor de 100 representa un deterioro extremadamente grave. En este estudio se utilizó el Micro PAVER para calcular el PCI de las unidades de muestra y posteriormente calcular el valor de cada sección evaluada. En la tabla 6.2 se muestra un resumen de los valores del PCI obtenidos para la sección de estudio. El promedio ponderado del PCI, para la sección de estudio de la autopista México – Querétaro es de 95.61 para el año 2010.

**Tabla 6.2.** Valores del PCI calculados por medio del Micro PAVER para el año 2010.

| CUERPO 1 |        | CUERPO 2 |        |
|----------|--------|----------|--------|
| Subtramo | PCI    | Subtramo | PCI    |
| 01_1-1   | 100.00 | 01_1-2   | 100.00 |
| 02_1-1   | 100.00 | 02_1-2   | 98.00  |
| 03_1-1   | 100.00 | 03_1-2   | 95.00  |
| 01_2-1   | 99.00  | 01_2-2   | 99.00  |
| 02_2-1   | 96.00  | 02_2-2   | 94.00  |
| 03_2-1   | 96.00  | 03_2-2   | 75.00  |
| 01_3-1   | 97.00  | 01_3-2   | 99.00  |
| 02_3-1   | 94.00  | 02_3-2   | 95.00  |
| 03_3-1   | 98.00  | 03_3-2   | 86.00  |



### 6.3.3. Predicción de la condición del pavimento

Los modelos de predicción de la condición del pavimento son vitales para obtener un sistema de gestión completo, una de sus principales funciones es ayudar a la toma de decisiones en base a las predicciones para determinar las necesidades de las acciones de M&R en los diferentes niveles de gestión. Existen muchas técnicas disponibles para desarrollar los modelos de predicción. Micro PAVER utiliza el “método de familias” para realizar esta función.

El método de “familias” se creó a raíz de un extenso programa de investigación sobre la modelación del deterioro de los pavimentos realizado por el Ejército de los EE.UU. (Shahin, 1994). El método proporciona al usuario una excelente capacidad de análisis de grupos de datos y se compone de los siguientes pasos:

1. Definición de la familia del pavimento
2. Filtrado de datos
3. Análisis de los datos con valores atípicos
4. Desarrollo del modelo de familia
5. Desarrollo del modelo del pavimento

Inicialmente el método fue diseñado para ser usado en Micro PAVER para predecir el PCI como una función del tiempo. Sin embargo, el concepto puede ser extendido para predecir otras medidas de condición.

#### 6.3.3.1. Definición de la familia del pavimento

Una familia de pavimento se define como un grupo de secciones de pavimento con características de deterioro similares. Micro PAVER permite al usuario definir una familia basada en varios factores incluyendo el uso, rango, tipo de superficie, zona, categoría de la sección, fecha de la última construcción y PCI. El usuario puede definir tantas familias como se requieran para una mayor precisión en la predicción. La disponibilidad de datos puede imponer una limitación para una definición apropiada de una familia. Para cada familia definida, Micro PAVER crea automáticamente un archivo que contiene la identificación de la sección del pavimento, la edad y el PCI. En la sección de estudio de la carretera México – Querétaro, la familia fue definida en función del tipo de superficie, clasificación de la vía y fecha de la última reconstrucción y fue identificada como “**MEX-057**”.

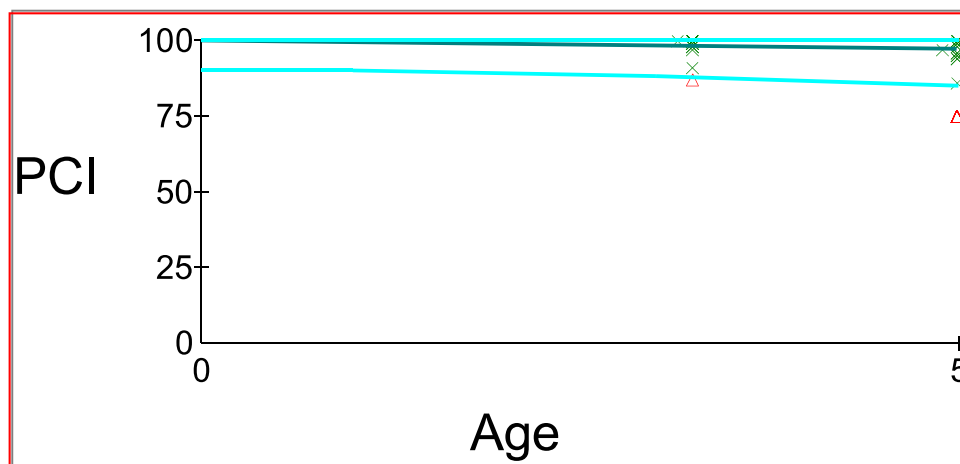
#### 6.3.3.2. Filtrado de datos.

En este paso, Micro PAVER permite al usuario filtrar los puntos de los datos sospechosos (establecer límites). Los datos son los primeros en ser ordenados por el número de identificación de la sección, la edad y el PCI. Cuando una misma sección se enumera más de una vez, los casos secuenciales de la misma sección se comparan. Si los incrementos del PCI con la edad y siendo los incrementos mayores de 20 puntos, el caso con el PCI más alto se mueve a un archivo de “error”. Esta acción indica que, o bien un error está presente en uno de los registros o una rehabilitación importante se ha realizado entre las inspecciones, lo que sitúa a esta sección en una familia diferente.

Si dos secciones de pavimentos de la misma edad se enumeran más de una vez y el PCI es el mismo, solo una sección del pavimento se conserva. Si el PCI es diferente para las secciones de la misma edad, todos los casos se mueven a un archivo de “error”. Un nuevo análisis de los datos sospechosos se realiza mediante un conjunto de límites definidos por un “máximo y un



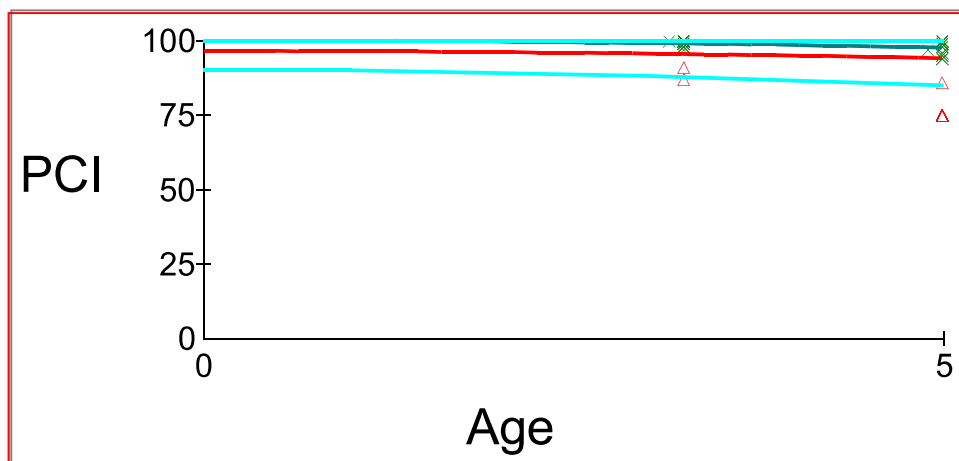
mínimo” desarrollando una envolvente mediante la revisión de muchas bases de datos, sin embargo, estos valores pueden ser fácilmente modificados por el usuario. Si un registro cae fuera de la frontera de la envolvente, el registro se mueve a un archivo de “error” (Shahin, 1994). En la figura 6.2, se observa el proceso descrito anteriormente para la familia MEX-057.



**Figura 6.2.** Datos fuera del modelo en el proceso de filtrado.

### 6.3.3.3. Análisis de los datos con valores atípicos

Posterior al filtrado de datos se realiza un análisis de valores atípicos. El examen detenido de los datos estadísticos para la eliminación de los puntos extremos se realiza en el análisis de los valores atípicos. Este paso es importante porque pavimentos con un desempeño inusual pueden tener un impacto significativo en la forma de la familia que se esté modelando. Micro PAVER calcula los residuos de la predicción, que son las diferencias entre los valores del PCI observado y el estimado utilizando un polinomio restringido de la curva de los mínimos cuadrados. El propósito de obtener los residuos es tener una distribución de frecuencia normal (Nuñez y Shahin, 1986), lo que permite tener un intervalo de confianza que será fijado. Por ejemplo, un intervalo de tres desviaciones estándar en ambos sentidos contiene 99.8 % de los PCI observados. Micro PAVER permite especificar el intervalo de confianza, para nuestro caso se adoptó un valor del 95 %. Las secciones que se detectan con valores atípicos basados en los intervalos de confianza, se muestran en la figura 6.3 y son excluidos del desarrollo del modelo.



**Figura 6.3.** Datos fuera del desarrollo del modelo.



#### **6.3.3.4. Desarrollo del modelo de familia**

Para el desarrollo del modelo de la familia un polinomio restringido de errores mínimos cuadrados se crea a partir de los datos, después de su procesamiento a través del filtrado y análisis de valores atípicos. Este modelo es restringido, ya que no se le permite tener una pendiente positiva debido a que el PCI no puede aumentar con la edad. Si se desea se puede realizar un mejor ajuste sin restricciones para observar si se detecta una pendiente positiva del PCI vs la edad. Esta es una característica útil, ya que puede tratarse de una familia no homogénea. También ayuda a detectar de forma visual donde se está produciendo el problema. Esta curva de mejor ajuste en el análisis de la familia se extiende solo hasta el punto donde los datos se encuentran disponibles. Para predecir las condiciones futuras, la curva se extrapola al extender una tangente de la misma pendiente que la de la curva en los últimos datos registrados.

### **6.4. Aplicación del modelo HDM-4**

El sistema HDM-4 desarrollado bajo auspicios de diferentes organizaciones internacionales de carreteras, constituye una herramienta muy atractiva para aplicar los modelos de análisis de los sistemas de gestión de pavimentos.

Una de las principales desventajas del HDM-4 consiste en que su aplicación requiere de un número muy importante de datos de entrada (del orden de 800 para una aplicación común), muchos de los cuales es necesario obtenerlos en campo a costos frecuentemente prohibitivos. De lo anterior se desprende la necesidad de estudiar la sensibilidad de los modelos internos del HDM-4 a fin de jerarquizar cada uno de los parámetros que intervienen en ellos, de acuerdo con su impacto en los resultados del sistema y generar un listado de variables cuyos valores resulta indispensable obtener en campo o en gabinete a fin de garantizar la validez de los resultados generados (Solorio et al., 2004).

De acuerdo a lo mencionada en el párrafo anterior el proceso de aplicar el HDM-4 con todos los parámetros requeridos consumiría mucho tiempo haciendo el estudio poco práctico, por lo que, tomando como base el estudio realizado por Solorio et al., (2004) solo se alimentó al modelo con la información necesaria para cumplir con los objetivos del estudio.

La etapa de aplicación del modelo HDM-4 se dividió en dos partes: la primera se centra en los datos de entrada para aplicar el sistema y los principales datos para modelar el desempeño en la sección de estudio, en la segunda etapa se realizó la calibración de los modelos de deterioro. A continuación se describen estas dos etapas desarrolladas para aplicar el modelo HDM-4.

#### **6.4.1. Parámetros para aplicar el modelo HDM-4**

Dentro de esta etapa se alimentó al programa con la información requerida para definir la red de carreteras a analizar (por ejemplo definición, geometría, etc.), para nuestro caso la red se definió como “**MEX- 057**”. Para definir la flota vehicular se utilizaron los siete tipos de unidades aforados anualmente por parte de la Dirección de Servicios Técnicos de la SCT en la red federal de carreteras, las características físicas de los vehículos se obtuvieron de las publicaciones técnicas del Instituto Mexicano del Transporte, desarrolladas por Arroyo et al., para los demás parámetros se utilizaron los valores por defecto del sistema verificando que fueran compatibles con los objetivos del estudio.





## 6. Aplicación de los modelos de predicción.

---

Una vez realizadas las taras descritas anteriormente, el siguiente paso es definir e introducir al sistema la información necesaria para aplicar los modelos de predicción, de acuerdo al estudio realizado por Solorio et al., 2004 las principales características que influyen en la precisión de los modelos del HDM-4 están relacionadas con la información de la estructura del pavimento, el tráfico y las condiciones climáticas.

### 6.4.1.1. Estructura del pavimento

Como se mencionó en el capítulo 4 el HDM-4 modela los deterioros en diferentes tipos de pavimentos, es por eso que es necesario definir el tipo de pavimento a analizar en el modelo, dentro de este los pavimentos son clasificados en función del tipo de superficie y del tipo de base. La clasificación del pavimento en la sección de estudio de acuerdo a la nomenclatura del HDM-4 es: **AMSB (Mezcla Asfáltica sobre Base Estabilizada)**.

Existen diferentes medidas de materiales y capas que se utilizan para caracterizar la estructura de un pavimento. El método más laborioso y caro para obtener la información necesaria consiste en obtener una muestra individual de los materiales y reportar los valores medidos de resistencia, graduación, contenido y otros parámetros de interés. Para modelar el desempeño de los pavimentos esta metodología resulta impráctica, por lo que, las medidas adecuadas se estiman con métodos más accesibles.

Las características de la estructura del pavimento que se utilizan en los modelos HDM incluyen la resistencia del pavimento, características de la capa y el material seleccionado y las propiedades de la capa.

El número estructural modificado (SNC por las siglas modified structural number), es un medio por el cual puede ser estimada la capacidad estructural de un pavimento. Este método se basa en el concepto de número estructural AASHTO, en el que a las capas del pavimento se les asigna un coeficiente estructural de capa que se supone representa la contribución de la capa en el desempeño del pavimento. La contribución de una capa individual en el desempeño general del pavimento está dada por el producto del coeficiente estructural y el espesor de la capa.

