



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

# Capacidad estructural y conservación de pavimentos asfálticos a nivel de red

---

José Ricardo Solorio Murillo  
Montserrat Montoya Ortega

Publicación Técnica No. 642  
**San Fandila, Qro.**  
2021

ISSN 0188-7297



Esta publicación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura de Vías Terrestres del Instituto Mexicano del Transporte por el Dr. José Ricardo Solorio Murillo y por Monserrat Montoya Ortega.

La publicación es el producto final del proyecto de investigación interna II-03/18, "Capacidad estructural y conservación de pavimentos asfálticos a nivel de red".

Se agradecen los comentarios y sugerencias de la Dra. Natalia Pérez García, Jefa de la División de Laboratorios de la Coordinación de Infraestructura de Vías Terrestres.



# Contenido

---

	Página
Índice de figuras .....	v
Índice de tablas .....	vii
Sinopsis.....	ix
Abstract .....	xi
Resumen ejecutivo.....	xiii
Introducción.....	1
1. Antecedentes .....	3
2. Datos empleados en el estudio.....	7
3. Análisis de regresión $D_0 - IRI$ .....	19
4. Elementos para la aplicación del HDM-4 .....	29
5. Obtención y comparación de programas de obra .....	37
6. Conclusiones .....	55
Bibliografía .....	59



## Índice de figuras

---

Figura 2.1. Resumen de estadística descriptiva del <i>IRI</i> . .....	8
Figura 2.2. Histogramas de las mediciones de <i>IRI</i> . .....	9
Figura 2.3. Resumen de estadística descriptiva para $D_0$ . .....	10
Figura 2.4. Histogramas de las mediciones de $D_0$ . .....	11
Figura 2.5. Diagramas de caja de la profundidad de roderas. ....	13
Figura 2.6. Diagramas de caja del porcentaje de agrietamiento. ....	14
Figura 2.7. Diagramas de caja del coeficiente de fricción. ....	14
Figura 2.8. Diagramas de caja de la profundidad de la macrotextura. ....	15
Figura 3.1. Árbol de decisiones del SIMAP, con base en (Rico, et al., 1990). ....	20
Figura 3.2. Pronóstico del <i>IRI</i> en el HDM-4, a partir de (Odoki & Kerali, 2006). ....	21
Figura 3.3. Gráfico $D_0$ - <i>IRI</i> del mejor ajuste (cuerpo “B” de la carretera 3). ....	26
Figura 3.4. Gráfico de residuos del mejor ajuste (cuerpo “B” de la carretera 3). ....	26
Figura 3.5. Gráfico $D_0$ - <i>IRI</i> del peor ajuste (cuerpo “A” de la carretera 3). ....	27
Figura 3.6. Gráfico de residuos del peor ajuste (cuerpo “A” de la carretera 3). ....	27
Figura 5.1. Larguillo de deflexiones y segmentos homogéneos del tramo 2 - A. ...	38
Figura 5.2. Espacio de trabajo del HDM-4 para la realización de los análisis. ....	40
Figura 5.3. Larguillo de deflexiones y segmentos homogéneos del tramo 3 - B. ...	51





## Índice de tablas

---

Tabla 2.1 Clasificación de los tramos según la media de $D_0$ e $IRI$ . .....	13
Tabla 2.2 Clasificación de los tramos según los distintos indicadores. ....	16
Tabla 2.3 Promedios de $TDPA$ y porcentaje de vehículos pesados.....	16
Tabla 3.1 Resultados del análisis de regresión $D_0 - IRI$ . .....	24
Tabla 4.1 Parámetros del HDM-4 para la intervención en pavimentos asfálticos..	29
Tabla 4.2 Evolución de $D_0$ en el tramo 1 - A.....	32
Tabla 4.3 Estándares de conservación definidos para los análisis. ....	34
Tabla 4.4 Vehículos de la flota utilizada en el estudio (Arroyo, et al., 2018). ....	35
Tabla 4.5 Datos de calibración. ....	36
Tabla 5.1 Procesos de transformación de datos. ....	38
Tabla 5.2 Segmentos homogéneos del tramo 1 - A. ....	40
Tabla 5.3 Programa de obra del tramo 1 - A (CP).....	40
Tabla 5.4 Programa de obra del tramo 1 - A (REC+CP). ....	41
Tabla 5.5 Segmentos homogéneos del tramo 1 - B. ....	42
Tabla 5.6 Programa de obra del tramo 1 - B (CP).....	42
Tabla 5.7 Segmentos homogéneos del tramo 2 - A. ....	43
Tabla 5.8 Programa de obra del tramo 2 - A (CP).....	44
Tabla 5.9 Programa de obra del tramo 2 - A (REC+CP). ....	45
Tabla 5.10 Segmentos homogéneos del tramo 2 - B. ....	46
Tabla 5.11 Programa de obra del tramo 2 - B (CP).....	47
Tabla 5.12 Programa de obra del tramo 2 - B (REC+CP). ....	48
Tabla 5.13 Segmentos homogéneos del tramo 3 - A. ....	49
Tabla 5.14 Programa de obra del tramo 3 - A (CP).....	50
Tabla 5.15 Programa de obra del tramo 3 - A (REC+CP). ....	50
Tabla 5.16 Segmentos homogéneos del tramo 3 - B. ....	52
Tabla 5.17 Programa de obra del tramo 3 - B (CP).....	52
Tabla 5.18 Programa de obra del tramo 3 - B (REC+CP). ....	53
Tabla 5.19 Costos y VPN de las alternativas de proyecto.....	53



## Sinopsis

---

En el presente estudio, se evaluaron los efectos de la omisión o la debida consideración de las características estructurales de los pavimentos en la preparación de programas de conservación. Para este fin, se utilizaron datos de tres carreteras federales con distintos niveles de deterioro. El trabajo se llevó a cabo en cuatro etapas. La primera, comprendió un análisis de estadística descriptiva de los datos de *IRI* y deflexión máxima del pavimento, así como un examen de la distribución de frecuencias de varios indicadores adicionales. En la segunda etapa, se investigó una hipótesis formulada en México sobre la posible correlación entre las características superficiales y estructurales de los pavimentos, para lo cual se emplearon técnicas de regresión lineal. La tercera etapa se dedicó a la preparación de algunos elementos adicionales necesarios para la generación de los programas con el HDM-4, incluyendo un procedimiento para el uso de parámetros estructurales como criterios de intervención. Finalmente, en la cuarta etapa se hicieron propiamente los análisis con el HDM-4. La principal conclusión del estudio es que el uso de información sobre la capacidad estructural genera diferencias claras en los programas de obra, que varían en función de las deficiencias estructurales de los tramos.



## Abstract

---

This study evaluated the effects of omitting or giving due consideration to pavement structural characteristics in preparing maintenance programs. For this purpose, data from three federal highways with different deterioration levels were used. The work was carried out in four stages. The first included a descriptive statistics analysis of the *IRI* and the maximum pavement deflection data, as well as an examination of the frequency distribution of several additional indicators. In the second stage, a hypothesis proposed in Mexico about the potential correlation between pavement surface and structural characteristics was evaluated using linear regression techniques. The third stage was devoted to setting up some additional elements needed for producing the work programs with HDM-4. This included a procedure for specifying structural parameters as intervention criteria. Finally, in the fourth stage, the HDM-4 analyses themselves were performed. The main conclusion of the study is that the use of structural capacity information produces clear differences in the work programs, which vary according to the structural deficiencies of the various sections.



## Resumen ejecutivo

---

El trabajo que se presenta a continuación fue realizado con el objeto de identificar, principalmente en términos cualitativos, las diferencias entre un programa de obra en el que se toma en cuenta la capacidad estructural de los tramos en estudio con respecto a otro formulado únicamente con base en los atributos de capacidad funcional.

Evidentemente, la posibilidad de no hacer una consideración expresa de la capacidad estructural solo puede ser admisible en el nivel de red de la gestión de activos, ya que en este nivel las soluciones propuestas son por lo regular preliminares y, al mismo tiempo, se permite la evaluación de alternativas no necesariamente óptimas desde el punto de vista técnico. De este modo, el estudio realizado se ubica necesariamente en el nivel de red, lo que ha quedado plasmado en su título.

Entre las motivaciones de este trabajo puede mencionarse el hecho de que, hasta hace algunos años, solo existían equipos para la medición puntual de deflexiones, como el deflectómetro de impacto. Si bien estos equipos han tenido un uso generalizado en evaluaciones a nivel de red, en realidad no son recomendables para aplicaciones en este ámbito debido a problemas de seguridad, control de tránsito y baja productividad. De cualquier forma, la falta de métodos de evaluación estructural adecuados para el nivel de red ha llevado a muchas organizaciones a no tomar en cuenta explícitamente la capacidad estructural en el desarrollo de sus programas de obra.

Adicionalmente, en el caso de nuestro país, la elaboración del programa anual de conservación de carreteras federales se lleva a cabo con el auxilio del sistema HDM-4. Entre los datos de entrada de este sistema figuran, ciertamente, distintas opciones para caracterizar la capacidad de carga de los pavimentos, no obstante, ninguno de ellos puede utilizarse en la definición de criterios de intervención, de manera que, en términos prácticos, el HDM-4 no provee mecanismos para establecer una relación directa entre las deficiencias estructurales y la activación de acciones para su remediación.

Los programas a los que se refiere la comparación objeto del presente trabajo se basan, por un lado, solo en características de la capacidad funcional y, por otro, en estas mismas características más atributos de capacidad estructural. Para los efectos del estudio, la capacidad funcional fue caracterizada mediante el Índice de Regularidad Internacional (IRI), y la capacidad estructural con la deflexión central del deflectómetro de impacto normalizada para una presión de 700 kPa y denotada por  $D_0$ . El último parámetro fue elegido debido a que constituye uno de los indicadores

de resistencia de pavimentos asfálticos del HDM-4 y a que, desde el inicio, se había previsto generar los programas de obra con esta herramienta.

Para el estudio, se empleó información proporcionada por una dependencia de gobierno responsable de la conservación de carreteras federales en el país. Los datos recibidos abarcan tres carreteras troncales con longitudes de 27, 150 y 105 km que, en lo sucesivo, se identificarán como *carretera 1*, *carretera 2* y *carretera 3*. La información incluye mediciones del *IRI* y de las deflexiones del pavimento efectuadas a intervalos de 20 y 100 m, respectivamente. Para la recopilación de las deflexiones se utilizó un deflectómetro de impacto.

Las distintas actividades contempladas en el trabajo fueron agrupadas en cuatro fases. En la primera, dada la importancia del *IRI* y de  $D_0$  para el estudio, se llevó a cabo un análisis detallado de estadística descriptiva de estas variables. Como parte del análisis, se elaboraron los histogramas de los dos indicadores por cada tramo. Cabe mencionar que se definió un tramo de análisis por cada cuerpo de cada carretera, con lo que el número total de tramos de referencia para los distintos procesos efectuados fue de seis.

En el análisis de estadística descriptiva se calcularon los siguientes parámetros para las seis muestras: media, desviación estándar, rango, coeficiente de asimetría y curtosis. Los resultados obtenidos en esta fase pueden resumirse como sigue:

- a) Las medias de las muestras varían entre 1.49 y 2.64 m/km en el caso del *IRI* y entre 0.21 y 0.54 mm en el de  $D_0$ .
- b) Si se ordenan las medias en forma creciente y se acomodan los demás parámetros en el mismo orden, se observa que la desviación estándar tiene una línea de tendencia similar y casi paralela a la de la media, lo que es congruente con la noción de que el nivel de dispersión de las mediciones es un indicador adicional de la magnitud del deterioro.
- c) Los histogramas de los tramos revelan, en términos generales, distribuciones con un marcado sesgo a la derecha y con un exceso de curtosis, lo que es compatible con los altos valores obtenidos para los rangos de las muestras.
- d) Para los tramos de la carretera 2 se obtuvieron histogramas bimodales que sugieren que, en un hecho relacionado con la mayor longitud de esta carretera (150 km), podrían existir zonas con procesos de deterioro del pavimento marcadamente distintos.

Adicionalmente, en esta fase se identificaron los principales rasgos de las distribuciones de otros parámetros incluidos en el paquete de información proporcionado por la dependencia, mediante la construcción de diagramas de caja. El conjunto de datos adicionales comprende profundidad de roderas, porcentaje de agrietamiento, profundidad de la macrotextura y coeficiente de fricción. Dividiendo



en tres partes los rangos de variación de cada parámetro, se hizo una clasificación relativa de los tramos empleando los descriptores *alto*, *medio* y *bajo*.