El número estructural constituye uno de los factores con mayor influencia en la predicción del IRI, ya que modela la capacidad del pavimento para resistir las cargas del tránsito; por tanto, representa una medida de la susceptibilidad de la superficie de rodamiento a los deterioros provocados por la deformación de las capas inferiores. Entre los datos más importantes que se requieren para encontrar el número estructural, figuran las condiciones climáticas y el estado del drenaje, los cuales se ingresan al programa de manera cualitativa mediante una serie de categorías.

Existen diferentes técnicas para estimar el SNC, en el estudio se obtuvo por medio del programa a través de valores de deflexión medidos con el deflectómetro de impacto, utilizando el valor de la deflexión máxima a 700 kPa. En la tabla 6.3 se muestran los valores de la deflexión máxima (D0) registrada con el HWD, esta deflexión normalizada es utilizada para estimar el SNC para cada sección analizada.

Las características de las capas están relacionadas principalmente con el tipo y espesor de la capa de superficie y el tipo de base dentro de la estructura del pavimento. Para el caso de la sección de estudio estas características se mencionaron en el capítulo 5. De acuerdo al tipo de pavimento con el que cuenta la sección es necesario incorporar información adicional al programa sobre todo respecto a la capa de base, esta se refiere al espesor y módulo de la capa; debido a que el espesor es constante en toda la sección analizada solo es necesario



incorporar información de los valores de los módulos para las distintas secciones propuestas, en la tabla 6.4 se observa la información incorporada al HDM-4.

**Tabla 6.3.** Número estructural estimado para las secciones analizadas en la A. México-Querétaro.

| CUERPO 1 |                     |       | CUERPO 2 |                     |       |
|----------|---------------------|-------|----------|---------------------|-------|
| Subtramo | D <sub>0</sub> (mm) | SNC   | Subtramo | D <sub>0</sub> (mm) | SNC   |
| 01_1-1   | 0.103               | 13.47 | 01_1-2   | 0.147               | 10.43 |
| 02_1-1   | 0.129               | 11.42 | 02_1-2   | 0.140               | 10.9  |
| 03_1-1   | 0.147               | 10.43 | 03_1-2   | 0.132               | 11.42 |
| 01_2-1   | 0.117               | 13.73 | 01_2-2   | 0.192               | 12.98 |
| 02_2-1   | 0.135               | 14.39 | 02_2-2   | 0.126               | 14.60 |
| 03_2-1   | 0.152               | 13.06 | 03_2-2   | 0.111               | 13.35 |
| 01_3-1   | 0.083               | 14.01 | 01_3-2   | 0.141               | 10.43 |
| 02_3-1   | 0.105               | 12.61 | 02_3-2   | 0.139               | 9.98  |
| 03_3-1   | 0.122               | 12.07 | 03_3-2   | 0.135               | 12.68 |

Por último, la información requerida por el programa respecto a la estructura del pavimento está relacionada con el historial de mantenimiento del pavimento. Las últimas acciones de mantenimiento importantes realizadas en la sección de estudio fueron los trabajos de rehabilitación realizados en el año 2005, los cuales fueron comentados en el capítulo 5.

**Tabla 6.4.** Módulos de la capa de base estabilizada en la sección de estudio.

| CUERPO 1 |               | CUERPO 2 |               |
|----------|---------------|----------|---------------|
| Subtramo | Módulos (GPa) | Subtramo | Módulos (GPa) |
| 01_1-1   | 9.700         | 01_1-2   | 6.046         |
| 02_1-1   | 7.382         | 02_1-2   | 8.896         |
| 03_1-1   | 5.600         | 03_1-2   | 5.508         |
| 01_2-1   | 8.112         | 01_2-2   | 6.460         |
| 02_2-1   | 8.690         | 02_2-2   | 7.360         |
| 03_2-1   | 5.411         | 03_2-2   | 8.390         |
| 01_3-1   | 11.027        | 01_3-2   | 5.070         |
| 02_3-1   | 6.274         | 02_3-2   | 5.450         |
| 03_3-1   | 6.540         | 03_3-2   | 6.630         |

#### 6.4.1.2. Efectos climáticos y ambientales

Los efectos estacionales fueron considerados tanto de forma directa e indirecta en la base del HDM-4 (HDM-III). Los efectos directos de la humedad fueron considerados en el cálculo del SNC, el coeficiente  $m$  del medio ambiente, que se aplica al modelo de rugosidad y la precipitación media mensual (MMP) que se utiliza tanto en el cálculo de la progresión de bache, los modelos de profundidad media de la rodera y de desviación estándar de la profundidad



## 6. Aplicación de los modelos de predicción.

---

media de roderas. Indirectamente los modelos fueron considerados en la naturaleza empírica de los modelos y los coeficientes de calibración.

La mayoría de los parámetros descritos anteriormente se encuentran relacionados con la zona climática establecida por el HDM-4, para definir la zona climática es necesario contar con información de la temperatura y precipitación. Esta información se obtuvo de la estación meteorológica CEA-PROTECCION CIVIL SJR, San Juan Del Rio, QUERÉTARO (ver capítulo 5). La clasificación de la zona climática para la sección de estudio es: **Tropical-Semiárido**.

### 6.4.1.3. Características del tráfico

La caracterización del tráfico, especialmente el efecto combinado de una estructura de pavimento con una corriente de diferentes tipos de vehículos, cargas y configuraciones de ejes y neumáticos, es de importancia en cada evaluación analítica de la condición del pavimento. En teoría, el paso de cada uno de los neumáticos sobre el pavimento provoca una pequeña cantidad de daño. Es el daño acumulado, causado por vehículos con cargas diferentes y configuraciones de ejes, neumáticos y presiones de inflado, impartido a los pavimentos en los intervalos de carga diferentes y en diferentes estados de resistencia (debido a las temperaturas y precipitaciones), que provocan el deterioro del pavimento. Sin embargo, el daño incremental causado por cada carga es imposible de observar y para todos los efectos prácticos es muy difícil de modelar. El método más ampliamente utilizado de la agregación de los efectos de un flujo de tránsito no homogéneo es a través de la aplicación del concepto del eje equivalente estándar (ESA).

El concepto de ESA se basa en las pruebas realizadas en la pista de pruebas de la AASHO. Un ESA se define como la relación entre el número de cargas de ejes estándar determinados que provoca una pérdida en el servicio entre el número de ejes de carga  $n$  que causa el mismo daño, donde  $n$  es la carga por eje de interés. El eje estándar en AASHO era un eje de 80 KN sencillo de doble neumático.

En los modelos de deterioro de carreteras del HDM-4, se consideran dos medidas de tráfico, el flujo de todos los ejes de los vehículos (YAX) y el flujo de los ESAs de 80 kN (YE4). Estos son expresados en unidades de millones por línea por año (millones/línea/año). Otras de las características que pueden ser de interés como el tráfico diario promedio anual (AADT), el porcentaje de camiones y elementos secundarios como, el porcentaje de vehículos en cada dirección y el porcentaje de vehículos en cada carril para carreteras con varios carriles.

Los datos de entrada de mayor interés utilizados en esta sección están relacionados con la distribución vehicular y la tasa de crecimientos, estos parámetros fueron obtenidos de los datos viales que se incluyen en el capítulo 5.

### 6.4.2. Calibración de los modelos de deterioro

El objetivo de un análisis en el HDM es la modelación en carreteras. Esto implica predecir el deterioro del pavimento en virtud del tiempo y del tráfico, los efectos en los usuarios de la carretera y los efectos del mantenimiento en la condición del pavimento y la tasa de deterioro. Al igual que con cualquier modelo, HDM es una representación de la realidad. Que tan bien las predicciones del modelo reflejan la realidad depende de una combinación de:

- Validez de las relaciones fundamentales del HDM
- Precisión y suficiencia de los datos de entrada
- Calibración de los factores utilizados en el análisis



Debido a que las relaciones fundamentales del HDM han demostrado ser sólidas y aplicables en muchos países, la confiabilidad de la mayoría de los análisis realizados con HDM depende de los datos de entrada y los factores de calibración (Bennett y Paterson, 2000). A continuación se presenta la definición de los conceptos de sesgo y precisión efectuada por Bennett y Paterson (2000).

### 6.4.2.1. Conceptos de sesgo y precisión

La única manera de evaluar la adecuación de las predicciones del HDM es mediante la comparación de las predicciones del modelo con datos conocidos. Por ejemplo, se pueden tener datos sobre la rugosidad actual de una serie de pavimentos de edad conocida. Mediante el HDM se puede predecir la condición del pavimento a la misma edad con los mismos atributos de cuando eran nuevos, de esta forma se podría evaluar si el HDM está proporcionando predicciones adecuadas.

Hay dos consideraciones al comparar los resultados predichos y los datos observados.

- **Sesgo**  
Una diferencia sistemática que surge entre los valores observados y los predichos. Por ejemplo, si las predicciones son siempre el 10 por ciento más bajas que los datos observados. La definición formal de sesgo es la diferencia entre la media prevista y la media de los valores observados.
- **Precisión**  
Una medida de cuán cerca los datos observados y previstos son unos respecto de otros. Es representado por el inverso de las varianzas ( $\sigma_{\text{obs}}^2 / \sigma_{\text{pre}}^2$ ); es decir, que se refleja en la dispersión al graficar los datos observados en comparación con los predichos. La precisión es influida en la variación estocástica inherente de la mayoría de los procesos naturales, la medición y errores de observación y los factores inexplicados omitidos de las relaciones en el modelo.

La figura 6.4 ilustra estos conceptos en cuatro escenarios. En donde, la figura sombreada representa los datos observados que se han graficado con los datos previstos. La línea continua a 45° es la línea de igualdad, donde los datos observados y predichos son iguales.

Cuando hay bajo sesgo, caen alrededor de, o cerca de la línea de igualdad. Como se observa en la figura 6.4-A (sesgo bajo y alta precisión), cuando hay alta precisión existe poca dispersión en los datos. Sin embargo, en una reducción en la precisión se ve un aumento en la dispersión y por lo tanto, en la desviación estándar (figura 6.4-B, sesgo bajo y baja precisión).

Cuando hay una alta precisión, el cambio de un alto a un bajo sesgo se ve el cambio de la pendiente de los datos observados sistemáticamente diferentes de la línea de igualdad. Esto se ilustra en la figura 6.4-C (sesgo alto y alta precisión). En la figura también se observa lo que sucede cuando hay una diferencia sistemática, la pendiente de la línea observada contra la predicha no pasa por el origen.

La situación más difícil se ilustra en la figura 6.4-D (sesgo alto y baja precisión). En este caso es a menudo difícil verificar la razonabilidad del modelo puesto que las diferencias podrían ser igualmente debidas a la mala precisión así como al sesgo.

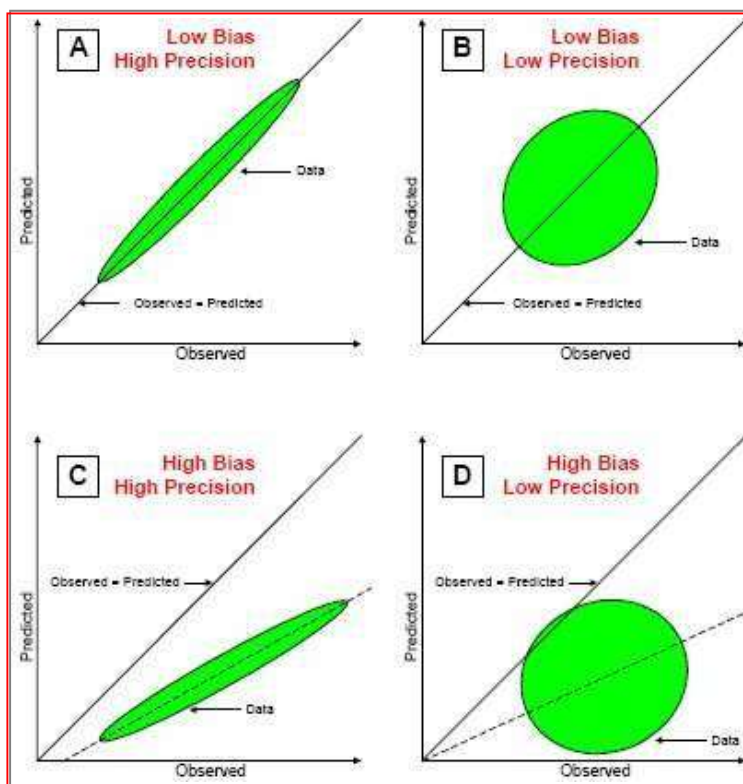
### 6.4.2.2. Procedimiento de calibración de los modelos

Durante esta etapa se llevó a cabo la calibración de los modelos de deterioro de carreteras (RD por las siglas Road Deterioration). Este proceso es importante ya que una vez lograda la



## 6. Aplicación de los modelos de predicción.

calibración se estará garantizando una mayor precisión en la predicción del desempeño de la sección de estudio.



**Figura 6.4.** Ejemplos de sesgo y precisión (fuente: Bennett y Paterson, 2000).

Para calibrar un determinado modelo de comportamiento de pavimentos es necesario contar con un conjunto de datos de deterioro que permitan reconstruir la curva de su comportamiento real, por lo que es conveniente que estos datos pertenezcan a un período más o menos prolongado de tiempo. La calibración, consiste entonces en encontrar factores ( $K_i$ ) que logren el mejor ajuste entre las predicciones del modelo y los datos medidos en campo (Solminihac et al., 1997).

Los modelos RD incluyen un número de factores de calibración para facilitar la calibración de los modelos RD a las condiciones locales. Los factores de calibración son denominados con la letra “K” y son identificados con subíndices para cada tipo de deterioro, en el capítulo 5 se describen estos factores para cada modelo de deterioro.