Para concluir con la primera etapa, se extrajeron datos del volumen y composición del tránsito del libro de datos viales que publica anualmente la Dirección General de Servicios Técnicos y se hizo también una clasificación relativa de los tramos en función del *TDPA* y del porcentaje de vehículos pesados.

La segunda fase del trabajo, se derivó del interés por evaluar una hipótesis planteada en el país años atrás con respecto a la posible relación de dependencia entre las propiedades de capacidad funcional y estructural de los pavimentos. Según esta hipótesis, en México, el deterioro superficial está vinculado con frecuencia a fallas estructurales profundas, por lo que debe aceptarse que existe algún tipo de correlación entre ambos fenómenos. La hipótesis, de hecho, sustenta uno de los nodos principales del árbol de decisiones del *Sistema Mexicano para la Administración de los Pavimentos*, desarrollado originalmente a principios de la década de los 90.

La posible relación entre la capacidad funcional y estructural de pavimentos es muy relevante para este trabajo, ya que, de verificarse su existencia, podría justificar el uso del nivel regularidad como criterio de intervención para subsanar deficiencias de tipo estructural.

Así, se hizo una primera exploración de la validez de la hipótesis citada mediante técnicas de regresión lineal. Específicamente, se generaron modelos de regresión lineal simple a partir de los datos de  $D_0$  y de *IRI* de cada uno de los tramos del estudio. A continuación, se enumeran los principales resultados de este ejercicio:

- a) Coeficientes de determinación  $R^2$  menores a 0.1 para cinco de los seis tramos. En el caso restante,  $R^2 = 0.3295$ .
- b) Niveles de desviación estándar del error residual cercanos a 1 m/km, valor comparable con el *IRI* de un segmento carretero en buen estado.
- c) Modelos estadísticamente significativos en la mitad de los análisis, para tramos con niveles altos de  $D_0$ . Entre estos modelos, figura el del tramo con el mayor valor de  $R^2$ .

Como puede apreciarse, los resultados indican que no es posible establecer una relación de dependencia directa entre  $D_0$  y el *IRI* para los tramos del estudio, por lo menos no en términos de un modelo de regresión lineal simple.

La siguiente etapa del trabajo estuvo dedicada a complementar las herramientas y datos necesarios para la realización de los análisis con el sistema HDM-4. En este sentido, aparentemente se tenía una incongruencia: por un lado se había previsto generar los programas de obra objeto de la comparación con el HDM-4 y, por otro, se sabía que el software no permite la definición de criterios de intervención basados en indicadores de la capacidad estructural.

Para sortear esta aparente incongruencia, se retomó un procedimiento originalmente desarrollado para su uso en cursos del IMT sobre la aplicación del HDM-4 en la obtención de programas de obra basados en el desempeño. En términos generales, el procedimiento se basa en la extracción del patrón de evolución del comportamiento estructural de los tramos del archivo de resultados del HDM-4, y en el uso de esta información para preasignar obras destinadas a la corrección de los defectos estructurales que pudieran detectarse. La última parte del procedimiento consiste en la edición de archivos de intercambio del sistema con las definiciones de los análisis creados para la generación de los programas.

Otro aspecto abordado en esta fase fue la definición de estándares de conservación vinculados a las alternativas necesarias para la generación de cada uno de los programas de obra. Se diseñaron los siguientes tres estándares:

- a) *Mantenimiento rutinario*, conformado por acciones como bacheo y sellado de grietas, el cual se vincula a una alternativa de referencia o alternativa base para la evaluación de las alternativas de proyecto.
- b) *Conservación periódica*, destinado a la atención de problemas de regularidad (determinados por la condición  $IRI \geq 2.5$  m/km) mediante la realización de trabajos de fresado y reemplazo de la carpeta asfáltica. El estándar también incluye las acciones de mantenimiento de rutina, y se utiliza la definición de la alternativa de proyecto con la que se genera el programa de obra que únicamente toma en cuenta la capacidad funcional.
- c) *Reconstrucción + conservación periódica*, que se integra con todos los trabajos del estándar previo y con obras de reconstrucción que se activan en los casos en los que se detectan deficiencias estructurales (caracterizadas por  $D_0 \geq 0.5$  mm). Se asigna a la alternativa de proyecto que genera el programa para efectuar la comparación.

Por último, en esta fase se integraron dos subconjuntos adicionales de información necesarios para la ejecución de los análisis con el HDM-4: la flota vehicular y los datos de configuración.

Con respecto al primer subconjunto, se integró una flota vehicular a partir de los vehículos y los datos contenidos en la edición de 2018 de la publicación del IMT sobre costos de operación vehicular base. Las flotas vehiculares son esenciales para estimar la rentabilidad de las alternativas de conservación en el HDM-4.

Los datos de configuración agrupan información sobre los flujos horarios del tránsito, la capacidad de los tramos, los parámetros climáticos y los coeficientes de calibración. En este caso, se emplearon datos por omisión del HDM-4 complementados con información contenida en el mismo paquete en el que se recibieron los indicadores del estado del pavimento.

En la cuarta y última etapa del trabajo se abordó propiamente la generación de los programas de obra. Con este fin, se aplicaron a cada tramo las acciones enunciadas a continuación:

- a) Dividir el tramo en segmentos homogéneos en función de la variación longitudinal de  $D_0$ , aplicando un algoritmo de segmentación desarrollado en el pasado para un proyecto externo.
- b) Realizar un primer análisis de estrategias, asignando el estándar de conservación periódica a la alternativa de proyecto y empleando los siguientes datos:
  - i. Año de inicio: 2020.
  - ii. Periodo de análisis: 10 años
  - iii. Tasa de actualización: 10 %.

El resultado de este análisis constituye el programa de obra basado exclusivamente en la capacidad funcional.

- c) Revisar el archivo de resultados del análisis anterior e identificar los segmentos y los años en los que se cumpla la condición  $D_0 \geq 0.5$  mm.
- d) Mediante un archivo de intercambio del HDM-4, crear un análisis de estrategias basado en el anterior y modificarlo de manera que la alternativa de proyecto contemple la ejecución de obras de reconstrucción para los segmentos y años identificados en el archivo de resultados. Con la correspondiente corrida, se generará el programa alternativo que toma en cuenta la capacidad estructural.
- e) Comparar ambos programas.

En general, los programas producidos por los dos análisis presentaron diferencias, las cuales fueron, obviamente, más evidentes en los segmentos con mayor incidencia de anomalías estructurales. Asimismo, derivado del hecho de que el costo unitario de la reconstrucción es mayor que el del fresado y reemplazo, los costos para el periodo de análisis de los programas con previsiones para la capacidad estructural fueron mayores, en la mayoría de los casos, que los de los programas basados únicamente en la capacidad funcional, lo que a su vez produjo menores márgenes de rentabilidad.



# Introducción

---

El presente documento describe los pormenores del desarrollo de un trabajo de investigación sobre *capacidad estructural y conservación de pavimentos asfálticos a nivel de red*, que tuvo como objetivo identificar las diferencias entre programas de obra elaborados con la consideración o la omisión de la capacidad estructural de los pavimentos.

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes del trabajo, entre los cuales pueden identificarse dos factores que afectan la disponibilidad o el uso de información sobre capacidad estructural: por un lado, la falta de equipos para evaluar en forma apropiada este atributo a nivel de red y, por otro, la imposibilidad de utilizar indicadores de resistencia de pavimentos como criterios de intervención en el sistema HDM-4, herramienta en la que se apoya la SCT para la elaboración del Programa Nacional de Conservación de Carreteras.

Los capítulos 2 a 5 describen las cuatro etapas principales en las que fue dividido el trabajo.

La primera etapa (capítulo 2), fue dedicada al examen de la información empleada en el estudio, que proviene de una entidad de gobierno con responsabilidad en la conservación de carreteras federales. El capítulo presenta un análisis de estadística descriptiva aplicado a mediciones de *IRI* y deflexiones máximas, así como los principales rasgos de las distribuciones de otros indicadores del estado del pavimento como la profundidad de roderas o el porcentaje de área agrietada.

La segunda etapa, descrita en el capítulo 3, se generó a partir de una hipótesis formulada tiempo atrás sobre la posible relación de dependencia entre la capacidad estructural y la capacidad funcional de pavimentos en México. Esta posible relación se consideró muy relevante para el estudio, en virtud de que podría servir como justificación para omitir la capacidad estructural en la estimación de las necesidades de rehabilitación de tramos de la red. La validez de la hipótesis fue explorada de manera inicial mediante técnicas de regresión lineal.

En el capítulo 4 se presenta la tercera etapa, en la cual se llevaron a cabo las siguientes tareas: i) Revisar un procedimiento desarrollado previamente para forzar el uso de indicadores de la capacidad estructural como criterios de intervención dentro del HDM-4; ii) Definir los estándares de trabajo vinculados a las alternativas de proyecto y a los programas que se deseaba comparar; iii) Integrar información sobre los vehículos representativos que circulan por las carreteras (flota vehicular) y sobre la configuración del HDM-4.

Por último, el capítulo 5 aborda la etapa principal del trabajo, relativa a la realización de las corridas del HDM-4 necesarias para la comparación de los programas. Se presentan aquí los programas obtenidos bajo ambas condiciones para los tramos del estudio y se hacen los contrastes pertinentes.

En la parte final del documento (capítulo 6) se resumen las conclusiones del estudio, agrupadas según las diferentes etapas en las que fue dividido.

# 1. Antecedentes

---

Desde hace unos cincuenta años, organizaciones encargadas de la operación y mantenimiento de carreteras en todo el mundo han considerado a los Sistemas de Gestión de Pavimentos como una herramienta fundamental para prever, jerarquizar y priorizar los trabajos de conservación y rehabilitación de pavimentos, buscando al mismo tiempo maximizar el valor de las inversiones relacionadas con estos trabajos.

Como disciplina, la gestión de pavimentos es un proceso sistemático para la recopilación de información y la toma de decisiones necesarias para procurar un uso óptimo de los recursos destinados a la conservación y rehabilitación de pavimentos (MG Lay Library, 2015).

La gestión de pavimentos se aplica en tres niveles: estratégico, de red y de proyecto (Haas & Hudson, 2015). El primer nivel, comprende la estimación de los trabajos y los recursos necesarios para cumplir con unos objetivos de largo plazo predefinidos y, a partir de ello, establecer políticas institucionales para la preservación y el desarrollo de la red. En el segundo nivel, se determinan las necesidades de intervención de corto y mediano plazo para el conjunto o un subconjunto de los tramos a cargo de la organización, y se aplican procedimientos de jerarquización de los trabajos y optimización de los recursos disponibles, a fin de obtener programas de obra anuales y plurianuales que maximicen la rentabilidad de las inversiones. El nivel de proyecto aborda el diseño de detalle de los trabajos contenidos en los programas y, generalmente, contempla la identificación y análisis de alternativas y la elaboración del proyecto ejecutivo de cada una de las obras.

En los tres niveles de la gestión de pavimentos, se requiere de una evaluación adecuada del estado presente de los tramos, así como de una estimación de su deterioro posterior para anticipar los trabajos de conservación futuros. El estado de los pavimentos se determina a través de dos tipos de evaluaciones (Bennett, et al., 2007):

- *Evaluación funcional.* Proporciona información sobre características superficiales de los pavimentos que afectan directamente la seguridad y el confort de los usuarios. Las principales características medidas en una evaluación funcional son, en lo relativo a la seguridad, la resistencia al deslizamiento y la textura superficial y, por lo que toca al confort, la regularidad del pavimento.
- *Evaluación estructural.* Indica si el pavimento tiene un desempeño satisfactorio bajo las cargas del tránsito y las condiciones medioambientales prevalecientes. En este caso, se evalúan básicamente la capacidad

portante, en términos de indicadores como las deflexiones del pavimento, y los deterioros superficiales. Cabe aquí mencionar que varios deterioros superficiales pueden provocar en forma indirecta problemas funcionales: por ejemplo, el llorado de asfalto afecta la resistencia al deslizamiento, y los baches, dependiendo de su incidencia, aumentan en menor o mayor medida la regularidad.

Normalmente, la gestión de pavimentos a nivel de proyecto comprende una medición detallada de las características antes descritas, la cual se ha llevado a cabo desde hace mucho tiempo utilizando, en las primeras etapas de desarrollo, métodos manuales e inspecciones visuales y, más adelante, procedimientos automatizados en los que se incluyen pruebas no destructivas para la determinación de la capacidad estructural, como la ya referida medición de las deflexiones del pavimento.

La evaluación para los niveles estratégico y de red ha presentado históricamente mayores dificultades, ya que, por la extensión de las redes o subredes, los procedimientos basados en métodos manuales y visuales resultan poco eficientes. Sin embargo, en lo relativo a la capacidad funcional y a los deterioros, en las últimas décadas, estas dificultades se han ido solventado con el desarrollo de equipos basados en diversas tecnologías que permiten obtener los indicadores correspondientes a velocidad de operación.

Con respecto a la capacidad estructural, hasta hace poco tiempo, solo existían equipos para la medición puntual de las deflexiones como el deflectómetro de impacto (*falling weight deflectometer, FWD*) o los deflectómetros multicapa. Por lo regular, se acepta que el uso de estos equipos para evaluaciones a nivel de red no es recomendable, ya que conlleva problemas de seguridad, control de tránsito y también baja productividad.

La falta de métodos adecuados para la evaluación estructural ha provocado que muchas administraciones de carreteras utilicen únicamente mediciones de capacidad funcional y deterioros en sus evaluaciones a nivel de red, lo que puede llevar a subdimensionar las intervenciones requeridas en el futuro, ya que, en principio, no existe una relación de dependencia entre las características estructurales y funcionales de los pavimentos.

Para superar los problemas de evaluación estructural a nivel de red, en años recientes se han desarrollado en los Estados Unidos de América y en Europa equipos para medir en forma continua las deflexiones del pavimento a velocidades de operación (Rada, et al., 2016). Entre los equipos desarrollados con un futuro más prometedor figuran el *deflectómetro a velocidad de operación (Traffic Speed Deflectometer, TSD)* y el *deflectómetro de rueda móvil (Rolling Wheel Deflectometer, RWD)*. Junto con estos equipos, se han realizado estudios para determinar si los datos que proporcionan son útiles para la evaluación estructural de pavimentos como parte del proceso de gestión de pavimentos a nivel de red.



Por lo que concierne a México, en el caso de la red federal de carreteras, desde hace más de diez años los análisis a nivel de red se llevan a cabo con el auxilio del sistema de *Desarrollo y Gestión de Carreteras* (“*Highway Development and Management*” system, HDM-4) (Kerali, et al., 2006). Si bien, por un lado, el HDM-4 caracteriza la capacidad estructural mediante la deflexión central medida con equipo FWD (entre otras opciones), por otro lado este parámetro no puede emplearse como criterio de decisión para la selección de tratamientos de conservación, ya que el software no lo contempla en su lista de criterios de intervención. Así, en la práctica, la determinación de los trabajos de conservación requeridos para cumplir con los estándares de las entidades responsables se basa exclusivamente en las características funcionales y los deterioros superficiales, lo que ha colocado a las autoridades mexicanas en una situación similar a la que enfrentan las de otros países por la falta de evaluaciones estructurales adecuadas para el nivel de red.

Evidentemente, las limitaciones de los equipos de medición puntual de las deflexiones como el FWD también han afectado a las organizaciones de nuestro país. De lo anterior se han derivado iniciativas para explorar opciones para medir deflexiones en forma exhaustiva y a velocidad de operación, como el equipo europeo conocido como *curviámetro* (AENOR, 2016). Con ello, se ha intentado tener un mejor diagnóstico de la condición estructural de los pavimentos, aunque quedaría aun pendiente la forma de aprovechar esta información dentro del HDM-4.

Tomando en cuenta lo antes expuesto, se ha propuesto el presente proyecto con el propósito de identificar, primordialmente en forma cualitativa, las diferencias entre un programa de obra basado únicamente en la capacidad funcional de los pavimentos y otro en el que además se tome en cuenta la capacidad estructural. Para la elaboración de estos programas se aplicará la misma herramienta de programación que actualmente utilizan las dependencias responsables de la red federal, es decir, el software HDM-4, así como información recopilada por estas dependencias para diagnosticar el estado de la red.

Respecto a los indicadores de capacidad funcional y estructural, en el primer caso se utilizará el Índice de Regularidad Internacional (IRI) y en el segundo la deflexión central medida con deflectómetro de impacto y normalizada a 700 kPa.

Es importante subrayar que la omisión de los atributos de capacidad estructural solo puede ser admisible en el nivel de red de la gestión de pavimentos, ya que en este nivel generalmente se analizan opciones preliminares que pueden incluir acciones no necesariamente óptimas desde el punto de vista técnico.



## 2. Datos empleados en el estudio

---

### 2.1 Descripción general

Para el ejercicio realizado en este proyecto se utilizó información de tres carreteras troncales de la red federal. Cuando se hizo la solicitud de la información a la dependencia que la proporcionó, se pidió expresamente que, tomando en cuenta el conocimiento directo de la dependencia con respecto al estado de la red, las carreteras se eligieran de manera que existiera contraste entre sus niveles de capacidad funcional y, sobre todo, estructural.

Las vías de las que se obtuvo información, a las que en lo sucesivo se denominará, *carretera 1*, *carretera 2* y *carretera 3*, tienen longitudes del orden de 27, 150 y 105 km, respectivamente, y dos carriles de circulación por sentido. El conjunto de datos disponible para el análisis comprende los siguientes indicadores (entre paréntesis, se indica el intervalo de medición de cada indicador):

- a) Índice de Regularidad Internacional (IRI, 20 m).
- b) Profundidad de roderas (20 m).
- c) Porcentaje de agrietamiento (100 m).
- d) Profundidad de la macrotextura (20 m).
- e) Coeficiente de fricción (100 m).
- f) Deflexiones (100 m, obtenidas con deflectómetro de impacto).

Cabe mencionar que los datos indicados en los incisos *a)* al *d)* se midieron en los dos carriles de circulación de cada cuerpo, mientras que los de los incisos restantes solo en los carriles de baja velocidad. Por otro lado, se destaca que, además de los datos de deflexiones, se proporciona una evaluación estructural del pavimento que incluye elementos como una proyección del crecimiento del tránsito, retrocálculo de módulos elásticos (que supone la disponibilidad de información adicional sobre los espesores de las capas), estimación de la vida remanente y análisis de la cuenca de deflexiones.

### 2.2 Regularidad y capacidad estructural

Como introducción a las características de regularidad de las carreteras del estudio, en la Figura 2.1 se presenta un resumen de la estadística descriptiva de los datos de *IRI* por carretera y por cuerpo. Puesto que solo se disponía de información de deflexiones para el carril de baja velocidad, la caracterización de la regularidad se hizo con los datos de ese mismo carril, y se tomó como representativa de cada cuerpo. Los gráficos de la Figura 2.1 fueron construidos después de haber ordenando los cuerpos/carretera según el valor de la media (en orden creciente).

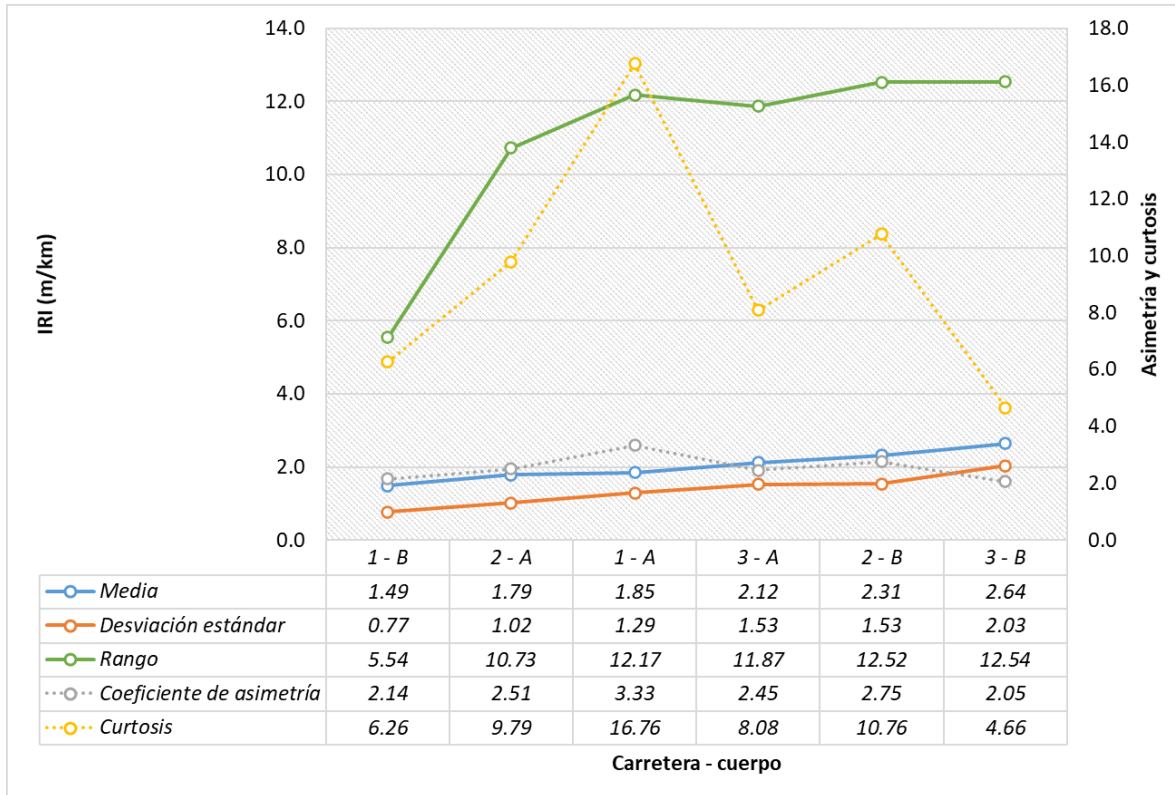


Figura 2.1. Resumen de estadística descriptiva del IRI.

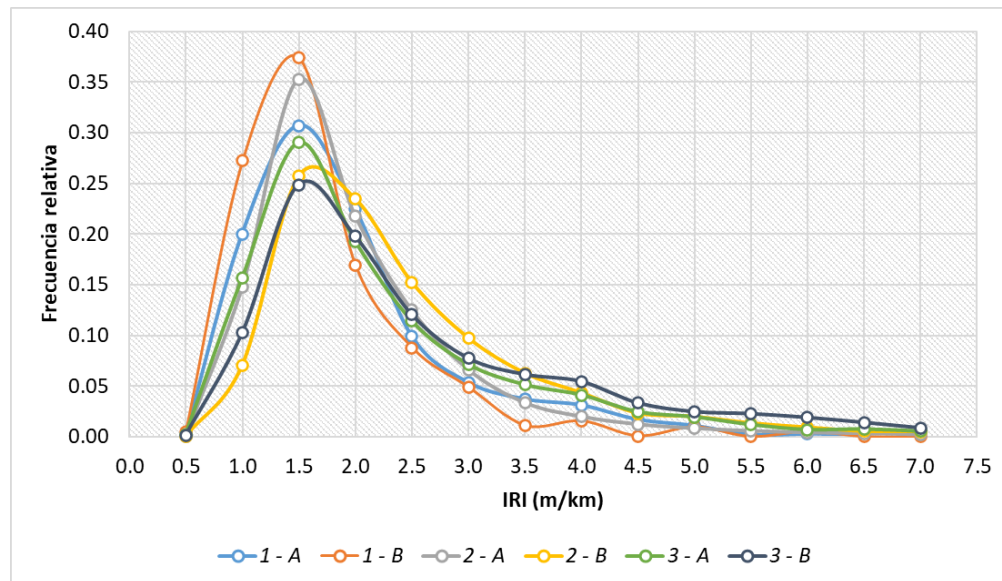
De acuerdo con esta figura, la media del IRI varía entre 1.49 y 2.64 m/km, con incrementos más o menos constantes (en promedio 0.23 m/km) entre los cuerpos de carretera ordenados. Asimismo, se aprecia un “crecimiento” de la desviación estándar parecido al de la media; de hecho, las curvas de ambos parámetros corren en forma aproximadamente paralela. Como se sabe, el aumento en la dispersión en mediciones del estado del pavimento es normalmente un reflejo de su degradación. En lo que respecta al rango, se observa un incremento notable (de casi 100 %) entre las dos primeras muestras aunque, para el resto, este parámetro se mantiene más o menos constante, con una magnitud elevada que se considera indicativa de la presencia de valores atípicos.

Las curvas del coeficiente de asimetría y la curtosis fueron graficadas empleando la escala del eje vertical secundario. De la primera de ellas se desprende que todas las muestras tienen un marcado sesgo hacia la derecha, lo cual es usual para datos del estado del pavimento. Por lo que respecta a la curtosis, en general las mediciones, evidencian un comportamiento leptocúrtico<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Es decir, con una curtosis mayor que el valor de 3 que corresponde a una distribución normal. Tanto la curtosis como la asimetría son medidas de la forma del gráfico de la distribución de probabilidad, e indican qué tanto esta se aparta de una distribución normal.