Estos factores son multiplicados y usados para cambiar la escala de un deterioro particular. El valor por defecto de todos los factores K es 1.0. Por ejemplo,  $K_{cia}$  es el factor de calibración para el inicio del agrietamiento estructural total en pavimentos asfálticos. Un incremento en el valor de  $K_{cia}$  a 2.0, indica que el tiempo de iniciación del agrietamiento estructural total es doblado, implica que este pavimento tendrá un tiempo mayor antes de que el agrietamiento aparezca en comparación con la predicción si se utilizará el valor por defecto de calibración del HDM-4. De la misma forma, incrementando el factor para la progresión del agrietamiento estructural total  $K_{cpa}$ , a 2.0 implica que el pavimento se deteriorará más rápido, en términos de la tasa de progresión del agrietamiento, ya que este se presentará más rápido que el predicho con el valor de defecto utilizado por el HDM-4.

Los modelos de deterioro calibrados en este estudio corresponden a los modelos de agrietamiento, profundidad de rodera y rugosidad. Para llevar a cabo el proceso de calibración





de los modelos fue adaptada la metodología desarrollada por Austroads, descrita en AP-T97/08. El procedimiento desarrollado para aplicar esta metodología involucra dos pasos, los cuales son mencionados a continuación.

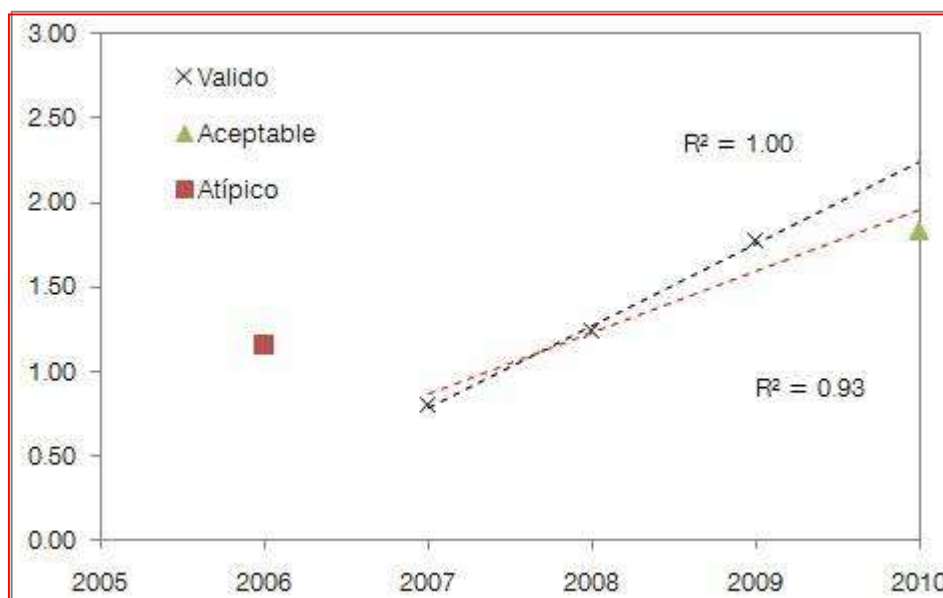
### ***Ajuste de la tasa de progresión del deterioro***

A pesar de que se cuenta con información de las campañas anuales de evaluación de los indicadores de IRI y rodera, por un periodo de 6 años (2005-2010) estos datos presentan una dispersión notable ya que en la mayoría de los subtramos no se presenta una clara tasa de progresión del indicador, sin efectuarse una acción de mantenimiento mayor en el pavimento.

Debido a esta situación y para propósitos de calibrar los modelos, es necesario definir una tasa de progresión del deterioro, los siguientes puntos resumen el proceso llevado a cabo para definir la tasa de progresión.

- Los datos que son definidos como “validos” son identificados de forma que presenten una tendencia definida de progresión de la tasa de deterioro.
- Las estimaciones se basan en un mínimo absoluto de tres puntos de datos “validos”, aunque cuatro puntos son más confiables.
- Se debe efectuar un análisis posterior para identificar los datos que son “aceptables” dentro la tendencia definida en primera instancia, estos datos pueden ser incluidos con los datos validos para definir una nueva tendencia, los datos identificados como “atípicos” en la nueva tendencia no serán considerados para el análisis.

En la figura 6.5 se observa un ejemplo del proceso de ajuste de la tasa de deterioro descrito anteriormente, la línea negra presenta la tendencia definida inicialmente para los datos validos y la línea roja representa la segunda tendencia obtenida al incorporar un cuarto dato (aceptable) a la tendencia definida para la calibración del modelo de deterioro, teniendo así un mayor grado de confiabilidad en la tasa de progresión definida. En el anexo A se incluyen los ajustes de la progresión del deterioro realizados para los subtramos de la sección de estudio.



**Figura 6.5.** Proceso de ajuste de la tasa de deterioro.



### **Calibración de los factores ( $K_i$ ) de los modelos**

El procedimiento adoptado para la calibración es definido como “prueba y error”. El proceso para realizar la calibración de los factores consistió en calcular la tasa de progresión del deterioro predicha con el HDM-4 para cada subtramo, para posteriormente compararla con la tasa de progresión de deterioro ajustada. Después se modifican los factores de calibración de los modelos RD y se repite el paso anterior. Este proceso continua hasta que la tasa de deterioro predicha se aproxima a la tasa de deterioro ajustada. A continuación se hace una breve descripción de los modelos de deterioro calibrados.

**Modelos de agrietamiento.** El HDM-4 considera dos tipos de agrietamientos, el estructural y el térmico. Solo el primer tipo fue considerado, debido a las condiciones climáticas de la zona. Respecto al agrietamiento estructural, los modelos RD lo dividen en agrietamiento “total” y agrietamiento “ancho” ( $> 3$  mm), solo el agrietamiento total fue calibrado para la sección de estudio, ya que es el que se manifiesta en el pavimento de acuerdo a lo observado en los inventarios de deterioros realizados.

Los modelos de agrietamiento total tienen dos factores de calibración, uno para ajustar el inicio del agrietamiento ( $K_{cia}$ ) y otro para ajustar la progresión del agrietamiento ( $K_{cpa}$ ). Ya que solo se cuenta con poca información de este tipo de deterioro, la calibración se hizo modificando los dos factores hasta observar que la tasa de progresión correspondía al agrietamiento observado en el año 2010, ya que este año se realizó el último inventario de deterioros.

**Modelo de profundidad de rodera.** Se basa en la suma de cuatro componentes densificación inicial, deformación estructural, deformación plástica y uso de llantas con aditamentos. La densificación inicial se relaciona con las capas granulares, debido a que el pavimento analizado cuenta con una capa estabilizada con un espesor importante este no es considerado en el estudio. El uso de llantas con aditamentos solo se presenta en climas fríos y tampoco aplica para el estudio.

Los modelos calibrados en el estudio son deformación estructural con su respectivo factor de calibración ( $K_{rst}$ ) y el modelo de deformación plástica con el factor de calibración ( $K_{rpd}$ ). El primero es considerado debido a la influencia que este componente tiene en la estimación de la profundidad de rodera final cuando se tienen bases estabilizadas, sobre todo con la presencia de agrietamiento. El modelo de deformación plástica es considerado solo para las capas asfálticas, en nuestro caso el espesor de este tipo de capas es considerable, por lo que, se tiene que tomar en cuenta este tipo de componente para la estimación de la profundidad de rodera total.

En la figura 6.6 se observa la variación de la progresión de la rodera antes y después la calibración del modelo, como se puede observar en la gráfica antes de la calibración los datos predichos con los factores de defecto presentaban un alto sesgo y una alta precisión una vez realizado el proceso de calibración se presenta un bajo sesgo y una alta precisión, de esta forma se garantiza una alta confiabilidad en los resultados arrojados por el modelo.

**Modelo de rugosidad.** La progresión de la rugosidad se predice en el HDM-4 como la suma de cinco componentes; estructural, agrietamiento, rodera, baches y efectos climáticos. La rugosidad se calcula al final de cada año, teniendo en cuenta el cambio en la condición de cada modo de deterioro secuencialmente por cada año en un periodo de análisis. El incremento anual total del cambio en la rugosidad es la suma de estos componentes.

Odoki y Kerali (2000) recomiendan que por lo general solo el factor  $K_{gm}$  se utilice para ajustar las predicciones de la rugosidad en el HDM-4 a las condiciones locales. Sin embargo, durante el



proceso de calibración se encontró que era necesario modificar los factores  $K_{gr}$  para hacer coincidir la tasa de progresión ajustada con la estimada. En algunos casos específicos también fue necesario modificar los factores  $K_{gs}$  y  $K_{gc}$ .

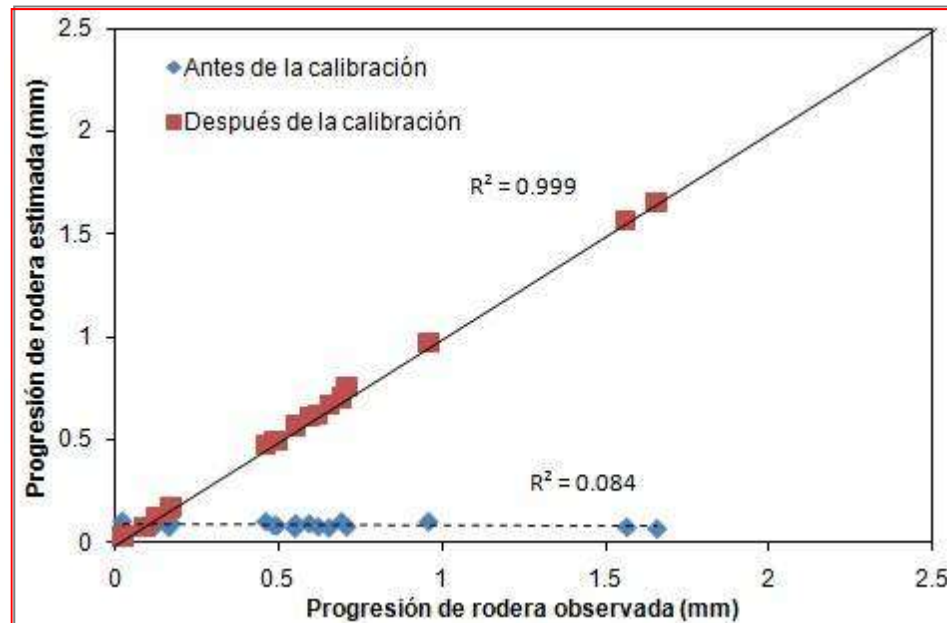


Figura 6.6. Relaciones entre profundidad de rodera estimada y observada.

Las tasas de progresión de la rugosidad antes y después de la calibración se observan en la figura 6.7, de los resultados mostrados en la gráfica se observa que los valores de progresión de rugosidad obtenidos con el modelo antes de la calibración presentan un alto sesgo y una baja precisión, esta situación es identificada por Bennett y Paterson (2000) como la situación más difícil que se puede presentar. Por otro lado, de la gráfica también se observa que una vez realizado el proceso de calibración se presenta un bajo sesgo y una alta precisión, teniéndose una baja dispersión en los datos obtenidos con el modelo.

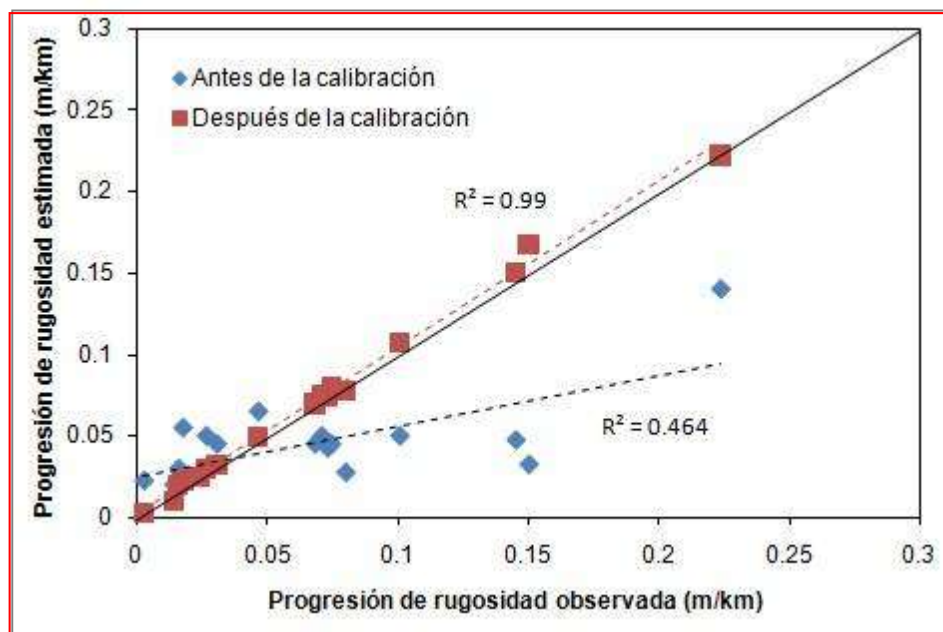


Figura 6.7. Relaciones entre IRI estimado y observado.



## 6. Aplicación de los modelos de predicción.

A continuación en la tabla 6.5 se presentan los promedios de los factores obtenidos en la calibración de los modelos realizada para la sección de estudio por tipo de deterioro y los valores por defecto usados por el HDM-4.

**Tabla 6.5.** Promedios de los factores de calibración por tipo de modelo.

| Tipo de Modelo                  | Agrietamiento |           | Rodera    |           | Rugosidad |          |
|---------------------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Factor e calibración            | $K_{cia}$     | $K_{cpa}$ | $K_{rst}$ | $K_{rpd}$ | $K_{gm}$  | $K_{gr}$ |
| Valor de defecto                | 0.0           | 0.0       | 1.0       | 0.0       | 1.0       | 1.0      |
| Valor de calibración (promedio) | 0.06          | 0.23      | 1.04      | 0.28      | 1.59      | 1.47     |



## Capítulo 7.

# Análisis de los resultados

### 7.1. Introducción

En Micro PAVER, el Análisis de la Condición es la tecnología desarrollada para predecir el deterioro y la condición futura de los pavimentos. Las características del Análisis de la Condición permiten observar el estado de la red entera de pavimentos o un subconjunto específico de la red. La función de informes de condiciones pasadas se basa en valores interpolados entre inspecciones previas. Los cuales se proyectan en función de los modelos de predicción.