Tradicionalmente, la curtosis se ha relacionado con un pico más alto y pronunciado del gráfico de la distribución de probabilidad y con una mayor área bajo las colas. Al respecto, (Westfall, 2014)<sup>2</sup> afirma que la curtosis “virtualmente no indica nada con respecto a la forma del pico” y que solo “puede hacerse una interpretación sin ambigüedades acerca de ella en términos de lo extremo de las colas, ya sea por la existencia de valores atípicos en la muestra o por la tendencia de una distribución de probabilidad a producir estos valores”.

A fin de ilustrar la representación gráfica de las distribuciones de probabilidad correspondientes al *IRI*, en la Figura 2.2 se presentan los histogramas de los datos recopilados en los carriles de baja velocidad de las tres carreteras.



**Figura 2.2. Histogramas de las mediciones de *IRI*.**

Un primer aspecto interesante revelado por esta figura es que existen ciertas diferencias entre las condiciones de regularidad de los dos cuerpos de cada carretera. Así, por ejemplo, aunque la carretera 1 presenta, en general, un mejor *IRI* que las otras dos, la distribución que corresponde al cuerpo “B” tiene un pico ubicado ligeramente más hacia la izquierda y más alto que el del cuerpo “A”, así como una menor área bajo la cola derecha. Estas características gráficas se reflejan en menores valores de la media, la desviación estándar, el rango y la curtosis.

Los gráficos de la Figura 2.2 ponen de manifiesto, también, la fuerte asimetría de las distribuciones en la dirección en la que la irregularidad aumenta. Este comportamiento es natural si se considera, por una parte, que el *IRI* no puede ser menor que cero y, por otra, que existen innumerables factores que pueden generar

<sup>2</sup> Citado en (Brown, 2020).

segmentos con una irregularidad alta (reductores de velocidad, defectos locales, objetos que yacen en la superficie, etc.).

Respecto a la curtosis, todas las curvas muestran una acumulación de densidad de probabilidad en la zona de la cola derecha en los términos expresados por Westfall (Westfall, 2014), característica que es congruente con el exceso de curtosis señalado previamente.

Por otro lado, la capacidad estructural se representa en este trabajo a través de la deflexión central medida con deflectómetro de impacto (que se denota por  $D_0$ ) y normalizada para una presión de 700 kPa, ya que este es uno de los indicadores de resistencia de pavimentos asfálticos utilizados por el sistema HDM-4, herramienta con la que más adelante se obtienen los programas de obra.

En la Figura 2.3 se presenta el resumen de estadística descriptiva que corresponde a los valores de  $D_0$  recopilados en los carriles de baja velocidad de los diferentes cuerpos/carretera.

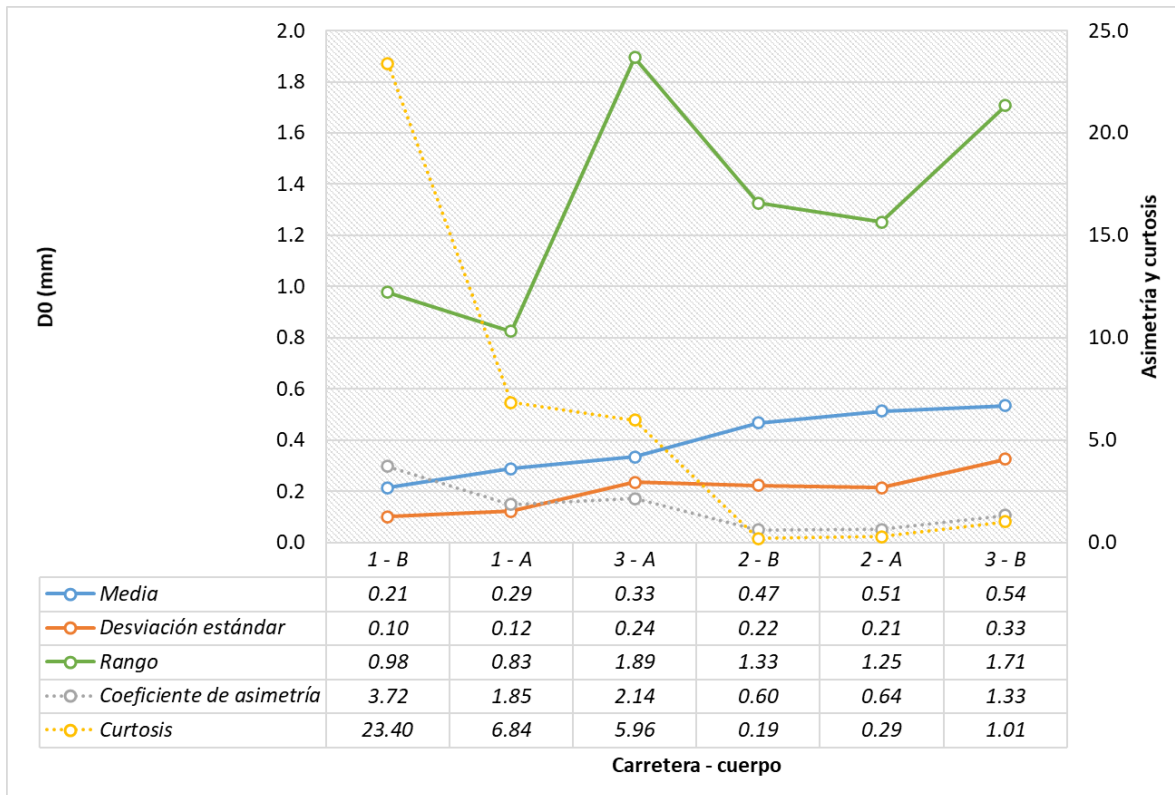


Figura 2.3. Resumen de estadística descriptiva para  $D_0$ .

En primera lugar, puede apreciarse que la secuencia de los cuerpos/carretera en relación con el orden creciente de la media es distinto al de la Figura 2.1, lo que constituye una cierta evidencia contraria a la hipótesis de dependencia entre capacidad funcional y estructural que se examina en el capítulo 3.



Por lo que se refiere a los parámetros de la estadística descriptiva en sí, la figura indica que la media de  $D_0$  varía en los tramos analizados entre 0.21 y 0.54, con un incremento promedio de 0.06 mm entre los valores ordenados. Como sucede con el *IRI*, la desviación estándar de la deflexión central crece en forma aproximadamente paralela a la media, con lo que la magnitud de ambos parámetros es congruente con un mayor estado de deterioro del pavimento.

Dependiendo de la homogeneidad de los tramos, el rango de un indicador del estado del pavimento suele ser también un reflejo del grado de deterioro, sin embargo, en este caso, se aprecia una tendencia cambiante en la que el tramo con un rango mayor (cuerpo "A" de la carretera 3 con 1.89 mm) tiene un promedio de  $D_0$  que puede considerarse intermedio (0.33 mm) entre los valores de los diferentes cuerpos. Este nivel tan extremo del rango, y su variabilidad en general, podrían ser también indicativos de la presencia de valores atípicos en las muestras de deflexiones.

A diferencia de lo observado para el *IRI*, la asimetría y la curtosis mayores de los datos de  $D_0$  ocurren, sobre todo, para los tramos con una media y una desviación estándar menores. Este hecho, constituiría un signo adicional de la ocurrencia de valores atípicos y, al mismo tiempo, mostraría la influencia que estos pueden tener sobre algunos parámetros de estadística descriptiva aun en los cuerpos de carretera con un mejor comportamiento estructural.

La Figura 2.4 contiene los histogramas de los datos de deflexión central. Más allá de que estos gráficos también revelan un comportamiento diferenciado de la variable de interés en los dos sentidos de circulación, vale la pena destacar los siguientes aspectos relevantes por carretera:

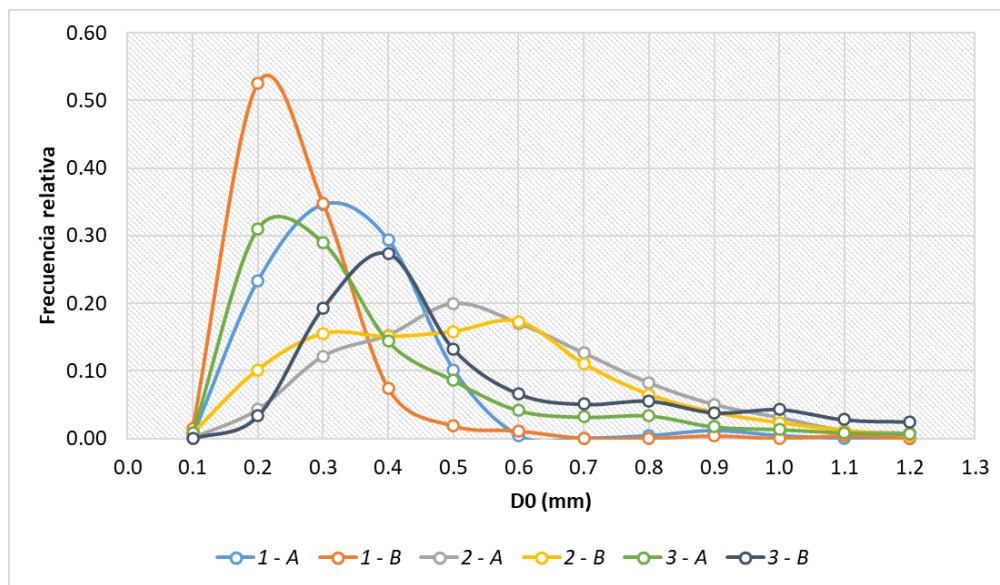


Figura 2.4. Histogramas de las mediciones de  $D_0$ .

- *Carretera 1.* Aunque los valores de la media, la desviación estándar y el rango son relativamente cercanos, la apariencia de los gráficos es claramente distinta. En consonancia con lo anterior, los valores del coeficiente de asimetría y la curtosis, que de hecho se conocen como *medidas de forma* (Brown, 2016), difieren de manera significativa. De hecho, la distribución del cuerpo “B” presenta los mayores valores de estos parámetros, lo cual es congruente con la extensión y densidad de la cola derecha en relación con la forma y altura del pico del histograma.
- *Carretera 2.* Para ambos cuerpos, la forma de los gráficos parece evidenciar distribuciones con dos picos o *bimodales*. Este comportamiento podría explicarse por la mayor longitud de esta carretera (150 km, esto es, 5.6 y 1.4 veces la longitud de las carreteras 1 y 3, respectivamente), que provoca un incremento en la probabilidad de que existan segmentos con más de un diseño estructural o con trabajos de construcción o conservación de distinta edad. Como consecuencia, las colas derechas tienden a desvanecerse, lo que produce una notable disminución de los valores del coeficiente de asimetría y la curtosis.

Para obtener las unidades de análisis del HDM-4, se ha previsto la división de las carreteras en función de la evolución longitudinal de las deflexiones, de manera que el fenómeno antes descrito no afecte a los programas de conservación.

- *Carretera 3.* Los cuerpos de la carretera 3 exhiben el mayor contraste entre las medidas de tendencia central y dispersión; asimismo, se aprecian diferencias importantes en las medidas de forma.

Como se desprende de las Figuras 2.1 y 2.3, en las carreteras objeto del presente estudio los valores medios del *IRI* y la deflexión central varían en rangos relativamente estrechos si se comparan con la escala completa de ambos parámetros.

En relación con  $D_0$ , el intervalo de variación de las medias ( $0.21 \leq D_0 \leq 0.54$  mm) es prácticamente un subconjunto del que corresponde, según la normativa de la SCT (SCT, 2017), a caminos de la red básica y secundaria con una “buena condición estructural” ( $0 \leq D_0 \leq 0.50$  mm). En cuanto al *IRI*, el intervalo observado ( $1.49 \leq IRI \leq 2.64$  m/km) se aproxima al especificado en la misma normativa (SCT, 2016) para clasificar el estado de un tramo de autopista o corredor carretero como “aceptable” ( $1.8 \leq IRI \leq 2.5$  m/km).

A fin de hacer una clasificación relativa de las tres carreteras en términos de las mediciones de regularidad y deflexión, los intervalos antes referidos se dividieron en tres partes iguales a las que se asignaron los descriptores *bajo*, *medio* y *alto*. Así, los valores medios calculados para los diferentes cuerpo quedaron clasificados como se indica en la Tabla 2.1.



Tabla 2.1 Clasificación de los tramos según la media de  $D_0$  e  $IRI$ .

Tramo	Nivel de $D_0$	Nivel de $IRI$
1 - A	Bajo	Bajo
1 - B	Bajo	Bajo
2 - A	Alto	Bajo
2 - B	Alto	Alto
3 - A	Medio	Medio
3 - B	Alto	Alto

Dada la considerable longitud de los tramos representados por cada uno de los seis cuerpos/carretera, los promedios de  $D_0$  e  $IRI$  resultan claramente insuficientes para describir su capacidad estructural y funcional. De hecho, en sí misma, la deflexión central tiene limitaciones para caracterizar la capacidad portante del paquete estructural en su conjunto, ya que refleja mayormente las propiedades de la carpeta asfáltica. Sin embargo, llama la atención que la clasificación de la Tabla 2.1 parece sustentar la hipótesis sobre la posible relación de dependencia entre la capacidad estructural y funcional que se aborda en el capítulo 3.

## 2.3 Datos complementarios

Según lo señalado al principio de este capítulo, además del  $IRI$  y  $D_0$ , los datos de los tramos comprenden mediciones de profundidad de roderas, porcentaje de agrietamiento, coeficiente de fricción y profundidad de la macrotextura.

A fin de complementar la valoración sobre el estado general de los pavimentos, en las Figuras 2.5 a 2.8 se presentan diagramas de caja de los parámetros anteriores para cada cuerpo de carretera. Nuevamente, se ha asignado a los cuerpos las mediciones que corresponden a los carriles de baja velocidad.

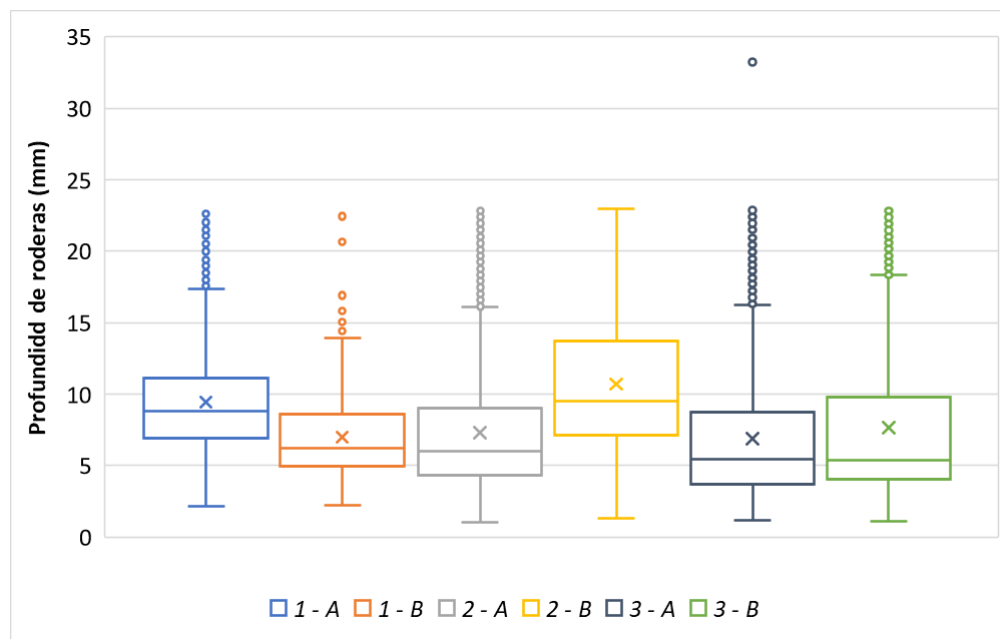


Figura 2.5. Diagramas de caja de la profundidad de roderas.

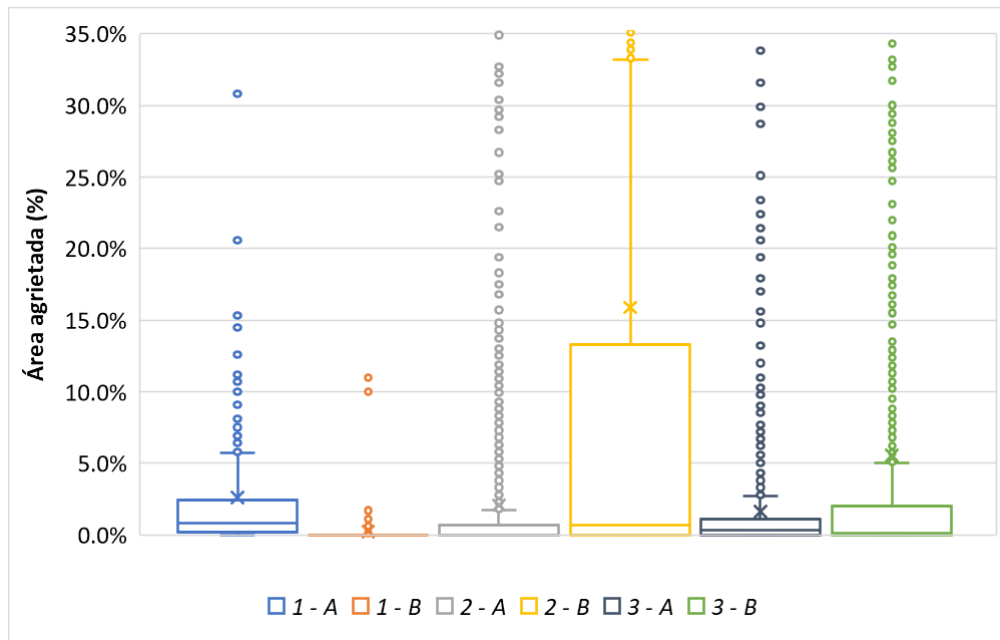


Figura 2.6. Diagramas de caja del porcentaje de agrietamiento.

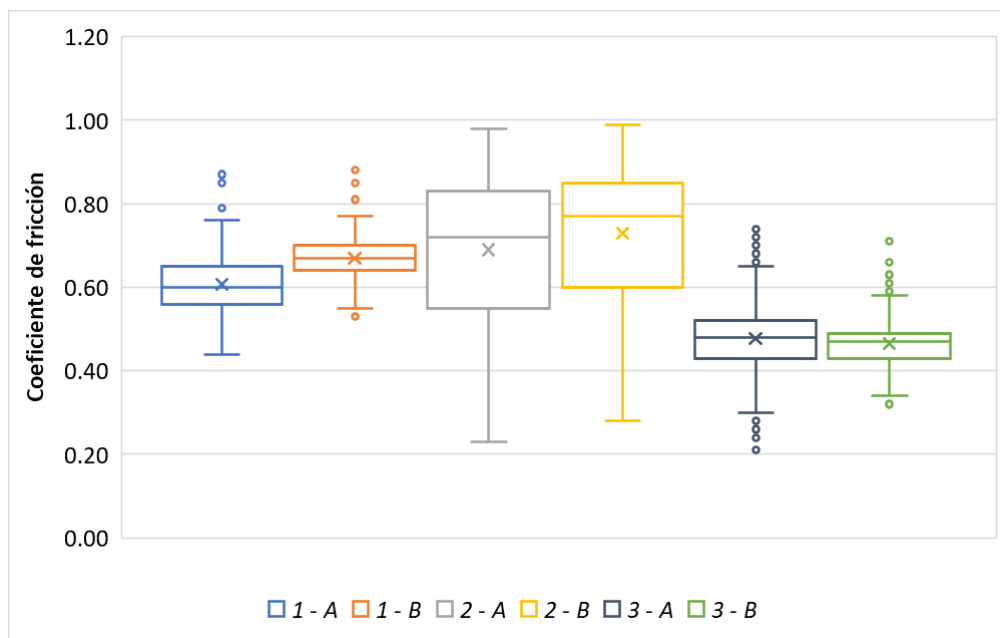


Figura 2.7. Diagramas de caja del coeficiente de fricción.

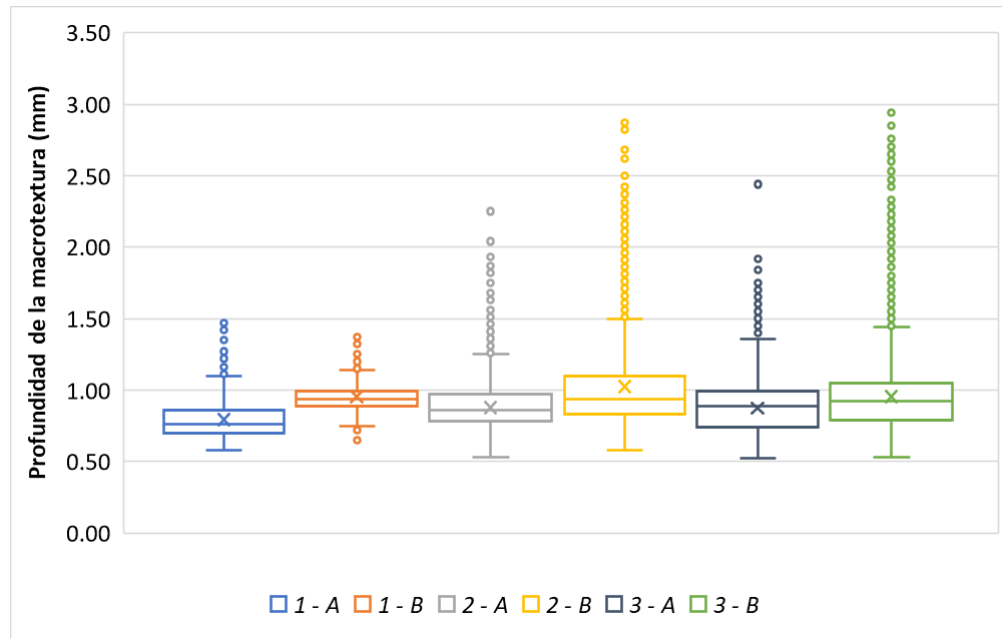


Figura 2.8. Diagramas de caja de la profundidad de la macrotextura.

En relación con los gráficos anteriores, se puede destacar que:

- a) Se tienen niveles significativos de profundidad de roderas, con valores medios en torno a 7 mm para cuatro de los seis tramos. Llama especialmente la atención el conjunto de mediciones del cuerpo “B” de la carretera 2, caracterizado por una media de 10.71 mm, un máximo de 22.98 mm y por no presentar valores atípicos a pesar de lo extremo del fenómeno de deformación permanente en este tramo.
- b) El porcentaje de área agrietada es moderado para la mayoría de los cuerpos de carretera, aunque se destaca la presencia de un sinnúmero de puntos atípicos que llegan a 100 % o muy cerca de este valor en el caso de los tramos 1 - A, 2 - A y 3 - B. De hecho, como puede apreciarse en la Figura 2.6, el agrietamiento graficado se limitó a un máximo de 35 % para dar visibilidad a la parte principal de los diagramas de caja. El tramo 2 - B sobresale nuevamente por los altos niveles de este modo de deterioro que, de manera contrastante, es mucho menor en tramo 2 - A.
- c) La norma N-CSV-CAR-1-03-007-20 de la SCT (SCT, 2020-1) establece que la resistencia al deslizamiento de un tramo carretero puede calificarse como *acceptable* si el valor medio del coeficiente de fricción  $CF$  se encuentra en el rango  $0.4 < CF \leq 0.6$ , y como *bueno* si  $CF$  cae en el rango  $0.6 < CF \leq 0.9$ . Tomando estos valores como referencia y de acuerdo con la Figura 2.7, se observa que, a excepción de los dos cuerpos de la carretera 3, los tramos objeto del presente estudio tienen buenas condiciones de fricción.

- d) En lo que concierne a la profundidad de la macrotextura (*MAC*), los promedios de las mediciones se encuentran en niveles de regular ( $0.75 < MAC \leq 0.90$ ) a bueno ( $MAC > 0.90$ ) según la normativa de la SCT (SCT, 2020-2).