En el caso del HDM-4, las relaciones incluidas sirven para modelar el deterioro (RD) y los efectos de las obras (WE) en los pavimentos. Estas se utilizan con el propósito de predecir la condición anual y para evaluar las estrategias de las obras. Las relaciones deben de vincular las especificaciones y los costos para la construcción y el mantenimiento de las carreteras a los costos de su uso a través de los modelos de los costos de los usuarios de las carreteras (Bennett y Paterson, 2000).

El HDM-4 calcula el deterioro de pavimentos sobre una base anual, antes de analizar los efectos de las acciones de conservación y mejoramiento propuestas por el usuario. El procedimiento de cálculo involucrado en la predicción del deterioro puede dividirse las siguientes fases: a) Cálculo de la capacidad estructural del pavimento; b) Evaluación del cambio en los deterioros superficiales; c) Obtención del área dañada; d) Cálculo del cambio en la profundidad de roderas; e) Obtención del IRI al final del año.

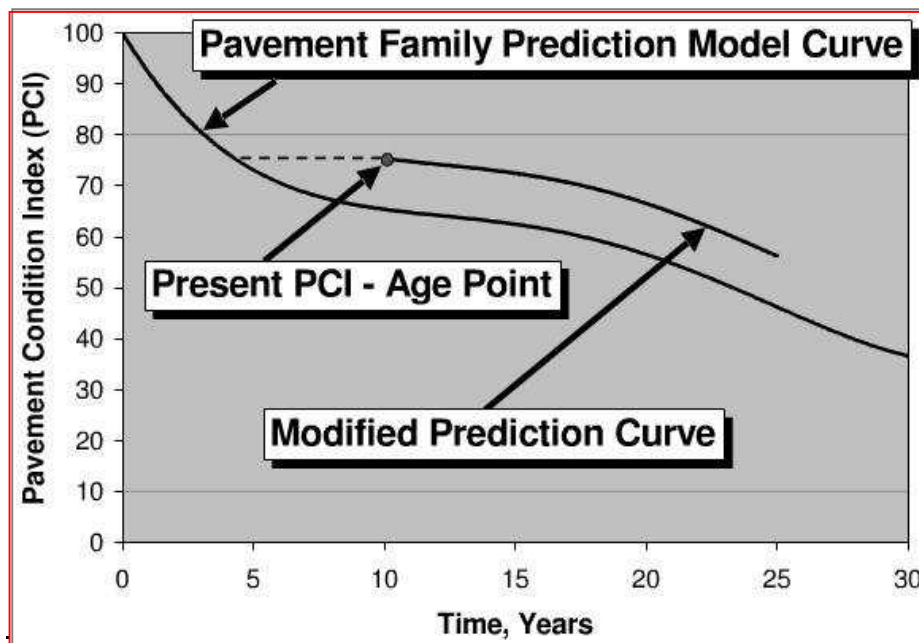
Para evaluar las capacidades de los modelos de predicción del desempeño se proponen distintos escenarios para un periodo de análisis de 15 años, dentro de estos se plantea la opción de predecir la condición del pavimento sin realizar ninguna acción de mantenimiento durante el periodo evaluado, los otros escenarios implican la programación de acciones de mantenimiento para observar la evolución del estado del pavimento en el tiempo. Por último se hace una comparación entre las predicciones realizadas con los modelos para los distintos escenarios planteados relacionando los resultados de los índices de cada modelo.





## 7.2. Predicción del deterioro en Micro PAVER

Una vez realizado el desarrollo del modelo de la familia se puede llevar a cabo la predicción de la condición. El modelo de predicción de la familia del pavimento se utiliza para predecir el nivel del PCI en la sección. El modelo de predicción en un pavimento en función de una familia representa la media del comportamiento de todas las secciones de esa familia. La predicción de cada sección se hace mediante la definición de su posición respecto a la curva de predicción de la familia. Se supone que el deterioro de todas las secciones del pavimento en una familia es similar y está en función de su estado actual, independientemente de su edad. Una curva de predicción de la sección pasa a través del último punto del PCI/edad para la sección del pavimento que es investigada, paralela a la curva de predicción de la familia como se muestra en la figura 7.1



**Figura 7.1.** Predicción a nivel de sección en un pavimento en relación al modelo de familia (fuente: Shahin y Schmidt, 1998).

Al comparar el deterioro de la sección con el deterioro de la familia se proporciona información valiosa sobre los efectos de mantenimiento, tráfico, drenaje y otros factores que intervienen en el comportamiento del pavimento. Este tipo de retroalimentación es invaluable como una guía para la revisión de los procedimientos de diseño de los espesores del pavimento. El método de las familias fue desarrollado para que a medida de que más y más datos se incorporen en la base de datos, el modelo de deterioro se actualice continuamente.

### 7.2.1. Análisis de la condición del pavimento

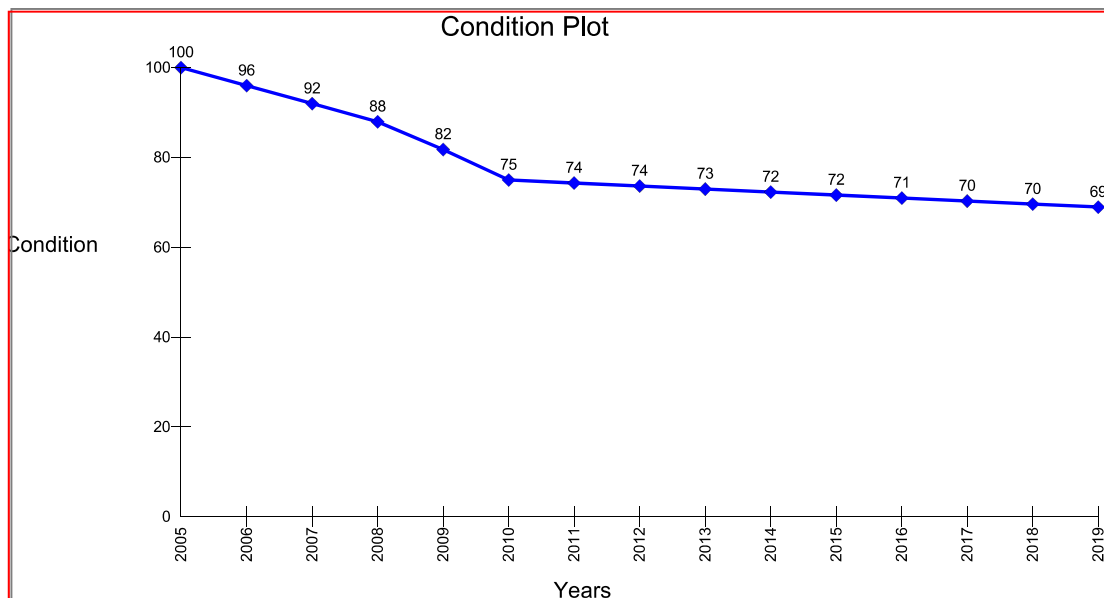
El propósito del análisis de la condición en el Micro PAVER es evaluar la condición pasada y futura del pavimento a nivel de red y de sección. El nivel de red se observa en forma de resumen, mientras que a nivel de sección se presenta la información a detalle. Los cálculos de la condición se realizan a nivel de sección y luego son integrados para producir los resultados a nivel de red.

La condición pasada es determinada por interpolación lineal entre los resultados de la inspección pasada y la última fecha de construcción (donde se supone que el PCI es 100). La



condición de la sección más allá de la última inspección se determina mediante la predicción de la condición futura basada en la curva de deterioro de la familia asignada a la sección. Si no se asigna una curva de deterioro de la familia a la sección, se lleva a cabo una proyección de la condición en línea recta.

La figura 7.2 es un ejemplo de la imagen del reporte de la condición de la sección que muestra la condición pasada y futura (asumiendo que no se realizan acciones de MR&R). La vista del reporte de la condición de la sección está relacionada con la tabla del inventario que contiene un listado de todos los sectores por lo que las gráficas se pueden generar para cualquier sección, seleccionando la sección a graficar en la tabla de inventario.



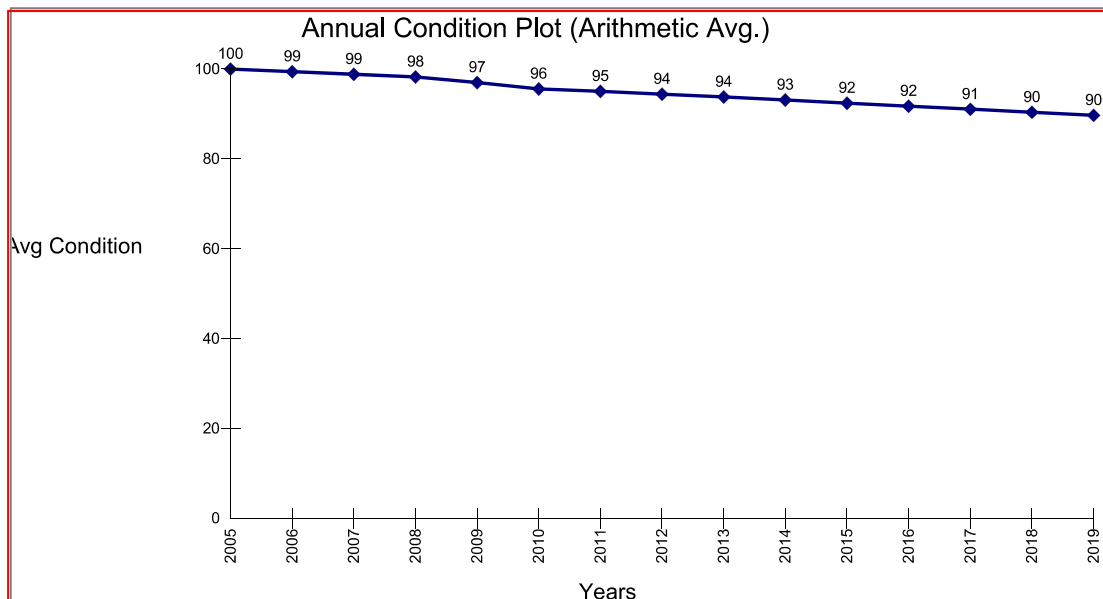
**Figura 7.2.** Ejemplo de la historia de la condición para la sección 03\_2-2.

La figura 7.3 muestra la gráfica del reporte en resumen de la condición para la red. La condición de la red se calcula promediando las condiciones de las secciones. Una condición de la red ponderada también se puede graficar, esta se calcula en base a condición del área ponderada de la sección. En la condición futura de la red se asume que no se realizará ninguna acción de MR&R.

Una vez que desarrollado el modelo de familia para la sección de estudio se realizó una predicción del deterioro para un periodo de 15 años a nivel de red, iniciando en el año 2011. El propósito de efectuar la predicción de la condición durante este periodo de tiempo es observar cómo evoluciona el desempeño del pavimento y evaluar los resultados arrojados por el modelo Micro PAVER.

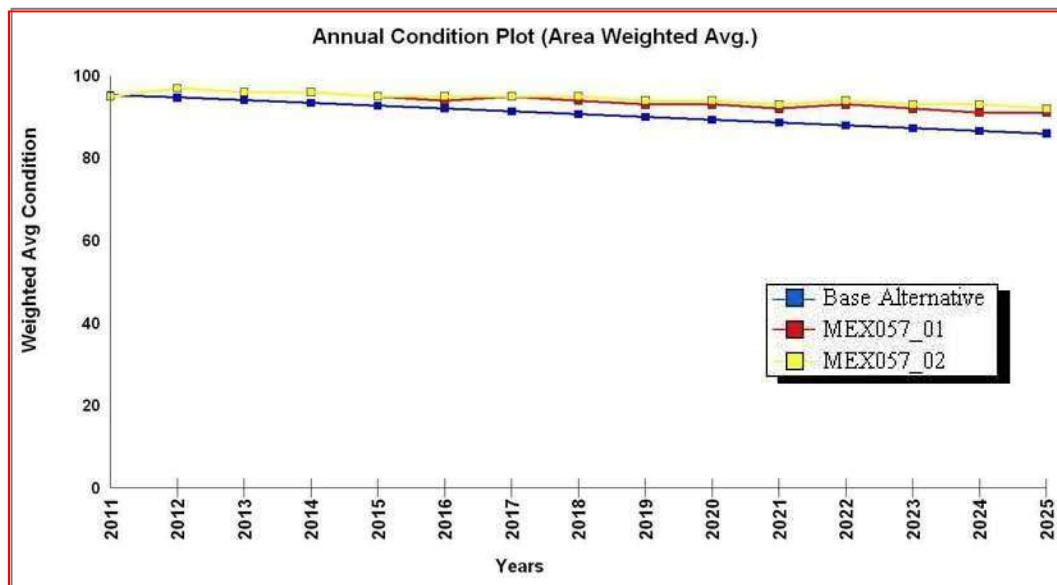
Para evaluar de forma más completa las capacidades del modelo se plantearon diferentes escenarios, los cuales se menciona a continuación:

1. Predicción de la condición sin realizar ninguna acción de MR&R
2. Predicción de la condición programando acciones de mantenimiento preventivo localizado
3. Predicción de la condición programando acciones de mantenimiento preventivo localizado y trabajos adicionales



**Figura 7.3.** Condición promedio de la red (sección de estudio A. México-Querétaro).

En la figura 7.4 la línea “alternativa base” representa la predicción sin efectuar ninguna acción de mantenimiento en el pavimento (escenario 1), el valor del PCI es de 95.29 al inicio de la predicción en el año 2011 y para el final del periodo predicho en el año 2025 el PCI disminuye hasta un valor de 85.97.