Dividiendo los rangos de variación de cada uno de los parámetros anteriores de la misma forma que los de  $D_0$  e *IRI* y clasificando los tramos en función de los niveles del conjunto de todos los parámetros, la Tabla 2.1 puede modificarse para obtener la representación más amplia del estado general de los tramos que se muestra en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Clasificación de los tramos según los distintos indicadores.**

Tramo	Parámetro					
	$D_0$	<i>IRI</i>	Prof. de roderas	Área agrietada	<i>CF</i>	<i>MAC</i>
1 - A	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Medio	Bajo
1 - B	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Medio
2 - A	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Medio
2 - B	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
3 - A	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
3 - B	Alto	Alto	Bajo	Medio	Bajo	Alto

Con respecto al contenido de la tabla anterior y al de la Tabla 2.1, se enfatiza que se trata de comparaciones relativas entre los tramos y no de evaluaciones basadas en una escala adecuada que puedan emplearse con fines de diagnóstico. En estos términos, el tramo 1 - B presenta las mejores condiciones de capacidad funcional y estructural del conjunto, con una ligera deficiencia relativa en lo que se refiere a la profundidad de la macrotextura. Al mismo tiempo, los peores indicadores de desempeño corresponden al tramo 2 - B, que solo destaca por sus características vinculadas a la fricción.

Un elemento fundamental de las condiciones de operación de los tramos del análisis se refiere al volumen y composición del tránsito. A este respecto, utilizando como fuente el Libro de Datos Viales del mismo año en el que se recopilaban los datos del pavimento (SCT, 2018), se pueden calcular los valores medios de *TDPA* y porcentaje de vehículos pesados que se condensan en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3 Promedios de *TDPA* y porcentaje de vehículos pesados.**

Tramo	<i>TDPA</i> promedio	% de vehículos pesados
1 - A	21,514	14.8
1 - B	20,856	15.5
2 - A	1,754	56.0
2 - B	1,760	59.0
3 - A	12,895	33.5
3 - B	12,509	34.8

La Tabla anterior muestra que se tienen volúmenes de tránsito que podrían clasificarse como *muy alto*, *bajo* y *alto* para las carreteras 1, 2 y 3, respectivamente.

En cuanto al porcentaje de vehículos pesados, los niveles observados se podrían clasificar como *bajo*, *alto* y *medio*.

Es probable que el alto porcentaje de vehículos pesados registrado para la carretera 2 haya constituido uno de los detonantes del alto nivel de deterioro del cuerpo “B” de esta carretera. Sin embargo, muy probablemente existen factores causales adicionales como deficiencias en el diseño del pavimento, en los procedimientos constructivos o en los trabajos de conservación, ya que, además de que este nivel de deterioro solo se presenta en uno de los cuerpos, el volumen de TDPA de la carretera es bastante bajo.

La obtención de los programas de conservación con el HDM-4 requiere especificar algunos datos adicionales como el tipo de pavimento, el patrón de flujo vehicular, el tipo de velocidad/capacidad o la zonas climáticas que corresponden a las regiones en las que se ubican las carreteras. En el inciso 4.4 se resumen los valores definidos para cada una de estas variables.



## 3. Análisis de regresión $D_0$ - IRI

---

### 3.1 Relación entre capacidad estructural y regularidad de pavimentos en México

La posible relación de dependencia entre la capacidad estructural y la regularidad de pavimentos en el país es relevante para este trabajo porque, en un momento dado, podría justificar el uso de la regularidad como criterio para decidir en qué tramos intervenir con trabajos de refuerzo estructural o, al menos, en cuáles llevar a cabo evaluaciones detalladas de la capacidad de carga del pavimento.

A este respecto, en el documento conceptual del *Sistema Mexicano para la Administración de los Pavimentos*, una de las primeras publicaciones del IMT, Alfonso Rico *et al.* sostienen que, en México, “ha de aceptarse algún tipo de correlación entre la evolución del estado superficial del pavimento y su condición general, de manera que, cuanto más pobre sea la calidad superficial y más rápidamente se deteriore, peor debe ser la condición estructural” (Rico, *et al.*, 1990).

En tal documento, el término “estado superficial” se refiere esencialmente a la regularidad del pavimento, cuya caracterización en aquella época, al menos en lo que concierne a México, se realizaba empleando una medida conocida en inglés como *Present Serviceability Rating (PSR)*. Aunque esta denominación podría traducirse a nuestra lengua como *Calificación de la Capacidad Funcional Actual*, en México se ha recurrido más bien a la traducción alternativa *Índice de Servicio Actual (ISA)*.

El ISA o PSR fue propuesto durante la realización de la prueba AASHO a finales de la década de los 50 en los Estados Unidos, y se calcula como el promedio de las calificaciones, basadas en una cierta escala, que un grupo de observadores asignan a un tramo carretero en función del confort que experimentan cuando circulan sobre él (De Solminihac, 2001).

A través de este indicador, la prueba AASHO introdujo el concepto de *capacidad de servicio* o *capacidad funcional* de los pavimentos (en inglés *pavement serviceability*), que puede definirse como la competencia de estas estructuras para brindar a los usuarios un recorrido con niveles de confort y seguridad acordes con sus expectativas.

Durante las misma prueba AASHO, se determinó que el procedimiento para la obtención del ISA o PSR resultaba poco práctico para la evaluación de la capacidad funcional a nivel de red, por lo que se buscó ligarlo con otras características del pavimento que pudieran medirse directamente. En particular, se encontró una alta

correlación entre el ISA o PSR y la regularidad del pavimento, la cual justifica el uso de este parámetro en el SIMAP como medida del estado superficial.

Por su prevalencia en los años subsecuentes, el IRI reemplazó al ISA dentro del SIMAP como medida de la regularidad de los pavimentos. Sin embargo, el sistema mantuvo su hipótesis básica que, de hecho, determina uno de los principales nodos del árbol de decisiones de este sistema, como puede apreciarse en la Figura 3.1.

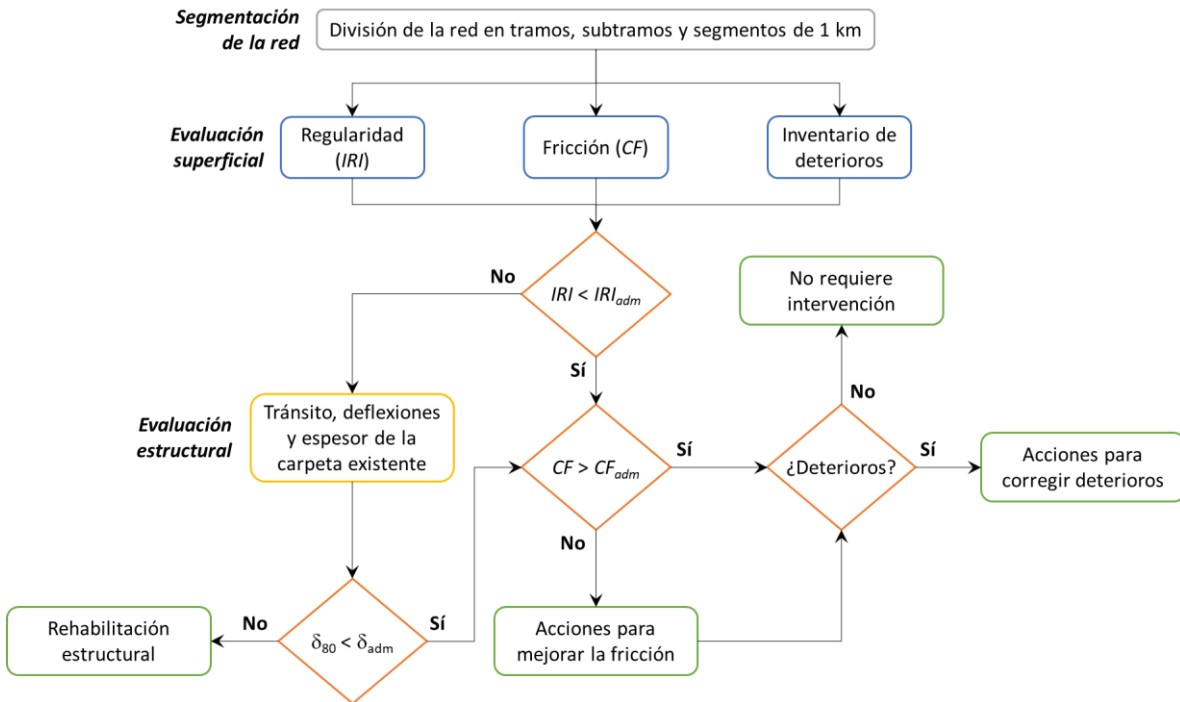


Figura 3.1. Árbol de decisiones del SIMAP, con base en (Rico, et al., 1990).

Con todo, de acuerdo con la Figura, el hecho de que el  $IRI$  rebase un cierto valor “admisibles” ( $IRI_{adm}$ ) no se traduce directamente en una recomendación para llevar a cabo acciones de refuerzo del pavimento, sino para realizar una evaluación estructural propiamente dicha.

En el documento conceptual del SIMAP, Rico *et al.* afirman también que los sistemas de gestión de pavimentos “proceden de países desarrollados, con excelentes redes de carreteras, (...) y están calibrados para reaccionar ante la evolución del estado superficial del pavimento (...). Se parte así de la base de que en todos los casos se tiene una falla funcional, pero nunca estructural” (Rico, et al., 1990). Los autores argumentan adicionalmente que, en México, “se considera que estos criterios no son aplicables en forma única, puesto que con mucha frecuencia los deterioros superficiales están ligados a fallas estructurales profundas”.

El tema de la posible relación de dependencia entre la capacidad estructural y la regularidad de pavimentos se encuentra prácticamente ausente en la literatura técnica internacional. Evidentemente, es de esperarse que el deterioro progresivo de las prestaciones estructurales de un pavimento eventualmente se reflejen en la



calidad de la rodadura, sin embargo, el sentido común sugiere que esto ocurrirá solo cuando el daño estructural acumulado sea de consideración. Por otro lado, es claro que la regularidad del pavimento puede ser afectada por causas no atribuibles al estado del paquete estructural en su conjunto, como deficiencias en los procesos constructivos (incluyendo las relativas al control de los niveles de las capas) o deterioro prematuro de la capa superficial.

En este mismo sentido, resulta interesante la forma en la que se encuentra estructurado el modelo de deterioro del sistema HDM-4 para el pronóstico del *IRI* en pavimentos asfálticos. Como se ilustra en la Figura 3.2, este modelo representa el incremento de este índice (que se calcula de manera anual) como una suma de contribuciones de los diversos modos de deterioro, incluyendo agrietamiento, desprendimiento de agregados, baches, roderas y, también, “deterioro estructural” (Odoki & Kerali, 2006).

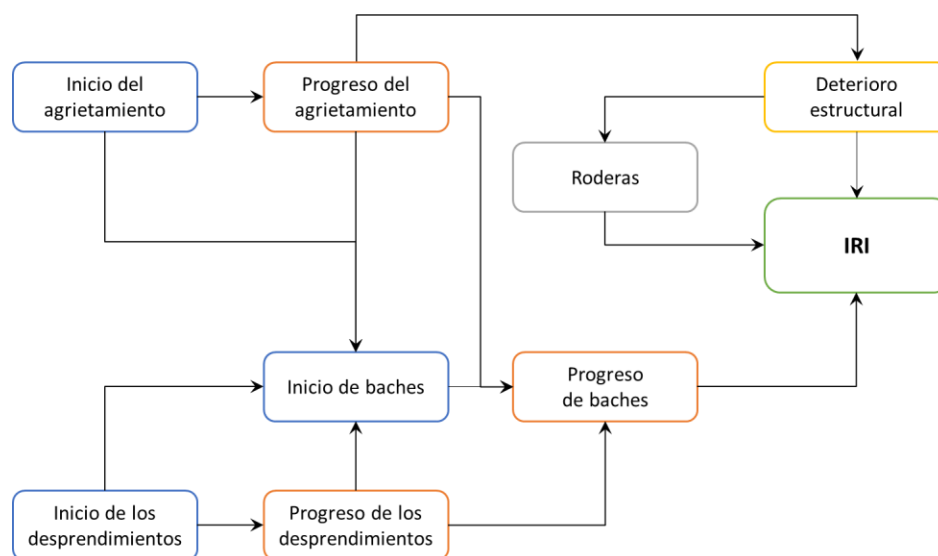


Figura 3.2. Pronóstico del *IRI* en el HDM-4, a partir de (Odoki & Kerali, 2006).

En cualquier caso, dado el antecedente de la hipótesis principal del SIMAP y sus repercusiones potenciales sobre las políticas de conservación de pavimentos en el país, se ha considerado pertinente verificar la posible relación de dependencia entre la capacidad estructural y la regularidad de pavimentos para las carreteras objeto del presente estudio.

## 3.2 Regresión lineal simple

En general, el término *regresión* se refiere a una técnica de generación de modelos empíricos para calcular en forma aproximada los valores de una variable aleatoria  $Y$  a partir de un conjunto de variables independientes  $x_i$ , sin asumir necesariamente la existencia de una relación de causalidad entre estas variables y la variable dependiente. Los modelos más sencillos de esta clase son los llamados *modelos de regresión lineal simple*, que pueden representarse genéricamente como:

$$Y = ax + b + \epsilon,$$

donde  $a$  es la pendiente de una recta descrita por los valores de la media de  $Y$  ( $\mu_Y$ ) para cada  $x$ ,  $b$  la ordenada al origen y  $\epsilon$  un término de error aleatorio que da cuenta de la diferencia entre la media y el valor observado de  $Y$  (Montgomery & Runger, 2003).

La solución de un problema de regresión lineal simple consiste en estimar los coeficientes  $a$  y  $b$ , de manera que el modelo pueda emplearse en la predicción del comportamiento futuro de  $Y$  o en el cálculo de su valor aproximado para cualquier  $x$ .

Normalmente,  $a$  y  $b$  se estiman mediante el *método de los mínimos cuadrados*, que debe su nombre al hecho de que se basa en la minimización de la suma de los cuadrados de los errores  $\epsilon$  para todos los elementos de la muestra.

Entre las herramientas más útiles para determinar la idoneidad de un modelo de regresión, figuran las pruebas de hipótesis estadísticas enfocadas en la verificación de la significación de las variables independientes del modelo. En este sentido, resulta de especial importancia la evaluación de las hipótesis definidas por:

$$H_0: a = 0$$

$$H_1: a \neq 0,$$

Como puede advertirse, la falta de evidencia para rechazar la hipótesis nula anterior implica la aceptación de que no existe una relación lineal entre  $x$  y  $Y$ , y lleva a concluir que  $x$  es de poca utilidad para explicar las variaciones de  $Y$  (o, en otras palabras, que la variable independiente no es significativa) o que la relación entre  $x$  y  $Y$  no es lineal.

Suponiendo que el error  $\epsilon$  se distribuye en forma normal e independiente, con una media de 0 y una varianza constante, las hipótesis antes planteadas pueden evaluarse mediante la prueba  $t$ . La variable  $x$  será significativa siempre que el valor  $P$  de la prueba sea menor que el nivel de significación utilizado. En los casos de modelos lineales multivariantes (es decir, con variables independientes  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), la prueba  $t$  puede aplicarse para evaluar la significación de cada una de las variables.

Adicionalmente, la adecuación de los modelos de regresión puede examinarse mediante la prueba  $F$  de significación global (Minitab, 2015), la cual se basa en un análisis de tipo ANOVA (análisis de varianza). A diferencia de la prueba  $t$ , que solo evalúa la significación de una variable independiente a la vez, la prueba  $F$  determina la significación del modelo en su conjunto. Las hipótesis objeto de esta prueba pueden plantearse en los siguientes términos:

*Hipótesis nula:* El ajuste del modelo propuesto es igual al del modelo sin predictores (variables independientes).

*Hipótesis alternativa.* El ajuste del modelo propuesto es significativamente mejor que el del modelo sin predictores.

Al igual que con la prueba  $t$ , para rechazar la hipótesis nula se requiere que el valor  $P$  de la prueba sea menor que el nivel de significación considerado. Por lo regular, si ninguna de las variables del modelo resulta significativa, el resultado de la prueba  $F$  será la falta de evidencia para rechazar la hipótesis nula. Cabe señalar que el estadístico de esta prueba se basa en la fracción de la variabilidad explicada por el modelo y en la variación residual.

Las últimas cantidades mencionadas, se relacionan también con el cálculo de un indicador de uso frecuente para caracterizar la bondad de ajuste de un modelo de regresión. Este indicador, conocido como *coeficiente de determinación* y denotado por  $R^2$ , se obtiene como el cociente entre la variabilidad atribuible a la regresión y la variabilidad total (Montgomery & Runger, 2003), por lo que toma valores en el rango  $[0, 1]$  y puede interpretarse como la proporción de la variabilidad de los datos que explica el modelo de regresión. Generalmente, se acepta que, conforme  $R^2$  se acerca a 1, se tiene un mejor ajuste.

Aunque el coeficiente de determinación tiene un uso muy amplio, debe tenerse en cuenta que, en los hechos, su obtención será de poca utilidad si no va acompañada de la aplicación de pruebas de significación como las antes mencionadas y de un examen de los errores residuales del análisis.

Con respecto al último punto, la revisión de los errores residuales permite averiguar si se cumplen los supuestos en los que se basa la formulación del modelo, especialmente los relativos al comportamiento de estos errores como una variable aleatoria independiente, con media igual a cero y varianza constante.

Como apoyo para la realización de la revisión, se recomienda la construcción de un gráfico del error como función de  $x$  o  $Y$ . Las anomalías más comunes que pueden aparecer en un gráfico de errores residuales incluyen cambios perceptibles de la varianza y patrones de evolución no aleatoria indicativos de diferentes tipos de sesgo. En el primer caso, usualmente se recomienda transformar los datos representados por la variable dependiente mediante funciones como el logaritmo natural. Los patrones no aleatorios generalmente implican que el modelo propuesto no es válido, por lo que debe considerarse la adición de una nueva variable, de un término de mayor orden o de una nueva interacción entre variables ya incorporadas al modelo.

### 3.3 Análisis de los tramos del estudio

En este inciso se presenta una primera exploración, mediante un análisis de regresión lineal simple, de la posible relación entre  $D_0$  y el IRI para los tramos del estudio. Al igual que en la descripción de los datos disponibles, el análisis se presenta por carretera y por cuerpo.

Dado que, según lo mencionado en el inciso 2.1, los intervalos de medición fueron de 100 m para  $D_0$  y de 20 m para el  $IRI$ , se han obtenido promedios de este parámetro a cada 100 m para que las muestras de ambos conjuntos de datos fueran compatibles. Por otro lado, el análisis se ha limitado a los carriles de baja velocidad, ya que solo se tienen datos de deflexiones para estos carriles.

La técnica de regresión lineal simple fue elegida por su sencillez y por el hecho de que, si los modelos obtenidos no representaran adecuadamente la relación de interés, aún podrían emplearse como base para la búsqueda de soluciones más apropiadas.

El análisis de los datos se ha efectuado con el auxilio de la herramienta *Regresión* incluida en el paquete de *Análisis de datos* de Excel. Se ha optado por esta herramienta debido a que es fácilmente accesible y a que, además de estimar los coeficientes del modelo, prácticamente se ocupa de todos los análisis complementarios cuya importancia fue subrayada en el inciso anterior. Así, la herramienta de regresión de Excel produce los resultados que se enumeran a continuación (Cheusheva, 2018):

- a) Estadísticas de la regresión, que comprenden los coeficientes de correlación, de determinación ( $R^2$ ) y de determinación ajustado (según el número de variables del modelo), así como la desviación estándar del error residual.
- b) Resultados de la prueba  $F$  de significación global (ANOVA), incluyendo los niveles de variabilidad atribuibles a la regresión y a los errores residuales, el estadístico  $F$  y el valor  $P$  de la prueba.
- c) Coeficientes del modelo y significación estadística de cada uno de ellos, determinada mediante la prueba  $t$ .
- d) Gráficos de los datos originales junto con la recta ajustada, de los residuos que corresponden a cada valor de la variable independiente y de distribución normal.

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de los resultados generados por la herramienta para cada cuerpo de carretera.

**Tabla 3.1 Resultados del análisis de regresión  $D_0$  -  $IRI$ .**

Tramo	$a$	$b$	$R^2$	Error típico <sup>1</sup>	$n$	Valor $P$	
						Prueba $t$	Prueba $F$
1 - A	0.2759	1.7648	0.0012	0.9302	280	0.5582	0.5582
1 - B	0.5838	1.3788	0.0213	0.3876	280	0.0145	0.0145
2 - A	-0.3544	1.9703	0.0088	0.8012	1567	0.0002	0.0002
2 - B	0.9183	1.9008	0.0318	1.1313	1563	0.0000	0.0000
3 - A	0.0305	2.1049	0.0000	1.1379	1046	0.8386	0.8386
3 - B	2.6865	1.2116	0.3295	1.2504	1045	0.0000	0.0000

<sup>1</sup> Se refiere a la desviación estándar del error residual.

Adicionalmente, las Figuras 3.3 a 3.6 contienen los gráficos de variación  $D_0$  - IRI y  $D_0$  - *Error residual* que corresponden a los tramos en los que se obtuvieron los mejores y los peores resultados de la regresión. De acuerdo con la Tabla 3.1, tales tramos fueron los cuerpos “B” y “A” de la carretera 3.

El examen del conjunto de resultados permite afirmar lo siguiente:

- a) En general, los parámetros generados en los diferentes análisis muestran que no puede establecerse una relación de dependencia directa entre la deflexión central y el IRI para los tramos del estudio, al menos no en términos de un modelo de regresión lineal simple.
- b) Atendiendo al coeficiente de determinación  $R^2$ , los modelos explican menos del 5 % del error para cinco de los seis tramos, y en el caso extremo del tramo 3 - A, esta proporción es de prácticamente cero ( $4 \times 10^{-5}$ ). Incluso el mayor valor de  $R^2$ , que corresponde al tramo 3 - B, resultó relativamente bajo (0.3295).
- c) La desviación estándar del error residual es considerable en términos absolutos, ya que, para casi todos los tramos, se aproxima a 1 m/km, valor comparable con una medición de IRI en un segmento en buen estado. Sin embargo, lo anterior podría estar vinculado a la magnitud de  $\sigma$  de los datos originales (entre 0.77 y 2.03 m/km, ver Figura 2.1) y a los rangos observados para la regularidad (de 5.54 a 12.54 m/km), así como al hecho de que los tramos del estudio no necesariamente constituyen segmentos homogéneos.
- d) De acuerdo con la Tabla 3.1, se obtuvieron modelos estadísticamente significativos en la mitad de los análisis (con un nivel de confianza del 95 %). Se trata de los efectuados para los tramos 2 - A, 2 - B y 3 - B. Según lo indicado en la Tabla 2.2, estos tramos tienen en común un nivel *alto* de  $D_0$  que, en términos objetivos, queda expresado por percentiles 80 de 0.685, 0.641 y 0.789 mm, respectivamente.

Cabe esperar que, conforme  $D_0$  crezca, se incremente también la probabilidad de que un defecto estructural se refleje en la capacidad funcional, sin embargo, este proceso debería manifestarse, normalmente, a través de deterioros superficiales, lo que, según la misma Tabla 2.2, solo es evidente para el tramo 2 - B y, en menor medida, para el 3 - B. Con todo, en este último caso se generó el mejor ajuste en términos del coeficiente de determinación (0.3295), aunque también se obtuvo el mayor error típico. Como puede apreciarse en la Figura 3.3, los datos muestran una tendencia ascendente que es capturada por la línea de regresión, si bien la distancias entre esta y muchos de los puntos originales es muy significativa.



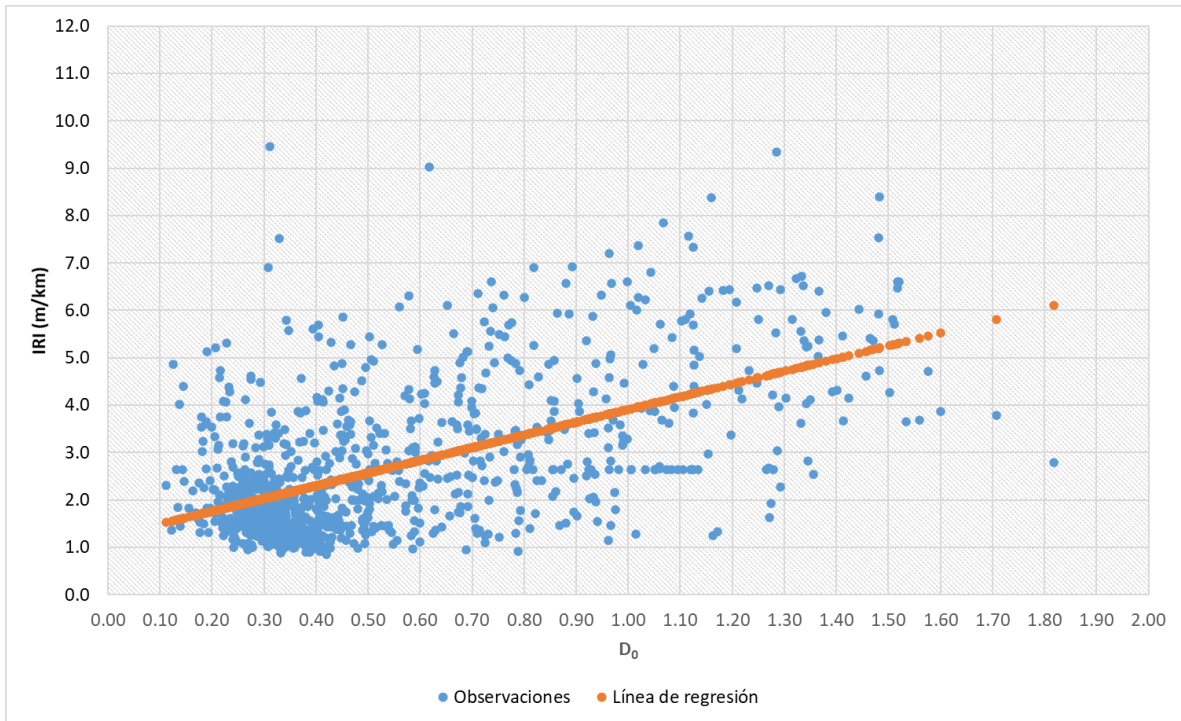


Figura 3.3. Gráfico  $D_0$  - IRI del mejor ajuste (cuerpo "B" de la carretera 3).