**Figura 7.4.** Predicción de la condición de la sección de estudio con Micro PAVER.

La línea “MEX057\_01” representa el comportamiento estimado realizando acciones de mantenimiento preventivo localizado (escenario 2), los trabajos programados consisten en efectuar tratamientos superficiales (tales como sellado de grietas y slurry seals) el efecto de los tratamientos propuestos incrementa el valor predicho del PCI al final del periodo analizado en comparación con el escenario 1, por lo que, se obtiene una condición final con un PCI de 91.0.

Para la alternativa “MEX057\_02” se programaron acciones de mantenimiento preventivo localizado con las mismas alternativas de tratamientos superficiales y adicionalmente se



propuso aplicar trabajos de bacheos superficiales (escenario 3). La condición predicha alcanzada para el año 2025 un valor de PCI igual a 92.0.

Las alternativas programadas se definen en Micro PAVER como acciones de Mantenimiento y Rehabilitación (M&R) preventivo localizado. Este tipo de trabajos se programan para disminuir la tasa de deterioro. Otro de los propósitos de aplicar esta política de mantenimiento es la de proporcionar una superficie de rodamiento segura para los usuarios, sobre todo para obtener una adecuada resistencia al deslizamiento.

### 7.3. Predicción del deterioro con HDM-4

El HDM-4 calcula el deterioro de pavimentos sobre una base anual, antes de analizar los efectos de las acciones de conservación y mejoramiento propuestas por el usuario. Las variables principales utilizadas desde el año de análisis al año siguiente se agrupan de la siguiente manera:

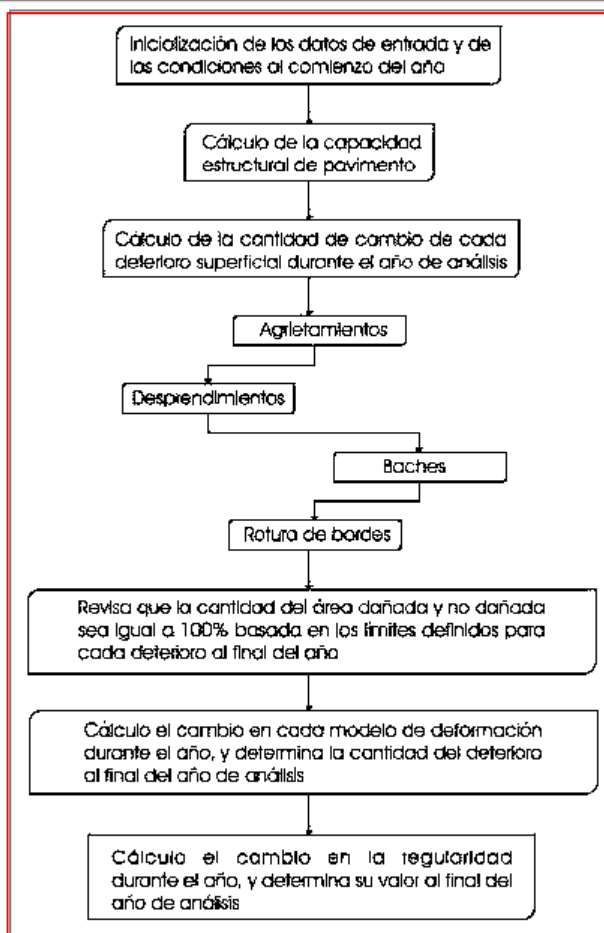
- Características de la estructura del pavimento, incluyen las medidas de la resistencia del pavimento, espesores de las capas, tipos de material, calidad de la construcción y rigidez de la subrasante.
- Condición de la carretera, datos de la condición del pavimento y el drenaje al inicio del primer año de análisis o después del primer año después de la construcción.
- Historial del pavimento, la información requerida se refiere a las edades de los pavimentos y estos están relacionados con el mantenimiento anterior a la rehabilitación y los trabajos de construcción realizados en el pavimento.
- Geometría del camino y condiciones ambientales, estos incluyen el ancho de calzada y los hombros, la alineación vertical y precipitación media mensual.
- Tráfico, los datos requeridos son el flujo de todos los ejes de los vehículos (YAX) y el flujo de cargas del eje equivalente estándar (YE4), ambos expresados sobre una base anual en millones por carril. Los datos se calculan para cada año de análisis basado en el tráfico especificado por el usuario y las características del vehículo.

La lógica general del cálculo para modelar el deterioro de cada sección del pavimento en cada año de análisis se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Insertar los datos de entrada y las condiciones al comienzo del año
2. Calcular los parámetros de resistencia del pavimento
3. Calcular la cantidad de cambio en cada modo de deterioro de superficie durante el año de análisis en el siguiente orden: agrietamiento, desprendimiento, baches y rotura de borde
4. Comprobar que el área de la calzada dañada y el área en buen estado es igual a 100 % en base a los límites establecidos para cada modo de deterioro y determinar la cantidad de cada modo de deterioro de superficie al final del año y el valor promedio del año
5. Calcular el cambio en cada modo de deterioro de deformación durante el año y determinar la cantidad del modo de deterioro en el final del año y el valor del promedio del año
6. Calcular el cambio en cada modo de deterioro de la textura superficial durante todo el año y determinar la cantidad del modo de deterioro al final del año y el valor promedio del año
7. Almacenar los resultados para su uso en módulos posteriores (es decir, RUE, WE, SEE) y en el año siguiente de análisis, así como para reportarlos

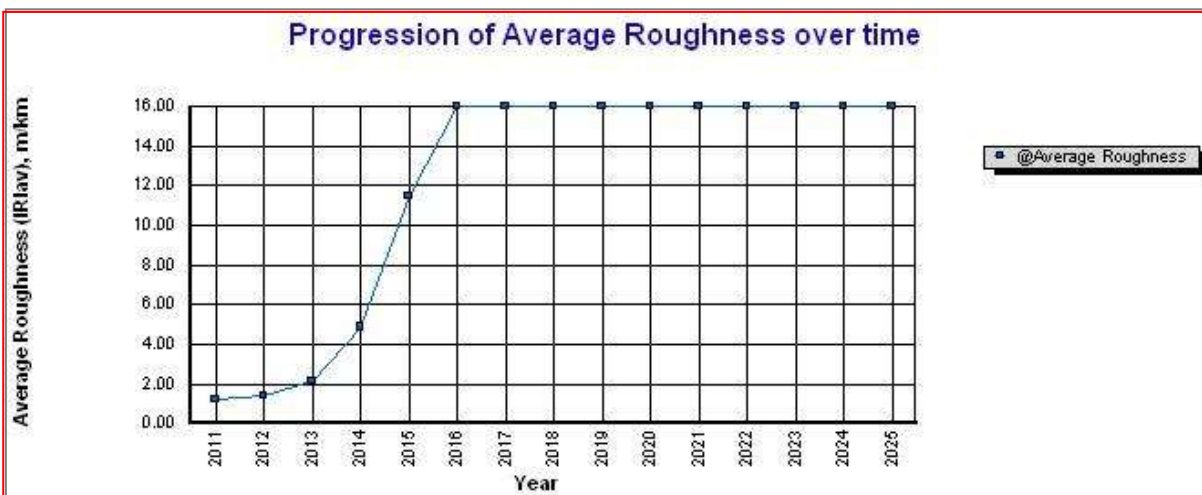
En la figura 7.5 se presenta el procedimiento descrito anteriormente de forma esquemática para modelar el deterioro del pavimento en el HDM-4.

## 7. Análisis de la curvas de deterioro.



**Figura 7.5.** Procedimiento efectuado por el HDM-4 para la predicción del deterioro (fuente: Solorio, 2004).

Como manera de ejemplo en la figura 7.6 se observa la progresión del IRI estimada con el HDM-4 para la sección 03\_2-2 empleando el procedimiento descrito anteriormente para predecir la progresión de deterioro en función del IRI, como se puede observar en un periodo de tiempo muy corto de tiempo el IRI alcanza el valor máximo permitido por el HDM-4, es importante mencionar que esta sección es la más deteriorada de las que constituyen la sección de estudio.



**Figura 7.6.** Progresión del IRI predicha para la sección 03\_2-2.



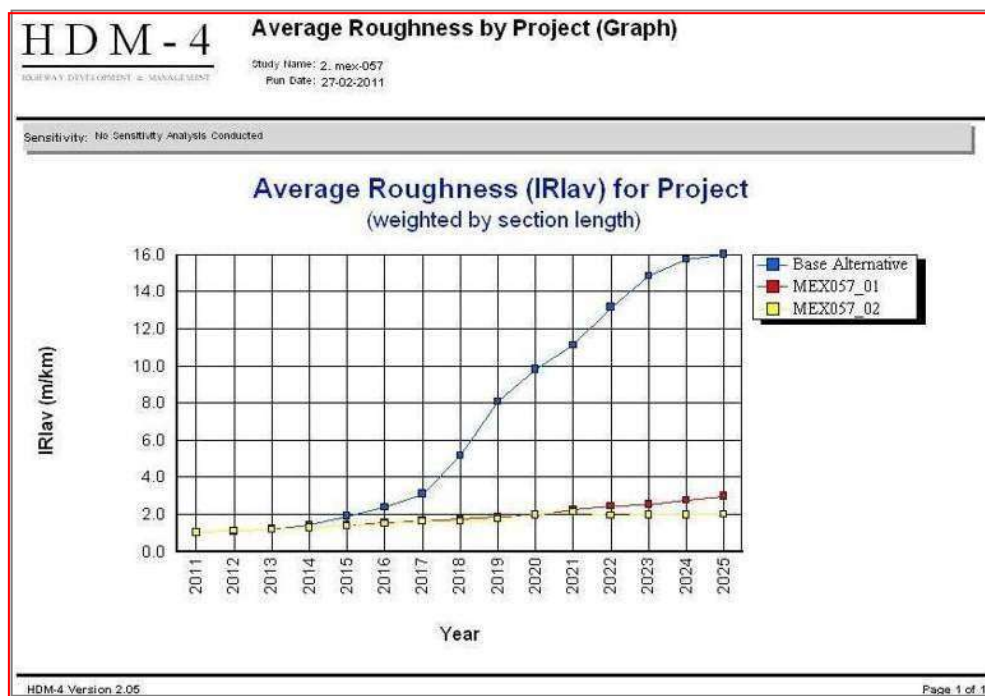


Para analizar los modelos de predicción de desempeño del HDM-4 se plantearon diferentes escenarios, al igual que en el Micro PAVER, pero con diferentes alternativas de mantenimiento para ajustar los valores de IRI a los límites establecidos, para programar las acciones de mantenimiento en los diferentes escenarios propuestos se tomo como referencia las técnicas de conservación que normalmente utiliza la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), a continuación se mencionan los escenarios propuestos:

1. Predicción de la condición sin acciones de mantenimiento
2. Predicción de la condición con acciones de conservación rutinaria
3. Predicción de la condición con acciones de conservación periódica

La figura 7.7 muestra los resultados de la predicción para los diferentes escenarios planteados a nivel de proyecto (promediando los resultados de las predicciones de cada sección evaluada) en la sección de estudio de la autopista México-Querétaro.

La alternativa base representa el escenario 1 (predicción sin realizar acciones de mantenimiento) como se puede observar al final del periodo de predicción (15 años) la condición del pavimento alcanza el valor máximo de IRI permitido por el HDM-4, también podemos ver que en el año 2017 se supera el límite máximo de IRI, establecido por la SCT con un valor de 2.81 m/km para cualquier carretera ubicada en corredores, red básica y red secundaria.



**Figura 7.7.** Predicción de la condición de la sección de estudio con HDM-4.

El escenario 2 (alternativa MEX057\_01 de la gráfica) contempla llevar a cabo acciones de conservación rutinaria, los trabajos propuestos consisten en riegos de sello, bacheo superficial y profundo. Aplicando este tipo de tratamientos se observa que el IRI se mantiene por debajo del límite en la mayor parte del periodo de análisis, siendo superado en el último año de predicción.



## 7. Análisis de la curvas de deterioro.

---

Por último el escenario 3 (alternativa MEX057\_02) consiste en efectuar acciones de conservación periódica, los trabajos programados para esta alternativa consisten en fresado y colocación de microcarpeta, además de bacheo superficial. Como se puede ver en la gráfica con estos tratamientos propuestos el IRI se mantiene por debajo del límite en todo el periodo de análisis establecido.

### 7.4. Análisis de las curvas de deterioro

Si se desea llevar a cabo una comparación entre los modelos de predicción del desempeño utilizados en el estudio (Micro PAVER y HDM-4) es necesario definir los límites para calificar la condición del pavimento y su rugosidad. Debido a que cada modelo de predicción emplea diferentes índices (PCI e IRI) para determinar el nivel de deterioro presente en el pavimento se requiere de buscar algún parámetro que relacione estos dos índices para realizar una comparación de los resultados obtenidos entre ellos.

El estudio desarrollado por Park et al., (2004) propuso relacionar los daños en la superficie del pavimento, su rugosidad y índice de condición. Para cumplir con este propósito los autores analizan información de una base de datos sobre diversas secciones de pavimento en la región del Atlántico Norte de los Estados Unidos y Canadá. El estudio presenta un nuevo método para estimar la condición del pavimento, tal como se conduce por el Índice de Condición de Pavimentos (PCI), utilizando el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), que es estrictamente la evaluación directa de la condición del pavimento.

La investigación evaluó la aplicabilidad del IRI como una variable predictiva del PCI. Se desarrollaron modelos paramétricos de la condición del pavimento en términos de la rugosidad de las muestras utilizando el IRI y asociando los datos del PCI usando un software fácilmente disponible para calificar la condición del pavimento. Una transformación de un modelo de regresión lineal predice la condición del pavimento dada la rugosidad. Por lo que, se confirma la aceptación del IRI como una variable predictiva del PCI. Además, un análisis de varianza efectuado confirma la existencia de fuertes relaciones entre ambas variables. La figura 7.8 resume los resultados de forma ordenada para el rango total de aplicación de la relación.

Una vez obtenida la relación para los dos índices empleados por los modelos de predicción, la siguiente tarea consiste en definir los límites a aplicar en el estudio para calificar el estado del pavimento en distintas condiciones (por ejemplo de bueno a deficiente).

En el caso de la alternativa de M&R planteada, Micro PAVER define este límite como PCI crítico, el cual es el valor del PCI en donde la tasa de disminución del PCI aumenta con el tiempo, o el costo de las acciones de mantenimiento preventivo localizado aumenta significativamente. Para el HDM-4 este límite se establece en base al valor de IRI máximo permitido, como se mencionó anteriormente este se ha fijado para un valor de 2.81 m/km.

Como ya se ha definido anteriormente el máximo de IRI permitido, el paso siguiente es definir el valor del PCI crítico, que pertenezca al límite establecido por el IRI, correspondiendo a un valor de 55, el cual fue estimado aplicando el modelo de regresión desarrollado por Park et al., (2004).

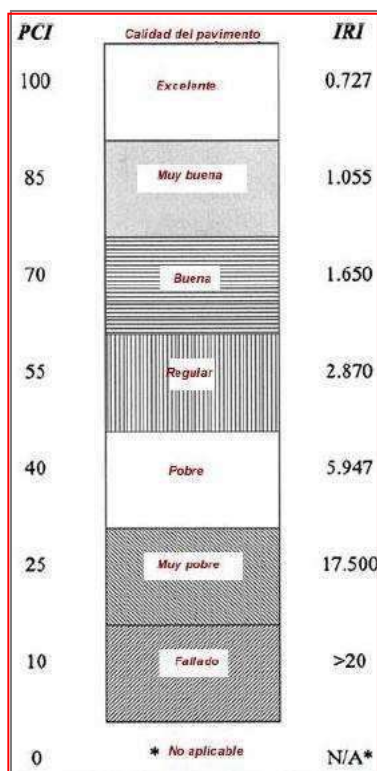
Una vez que se han establecido los límites aceptables en los modelos, podemos comparar los resultados arrojados por cada uno de ellos. Analizando el escenario 1 (predicción de la condición sin realizar acciones de mantenimiento) podemos observar que para el Micro PAVER durante el periodo de tiempo establecido el PCI se mantiene muy por encima del PCI crítico, calificando la condición del pavimento como buena. Por otro lado, para el mismo escenario el



HDM-4 predice que para el año 2017 el límite de 2.81 m/km se ve superado colocando la condición del pavimento como mala.

De los resultados obtenidos al aplicar el escenario 1 podemos concluir que para el caso de la predicción realizada con el Micro PAVER, no es necesario llevar a cabo acciones de mantenimiento en la sección de estudio en función del valor PCI obtenido, sin embargo, este sistema de gestión propone efectuar distintas políticas de mantenimiento para conservar en un nivel adecuado de servicio y proporcionar una superficie de rodamiento segura. Este tipo de acciones son las que se programaron para los escenarios 2 y 3.

En el HDM-4 los resultados obtenidos para el escenario 1 manifiestan la necesidad de aplicar las acciones de mantenimiento en un periodo de tiempo corto después de realizar la predicción, los trabajos programados tienen la función de mantener el IRI por debajo del límite establecido, por lo que, en los escenarios 2 y 3 se muestran los resultados de llevar a cabo estas políticas.



**Figura 7.8.** Rangos de calificaciones en pavimentos para valores de IRI y PCI (fuente: Al-Mansour, 2006).

Para el escenario 2 (programando acciones de mantenimiento preventivo y conservación rutinaria) se programan trabajos con los niveles más bajos de mantenimiento definidos para cada sistema de gestión.

Micro PAVER agrupa las acciones de MR&R en cuatro categorías: provisional localizado, preventivo localizado, global preventivo y mayor. La primera categoría se recomienda aplicarla en niveles del PCI por debajo el crítico, como espera a tratamientos de mayor nivel; la segunda categoría se define para disminuir la tasa de progresión del deterioro y se recomienda emplearla en calificaciones por encima del PCI crítico; debido a la buena condición de la sección de estudio predicha por el Micro PAVER las otras dos categorías no aplican en el estudio. La activación de los tratamientos se lleva a cabo en función de la familia de MR&R adoptada para el pavimento en estudio, en nuestro caso debido a la falta de información se utilizó la familia por defecto de MR&R definida por Micro PAVER.



## 7. Análisis de la curvas de deterioro.

---

De acuerdo a lo comentado anteriormente, las acciones de mantenimiento programadas en el escenario 2 definidas como tratamiento preventivo localizado, corresponden a llevar a cabo trabajos de tratamientos superficiales, como sellado de grietas y micro capas en frío. Se puede observar una disminución en la tasa de deterioro al programar estas acciones de mantenimiento, incrementando el valor del PCI al final del periodo de análisis en comparación con el escenario de no realizar ninguna acción de mantenimiento.

En el HDM-4 existe una mayor flexibilidad para programar las acciones de mantenimiento a llevar a cabo, sin embargo, para propósitos de realizar la comparación del escenario 2 con el Micro PAVER se programaron trabajos de mantenimiento rutinario, ya que este es el nivel más bajo de mantenimiento de acuerdo las técnicas comúnmente empleadas por la SCT.

Los tratamientos programados consistieron en riegos de sello, bacheo superficial y profundo, el HDM-4 permite programar los tratamientos en base a activadores definidos por el usuario para cada tipo de deterioro, por ejemplo, para el escenario 2 los activadores se definieron en función del área agrietada y el número de baches por kilómetro.

Los beneficios de programar las acciones de mantenimiento en el escenario 2 son más que evidentes ya que el IRI permanece por debajo del máximo especificado casi durante todo el periodo análisis, siendo superado este límite solo en el último año de predicción.

Respecto al escenario 3 (acciones de mantenimiento preventivo localizado y trabajos adicionales y mantenimiento rutinario) se plantean tratamientos de mayor nivel respecto a los trabajos realizados en el escenario 2.

Al aplicar las políticas de mantenimiento en el escenario 3 el Micro PAVER no presenta un beneficio sustancial la disminución de la tasa de deterioro, ya que al final del periodo de análisis el valor del PCI es de 92.0, lo cual no representa una diferencia notable con el escenario 2, donde, el valor final del PCI es de 91.0. Por lo que, los trabajos adicionales integrados por bacheos superficiales no constituyen una mejora significativa en la programación de las acciones de mantenimiento para el Micro PAVER en el escenario 3.

Los tratamientos programados en el HDM-4 para este mismo escenario en un inicio consistieron en trabajos de fresado y colocación de microcarpeta, sin embargo, al hacer las primeras predicciones con estos trabajos el IRI superaba el límite de 2.81 m/km, por lo que, fue necesario programar adicionalmente a los trabajos definidos acciones de bacheo superficial. Los resultados de aplicar el escenario 3 son muy similares a los obtenidos con el escenario 2, la diferencia es que en el último el valor del IRI máximo se ve superado al final del periodo de análisis, lo cual no sucede el escenario 3 ya el valor de IRI se mantiene por debajo del máximo para todo el periodo de análisis. Otro de los factores a comentar en este escenario se observó al tener la necesidad de programar trabajos de bacheo superficial para mantener el IRI en un nivel aceptable, lo que demuestra que para el HDM-4 un parámetro sustancial en la progresión del deterioro es la generación de baches provocado principalmente por el agrietamientos en la superficie y el desgranamiento de la capa de superficie.

Una comparación general de los modelos de predicción del Micro PAVER y el HDM-4, en el caso específico de la aplicación analizada en la investigación para la sección de estudio de la autopista México-Querétaro, nos indica que cada uno de los modelos arroja resultados muy distintos en función de la condición del pavimento predicha para el periodo evaluado.

Buscando las causas de la diferencia en los resultados obtenidos en la predicción del desempeño podemos mencionar las siguientes:



- El PCI es un índice subjetivo, en donde la confiabilidad de su obtención depende de la experiencia y juicio del personal que lo estime.
- Los modelos de inicio y progresión de baches y desgranamiento no fueron calibrados en la investigación, debido principalmente a que no fueron identificados en los inventarios de deterioros realizados, ya que las políticas de mantenimiento aplicadas en la sección de estudio no permitieron observarlos. Al no estar calibrados estos modelos puede que la tasa de deterioro se incremente debido a los factores adoptados por defecto.
- La poca información para aplicar los modelos de predicción del Micro PAVER, ya que la familia del pavimento fue definida solo con información de dos inventarios de deterioros en un periodo de tiempo muy corto.
- La naturaleza de los modelos de predicción del Micro PAVER al no considerar algunas variables muy influyentes en los procesos de deterioro de los pavimentos, como la capacidad estructural del pavimento.

Por último es necesario comentar que para hacer una comparación completa de los modelos de predicción utilizados en la investigación es necesario llevar a cabo una comparación del ciclo de vida de las acciones de mantenimiento programadas, sin embargo, esta comparación se sale del alcance definido para nuestra investigación.





---

# Conclusiones.

Del desarrollo de la presente investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones.

La evaluación de los sistemas de gestión de pavimentos utilizados en la investigación nos permitió comprender su funcionamiento, las diferencias y las capacidades de cada uno de ellos, lo que nos mostró el alcance que se tendría con el desarrollo del estudio, por lo que se concluyó, que en la presente investigación solo nos centraríamos al análisis de los modelos de predicción del desempeño de los sistemas de gestión utilizados.

De los módulos que integran un sistema de gestión de pavimentos, los modelos de predicción del desempeño tienen un papel fundamental en su funcionamiento, ya que son la base para estimar los costos del ciclo de vida de las acciones de mantenimiento programadas con los sistemas de gestión. Motivo por el cual se justifica el desarrollo de la investigación.

Analizar el funcionamiento de los sistemas de gestión utilizados permitió definir la información requerida y el plan de trabajo para aplicarlos a una sección de estudio localizada en la autopista México-Querétaro. La sección fue definida debido a su importancia estratégica dentro de la red de carreteras, además de que es considerada una de las más importantes de nuestro país y una de las más transitadas.

Las evaluaciones de campo y la recopilación de información permitieron conocer la condición en la que se encontraba la sección de estudio y cómo ha evolucionado su desempeño, el conocimiento de este tipo de información es fundamental para aplicar un sistema de gestión de pavimentos, sobre todo en lo referente a los modelos de predicción del desempeño.

Una vez que se contaba con la información para la aplicación de los sistemas de gestión se llevó a cabo el procesamiento de los datos, durante el desarrollo de esta etapa se consideró necesario proponer una metodología para subdividir la sección de estudio en tramos de menor longitud para propósitos de contar un mayor número de secciones de análisis y disminuir la dispersión de los datos.

Del desarrollo del proceso de aplicación de los sistemas de gestión de pavimentos utilizados, se observó que el Micro PAVER es bastante sencillo de aplicar, por otro lado, el HDM-4 requiere una gran cantidad de parámetros de entrada, lo que implica destinar una gran cantidad de recursos.

Para la aplicación del modelo de predicción del Micro PAVER se estimó de forma indirecta el Índice de Condición del Pavimento (PCI), por medio de imágenes de superficie obtenidas con equipos de adquisición digital, durante este proceso se observó que a pesar de que existe una metodología especificada para definir, cuantificar y calificar los deterioros superficiales en los



pavimentos, este es un proceso subjetivo y su confiabilidad depende de la capacidad del personal que efectúe los inventarios.

La técnica de modelación para predecir el desempeño del pavimento en Micro PAVER es conocida como “Análisis de familias” y consiste en identificar familias de pavimentos con desempeños similares. La familia definida en el estudio denominada “MEX-057” excluyó del desarrollo del modelo cuatro secciones que presentaban valores de PCI atípicos por debajo de las secciones incluidas en el desarrollo de la familia, al analizar estas secciones se identificó que presentaban deterioros distintos a los identificados en las otras secciones, lo que las coloca en otra familia.

Respecto al HDM-4, se consideró que para aumentar la confiabilidad de los modelos de deterioro de carreteras (RD) era necesario llevar a cabo su calibración, ajustando los factores ( $K_i$ ) para cada modo de deterioro, sin embargo, de acuerdo a la información disponible se decidió calibrar solo los modelos de agrietamiento, profundidad de rodera y de rugosidad.

Durante el análisis de la información disponible para calibrar los modelos (RD), se observó que no se presentaba una tasa de progresión del deterioro definida, por lo que fue necesario ajustar la tasa de progresión adaptando una técnica desarrollada por Austroads para cada sección analizada.

Las tasas de progresión estimadas y observadas presentan una baja dispersión una vez realizada la calibración de los modelos, lo que aumenta el nivel de confianza de los datos obtenidos con los modelos de predicción del HDM-4.

De acuerdo a la comparación realizada de los modelos de predicción se observan resultados muy distintos, Micro PAVER califica como buena la condición del pavimento en todo el periodo de análisis con un alto PCI. En el caso del HDM-4 el estado del pavimento pasa a un estado de deterioro muy alto, superando el límite de IRI establecido en un corto periodo de tiempo.

La programación de los distintos escenarios planteados nos permitió observar con más detalle los modelos de predicción de desempeño, llevando a cabo acciones de mantenimiento en la sección de estudio, además de que observamos de mejor forma la eficacia de los distintos tratamientos propuestos.

Las posibles causas de haber obtenido resultados muy distintos con los dos modelos de predicción pueden ser: la subjetividad al estimar el PCI, la falta de calibración de los demás modelos de deterioro en el HDM-4, el número limitado de datos para el desarrollo de la familia y la naturaleza de los modelos del Micro PAVER.