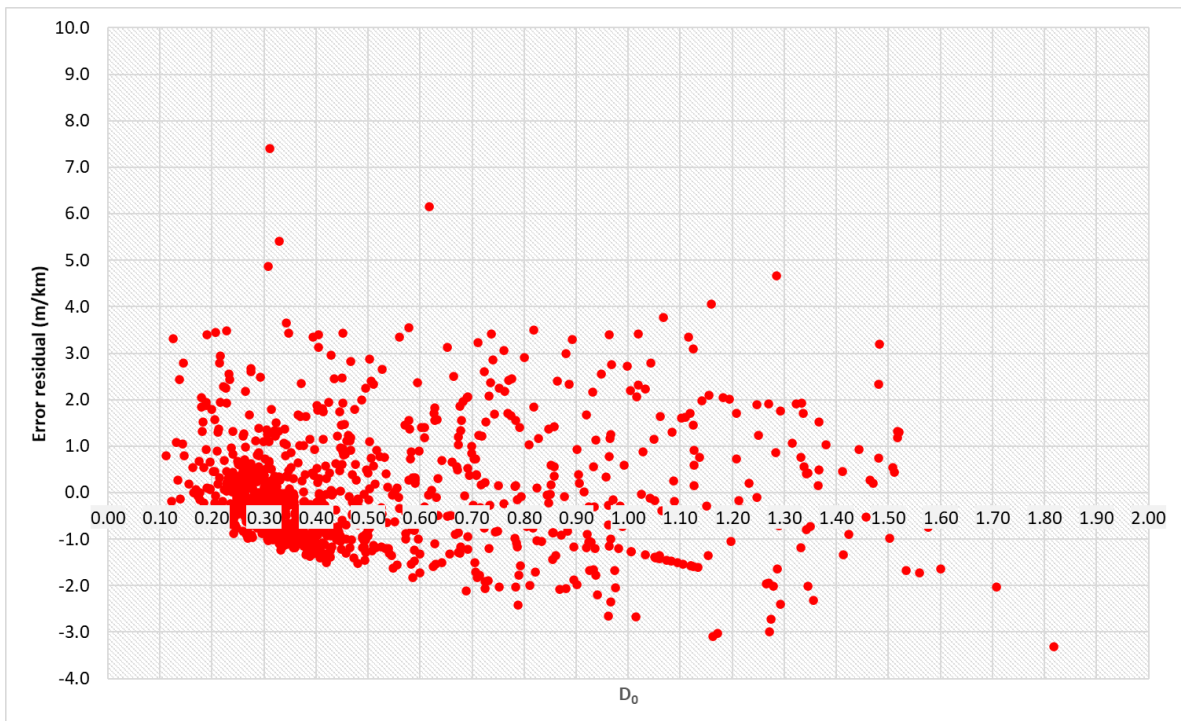


Figura 3.4. Gráfico de residuos del mejor ajuste (cuerpo "B" de la carretera 3).

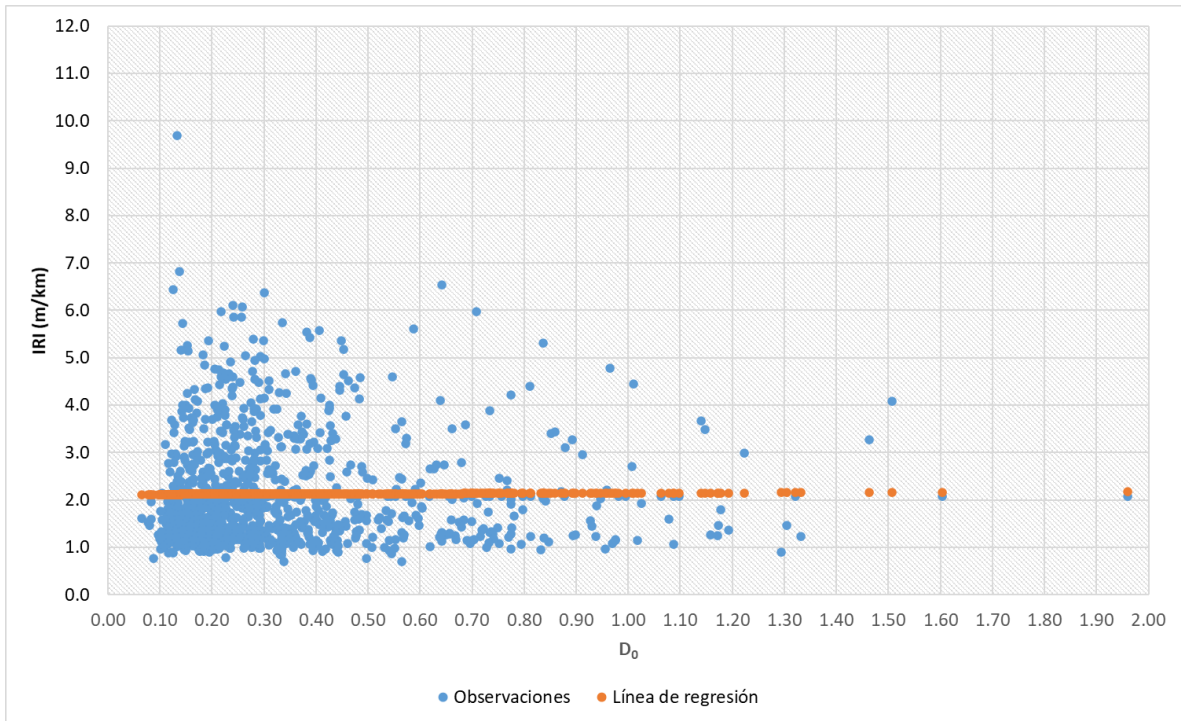


Figura 3.5. Gráfico  $D_0$  - IRI del peor ajuste (cuerpo "A" de la carretera 3).

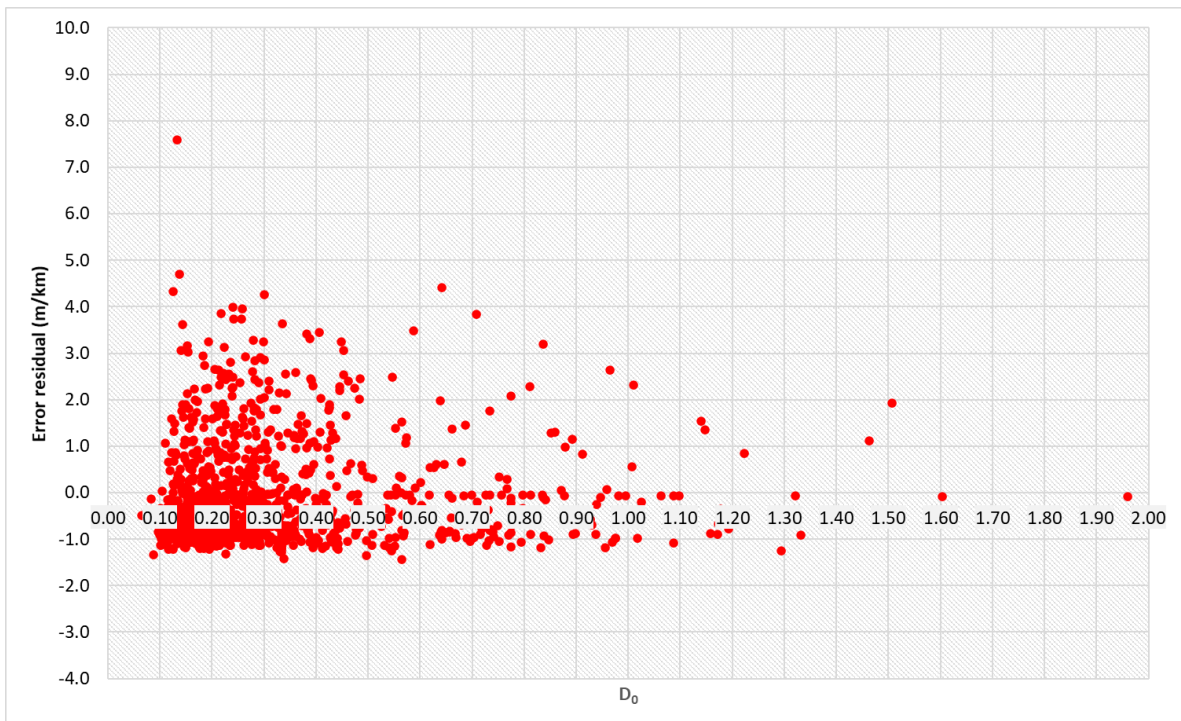


Figura 3.6. Gráfico de residuos del peor ajuste (cuerpo "A" de la carretera 3).

En lo concerniente al tramo 2 - A, el modelo generado debe considerarse anómalo, ya que la pendiente calculada para  $D_0$  es negativa, lo que es contrario al comportamiento esperado.

- e) En la Tabla 3.1, los resultados del valor  $P$  para las pruebas  $t$  y  $F$  son idénticos porque los modelos solo incluyen una variable independiente.
- f) En línea con lo mencionado en el inciso  $d$ , sería recomendable que los deterioros superficiales se tomaran en cuenta en el proceso de formulación de los modelos, como se hizo para el modelo de evolución del  $IRI$  del sistema HDM-4.
- g) Los gráficos del error residual muestran, en términos generales, un comportamiento aleatorio de este error, lo que es más claro para los modelos estadísticamente no significativos, como el ilustrado en las Figuras 3.3 y 3.4. Nótese que, cuando la variable independiente no es significativa, se obtiene una línea de regresión sensiblemente paralela al eje de las abscisas.

En general, por lo reducido de los valores de  $R^2$ , los gráficos del error residual tienen una apariencia muy similar a la de las observaciones originales, con respecto a las cuales se desplazan verticalmente según la magnitud de la ordenada al origen. Sin embargo, cabe hacer notar que a medida que la pendiente de la línea de regresión se aleja de cero, el conjunto de puntos que representan los errores residuales tiende a inclinarse en la dirección contraria, como se aprecia en la Figura 3.4 para el ajuste del tramo 3 - B. Este hecho, podría ser un síntoma de la necesidad de añadir variables explicativas al modelo, entre las cuales muy probablemente se encontrarían los deterioros de la superficie de rodadura.



## 4. Elementos para la aplicación del HDM-4

### 4.1 Uso de la capacidad estructural como criterio de intervención

Dentro del sistema de Desarrollo y Gestión de Carreteras (HDM-4), los trabajos de conservación se *activan* con base en una serie de criterios lógicos definidos por el analista. Por su parte, estos criterios se basan en indicadores diversos del estado del pavimento, en variables relacionadas con el tránsito o en parámetros que implican la realización de las obras en años determinados. En la Tabla 4.1 se concentra el conjunto de variables que pueden emplearse en la definición de criterios de intervención para la conservación de pavimentos asfálticos.

**Tabla 4.1 Parámetros del HDM-4 para la intervención en pavimentos asfálticos.**

Tipo	Nombre	Unidades
Indicadores del estado del pavimento	Agrietamiento estructural ancho <sup>a</sup>	%
	Agrietamiento estructural total	%
	Agrietamiento indexado <sup>b</sup>	%
	Agrietamiento térmico	%
	Agrietamiento total	%
	Área dañada total <sup>c</sup>	%
	Área severamente dañada <sup>d</sup>	%
	Baches	no./km
	