Como última conclusión, desde el punto de vista del autor, las ventajas del Micro PAVER con respecto al HDM-4 son la facilidad de operación, el bajo costo de la información requerida, lo cual lo hace una herramienta muy atractiva para las agencias que desean iniciar su Sistema de Gestión de Pavimentos. Por otro lado, el HDM-4 es una herramienta muy potente, debido sobre todo a la evolución que han tenido los modelos de deterioro, ya que se ha actualizado continuamente gracias a la experiencia de distintos países, que lo han aplicado, lo que lo convierte en una herramienta muy confiable para la mayoría de las agencias de carreteras.



---

## Bibliografía.

"A Manual on User Benefits Analysis of Highway and Bus-Transit Improvements," American Association of State Highway and Transportation Officials, 1977.

Aguerreberere R., Cepeda F. Estado superficial y costos de operación en carreteras. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica 30, 1991.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "Guide for Design of Pavement Structures", 1993.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "Guidelines for Pavement Management Systems", Washington, D.C., 1990.

Al-Omari, B., Darter, M.I.; *Relationships Between International Roughness Index and Present Serviceability Rating*; Transportation Research Record No. 1435. Pavement and Traffic Monitoring and Evaluation; National Academy Press; Washington; DC;. 1994.

ASTM D 6433-03. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken. United States.

Baladi, G. Y., Snyder, M. B., *Highway Pavements*, Student Workbook Publication No. FHWA HI-90-026 Federal Highway Administration, National Highway Institute Course No. 13114 September 1992

Bennett Christopher R. Chamorro, A., Chen, C., de Solminihac, H., Flintsch, G. Data Collection Technologies for Road Management. East Asia Pacific Transport Unit. The World Bank, Washington, D.C. Version 2.0 – February 2007."

Bernard D. Alkire. Lecture Notes for CE5403. Room 301 H Dillman Hall. Michigan Tech. August 2009.

Budras, J. (2001). A Synopsis on the Current Equipment Used for Measuring Pavement Smoothness. Federal Highway Administration, USA.

Butt, A. A.; Shahin, M. Y.; Feighan, K. J.; Carpenter, S. H. Pavement performance prediction model using the Markov Process. Transportation Research Record, Washington D. C., n.1123, p.12-19, 1987.



Carey, W. N.; Irick, P. E. The pavement serviceability: Performance concept. Highway Research Bulletin, Washington, D. C., n.250, 1960.

Carnahan, J. V.; Davis, W. J.; Shahin, M. Y.; WU, M. Optimal maintenance decisions for pavement management. Journal of Transportation Engineering, v.113, n.5, p.554-572, 1987.

Cenek, P.D. (2004). General Description of Skid Resistance. Internal Paper. Opus Central Laboratories, Wellington.

Cheetham, A.; Christison, T. J. The development of RCI prediction models for primary highway in the province of Alberta. Canadá: Department of Transportation, 1981.

COST Action 354 – Performance Indicators for Road Pavements. The way forward for pavement performance indicators across Europe. Publisher: FSV – Austrian Transportation Research Association Karlsgasse 5, 1040 Vienna, Austria. July, 2008.

Cox, D.; Miller, H. The theory of stochastic processes. New York: John Wiley and Sons, nc. 1965.

Crawford, J. E. and Katona, M. G., "State-of-the-Art for Prediction of Pavement Response", U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, Rept. FAA-RD-75-183, Sept. 1975.

Crespo Del Rio, R. (1991) Sistema de Gestión de Firms I, Equipos y Técnicas de Auscultación. Revista Rutas, N° 23, 10-14.

Crespo del Río, R. "Introducción a la Auscultación de Firms". Cuaderno AEPO N° 4. Madrid, 1997.

Crow (2003). A Literature Survey on Tire Surface Friction on Wet Pavements Application of Surface Friction Testers. Report 03-06, CROW, The Netherlands.

Darter, M. I. Requirements for reliable predictive pavement models. Transportation Research Record, Washington D. C., n.766, p.25-31, 1980.

De Solminihaç, H. (2001) Gestión de Infraestructura Vial, 2nd Ed. University texts, Engineering School. Catholic University of Chile Editions. Santiago, Chile.

Deighton, R., Sztraka, J., *Pavement Condition*, dTV Technical Guide (Volume 3), published by Deighton Associates Limited, 1995.

Durango-Cohen, P. and Madanat S. "Optimal Maintenance Policies in Infrastructure Management under Uncertain Facility Deterioration Rates: An Adaptive Control Approach," *Transportation Research Part A*, 2002, 36(9), pp. 763-778.

Garcia-Diaz, A. and M. Riggins, "Serviceability and Distress Methodology for Predicting Pavement Performance," *Transportation Research Record*, No. 997, 1984, pp.56-61.

FHWA (2003) Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project, FHWA-RD-03-031. Fourth Revised Edition. Federal Highways Administration, USA. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-P-338.pdf>.

FHWA (2004) Ground Penetrating Radar for Measuring Pavement layer Thickness. FHWA-HIF-00-015. [www.fhwa.dot.gov/infrastructure/asstmgmt/gprbroc.pdf](http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/asstmgmt/gprbroc.pdf).



## Bibliografía.

---

Haas, R.C.G. and Hutchinson, B.G., 1970. "A Management System for Highway Pavements", Proc., Australian Road Res. Board.

Haas, Ralph and Hudson, W. Ronald, 1978. Pavement Management Systems, McGraw Hill, New York.

Haas, R. and Hudson, W.R., "Future Prospects for Pavement Management", Proceedings. Second North American Conference on Managing Pavements, Vol.I, Toronto, Ontario, Canada, 1987.

Hass, R.; Hudson, W. R.; Zaniewski, J. Modern pavement management. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1994.

Highway Research Board. The AASHO Road Test. Washington D. C.: National Academy of Science, 1962. 352p. (Special Report N61E).

Hodges, J. W., J. Rolt and T. E. Jones (1975), The Kenya Road Transport Cost Study: research on road deterioration, Laboratory Report 673, Transport and Research Laboratory, Crowthorne, England.

Hudson, W.R., Finn, F.N., McCullough, B.F., Nair, K., and Vallergera, B.A., Systems Approach to Pavement Design. Systems Formulation. Performance Definition and Materials Characterization, Final Report, National Cooperative Highway Research Program Project I-10, Materials Research and Development, Inc., March 1968.

Hudson, W. R. State-of-the-art in predicting pavement reliability from input variability. U.S. Army Waterways Experiment Station, 1975.

Hudson, W.R. and Haas, R., and Pedigo, D.R., Pavement Management System Development, National Cooperative Highway Research Program Report 215, 1979.

Hudson, W. Ronald, Haas, Ralph and Uddin, Waheed, 1997. Infrastructure Management, McGraw Hill, New York.

Jiang, Y.; Saito, M.; Sinha, K. C. Bridge performance prediction model using the Markov chain. Transportation Research Record, Washington D. C., n.1180, p.25-32, 1988.

Karamihas, M. (2004). The 2004 FHWA Profiler Round-Up. Presentation on the results of the 2004 Profiler Comparison Project. University of Michigan Transportation Research Institute. [www.umtri.umich.edu/erd/roughness](http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness).

Karan, M. A.; Christon, T. S.; Cheetham, A.; Berdahl, G. Development and implementation of Alberta's pavement information and needs system. Transportation Research Record, Washington D. C., n.938, 1983.

Keane, P. L; Keane, M. I. An integrated decision-making methodology for optimal maintenance strategies. 1985,. Universidade de Illinois, Urbana, 1985.

Kenis, W. J., "Predictive Design Procedures—VESYS User's Manual", FHWA, U.S. Department of Transportation, Final Rept. FHWA-RD-77-154, Jan. 1978.

Kennedy, C. K. and Lister, N. W., "Prediction of Pavement Performance and the Design of Overlays", U.K. Transportation and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, England, TRRL Rept. 833, 1978.





Kulkarni, R. B. Dynamic decision model for a pavement system. Transportation Research Record, Washington D. C., n.997, p.11-18, 1984.

Li, N.; Xie, W-C.; Haas, R. Reliability-based processing of Markov chains for modeling pavement network deterioration. Transportation Research Record, Washington D. C., n.1524, p.203-213, 1996.

Li, N.; Haas, R.; Xie, W-C. Investigation of relationship between deterministic and probabilistic prediction models in pavement management. Transportation Research Record, Washington D. C., n.1592, p.70-79, 1997.

Li, N.; Kazmierowski, T.; Sharma, B. Verification of network level pavement roughness measurements. In: 80TH ANNUAL MEETING OF TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Washington, D. C, 2001.

Lytton, R. L.; Michalak, C. H.; Scullion. The Texas Flexible Pavement System. In: proceedings of fifth international conference on structural design of asphalt pavements, V.1. Ann Arbor: University of Michigan and Delft University of Technology, 1982.

Lytton, R. L. Concepts of pavement performance prediction and modeling. In: 2<sup>ND</sup> NORTH AMERICAN CONFERENCE ON MANAGING PAVEMENTS. 1987. p.2.1-2.19, v.2.

Madanat, S.; Ibrahim, W. H. W. Poisson regression models of infrastructure transition probabilities. Journal of Transportation Engineering, v.121, n.3, p.267-272, 1995.

Madanat, S.; Karlaftis, M. G.; McCarthy, P. S. Probabilistic infrastructure deterioration models with panel data. Journal of Infrastructure System, v.3, n.1, p.4-9, 1997.

Matsumura N. S. Estudo do Desempenho de Reforços de Pavimentos Asfálticos em Via Urbana sujeita a Tráfego Comercial Pesado. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia. São Paulo, Setembro de 2005.

Mauch, M.; Madanat, S. Semi parametric hazard rate models of reinforced concrete bridge deck deterioration. Journal of Infrastructure System, v.7, n.2, p.49-57, 2001.

McGhee, K.H. (2004). Automated Pavement Distress Collection Techniques: A Synthesis of Highway Practice. NCHRP Synthesis 334, Transportation Research Board, Washington D.C. [www.trb.org/publications/nchrp/nchrp\\_syn\\_334.pdf](http://www.trb.org/publications/nchrp/nchrp_syn_334.pdf).

NCHRP (1994) NCHRP Synthesis 203, Current Practices in Determining Pavement Condition. A Synthesis of Highway Practice. Transportation Research Record, National Research Council, USA.

Nestorov, I., M. Rowland, S. T. Hadjitodorov, and I. Petrov. "Empirical Versus Mechanistic Modeling: Comparison of an Artificial Neural Network to a Mechanistically Based Model for Quantitative Structure Pharmacokinetic Relationships of a Homologous Series of Barbiturates," *ASPS Pharmsic*, 1999, 1(4), pp.1-9.

Queiroz, C. (1983), A mechanistic analysis of asphalt pavement performance in Brazil, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technology, Vol. 52.

Paterson, W. D. O.; Chesher, A. D. On predicting pavement surface distress with empirical models of failure times. Transportation Research Record, Washington D. C., n.1095, p.45-56, 1986.



## Bibliografía.

---

Paterson, W. D. O., *Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management*, The International Bank for Reconstruction and Development, Washington, D.C. USA, 1987.

Peterson, D.E., "Comparative Analysis of Several State and Provincial Systems for Managing Pavements", Proceedings, Second North American Conference on Managing Pavements, Vol.I, Toronto, Ontario, Canada, 1987.

Peterson, Dale, "Life Cycle Cost Analysis of Pavements", NCHRP Synthesis of Highway Practice 122, Transportation Research Board, Washington DC, Dec. 1985.

PIARC (1995) International AIPCR Experiment on the Comparison and Harmonization on Texture and Skid Resistance Measures. PIARC Report AIPCR-01-04.t.

Ping W. V., He Yunxia. Evaluation of Flexible Pavement Performance Life in Florida. Departament of Civil Engineering FAMU-FSU College of Engineering Tallahassee, FL32310. June 1998.

Prozzi, J. A.; Madanat, S. Using duration models to analyze experimental pavement failure data. Transportation Research Record, Washington D. C., n.1699, p.87-94, 2000.

Prozzi, J. A. Modeling pavement performance by combining field and experimental data. 2001. 126p. Tese (Doutorado), Graduate Division of the University of California, Berkeley, 2001.

Ralph Haas, et al. REINVENTING THE (PAVEMENT MANAGEMENT) WHEEL. Fifth International Conference On Managing Pavements Seattle, Washington, August 11-14, 2001

Roads and Transportation Association of Canada, 1977. Pavement Management Guide, Ottawa, Canada.

Rodrigues, R. M. Estudo do trincamento dos pavimentos. 1991. 208p. Tese (Doutorado)—Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991

Sayers, M.W., Gillespie, T. and Paterson, W.D.O. (1986). Guidelines for Calibrating Road Roughness Measurements. World Bank Technical Report 46, The World Bank, Washington, D.C. [www.lpcb.org/lpcbdownloads/data\\_collection/1985\\_irbd\\_guidelines.pdf](http://www.lpcb.org/lpcbdownloads/data_collection/1985_irbd_guidelines.pdf).

Sayers, M. W.; Gillespie, T. D.; Queiroz, C. The International Road Roughness Experiment: a basis for establishing a standard scale for road roughness measurements. Transportation Research Record, Washington D. C., n.1084, p. 76-85, 1986b.

Sayers, M. W. On the calculation of International Roughness Index from longitudinal road profile. Transportation Research Record, Washington D. C., n.1501, p.1-12, 1995.

Sayers, M. W.; Karamihas, S. M. The little book of profiling: basic information about measuring and interpreting road profiles. Ann Arbor: University of Michigan, Transportation Research Institute, 1998. 100p.

Scrivner, F.H., Moore, W.M., McFarland, W.F., and Carey, G.R., System's Approach to Flexible Pavement Design, Texas Transportation Institute Research Report 32-11, 1968.



Shahin M. Y., Darter M. I., and Kohn S. D., "Development of a Pavement system, Vol I: Airfield Pavement Condition Rating, Technical Report NO. AFCEC-TR-76-27, U. S. Air Force Civil Engineering Center, Tyndall AFB, FL, 221 pages, November 1976.

Shahin, M. Y.; Kohn, S. Pavement maintenance management for roads and parking lots. Illinois: Construction Engineering Research Laboratory of USAGE, 1981. (Technical Report M-310).

Shahin, M. Y. y Schmidt, Jeff. Pavement Condition Analysis and Development of Initial M&R Prioritization for Local Agencies. 4th International Conference on Managing Pavements (1998).

Shahin M.Y. Pavement Management for Airports, Roads, and Parking lots. Third Edition, Chapman and Hall, kluwer Academic Publisher, Norwell, Massachusetts, USA (1998).

Silva, F. M.; Van Dam, T. J.; Bulleit, W. M.; Ylitalo, R. Proposed pavement performance models. Transportation Research Record, Washington D. C., n.1699, p.81-86, 2000.

Solorio M. R., Hernández D. R. Gómez L. A. (2004). Análisis de sensibilidad de los modelos de deterioro del hdm-4 para pavimentos asfálticos. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Publicación Técnica No 253.

Spangler, E. B.; Kelly, W. J. GMR Road Profilometer, a method for measuring road profile. Warren, Michigan: General Motors Corporation, 1964. (Research Publication GMR-52).

TRL (1986). Operating Instructions for the TRL Dynamic Cone Penetrometer. Overseas Unit, Transport Research Laboratory, Crowthorne.

Way, G. B. and J. Eisenberg (1980), Pavement Management System for Arizona - Phase II: verification of performance prediction models and development of database, Arizona Department of Transportation, Phoenix.

Williams, E.B., "Outline of a Proposed Management System for CGRA Pavement Design and Evaluation Committee", Proc., Canadian Good Roads Association, 1968.

Wotring, Donald C., Baladi, Gilbert Y., Buch Neeraj, and Bower Steve (1998) "Pavement Distress and Selection of Rehabilitation Alternatives" in Transportation Research Record 1629, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp 214-225.

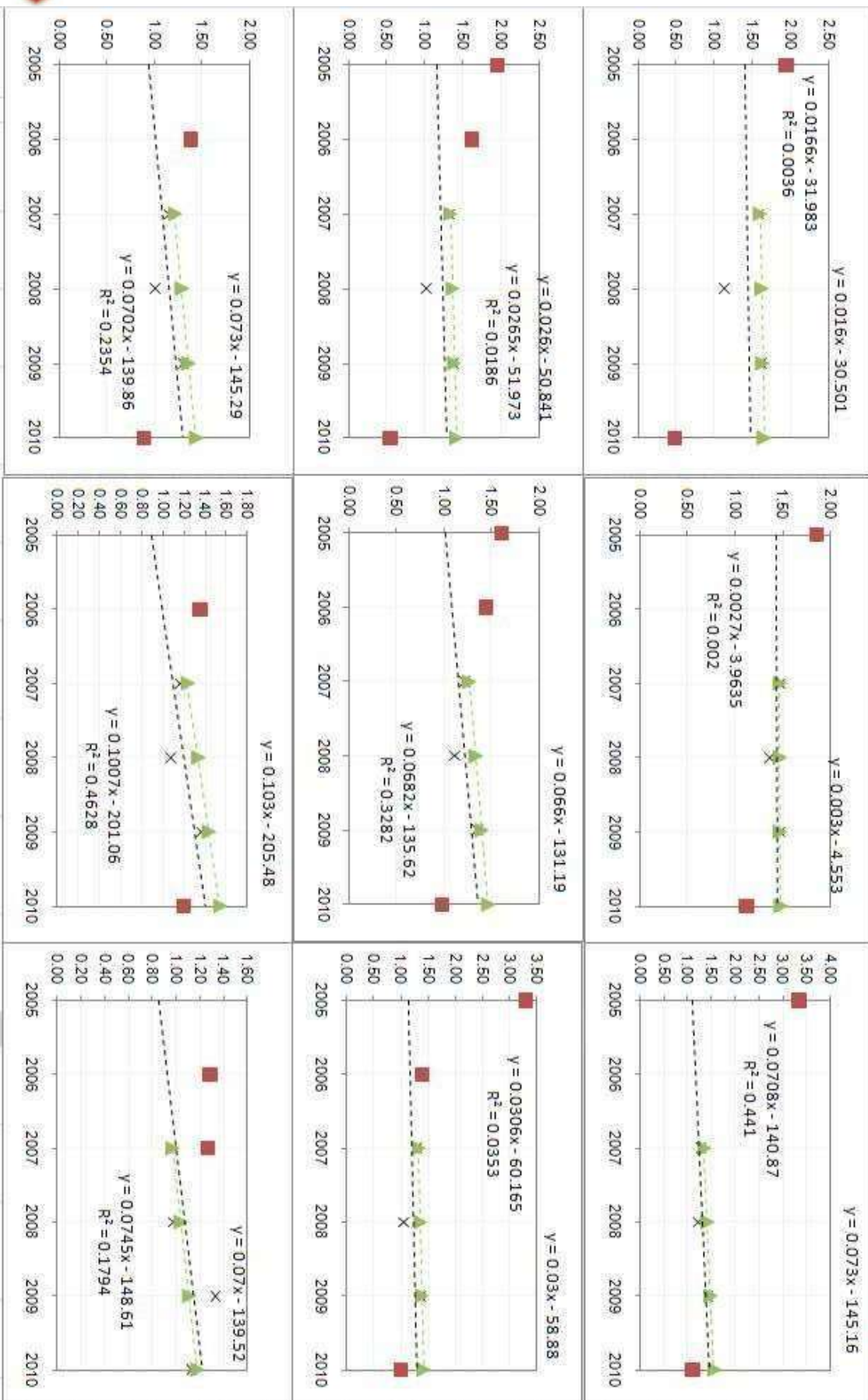


---

## **Anexo A. Ajustes de la tasa de progresión de deterioro.**

### **IRI y Profundidad de Rodera.**

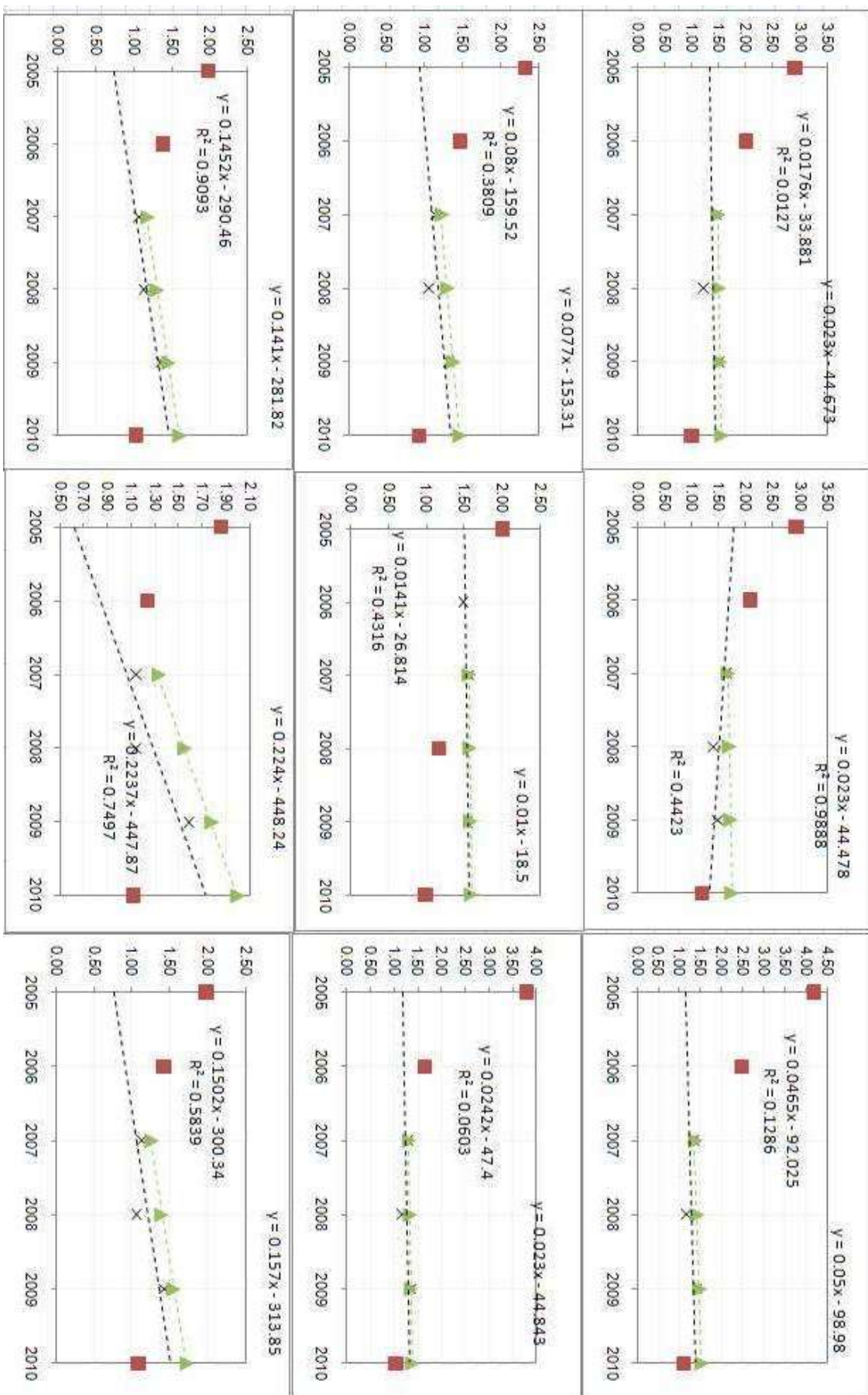
# IRI cuerpo 1



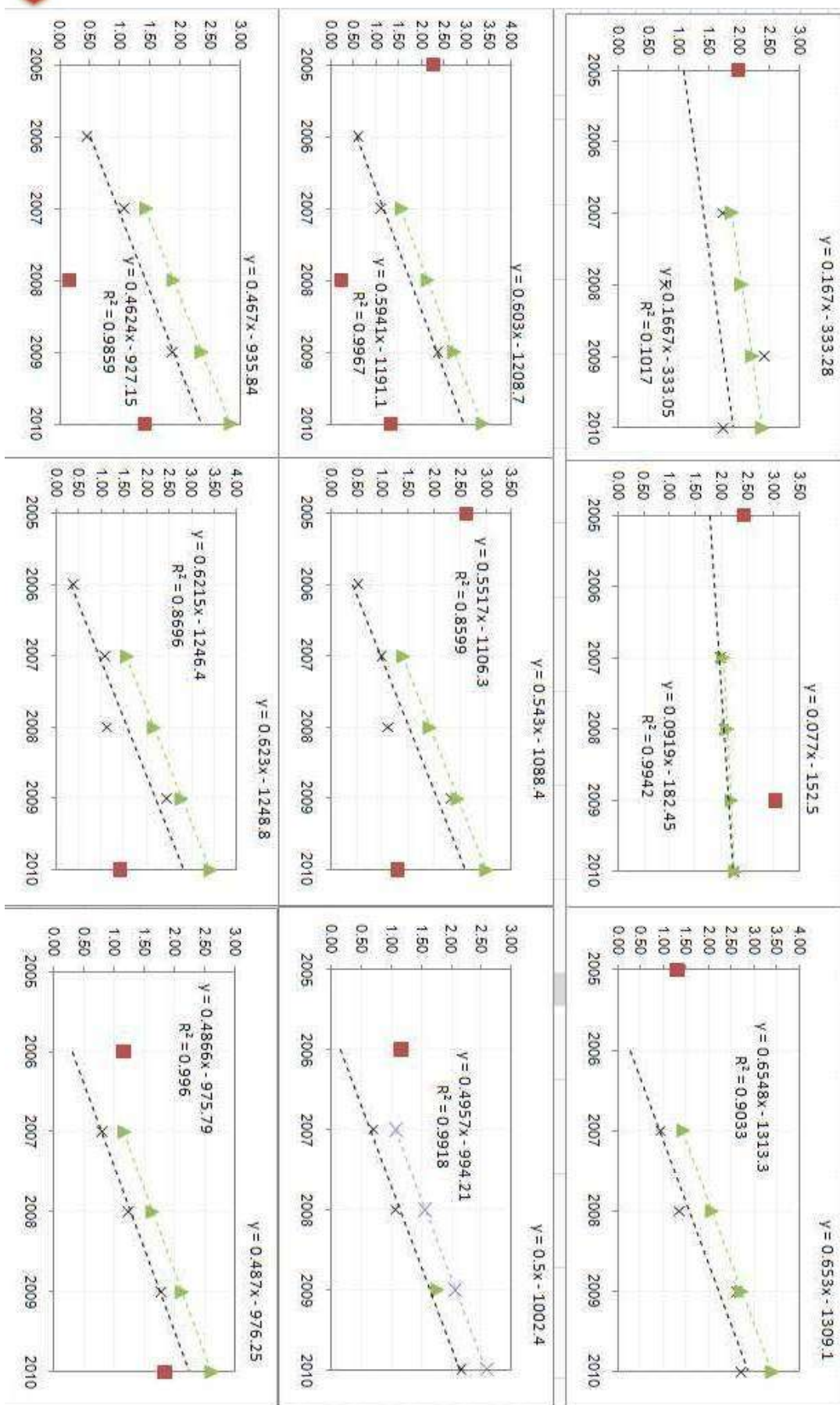




## IRI cuerpo 2



# Profundidad de Rodera cuerpo 1





## Profundidad de Rodera cuerpo 2

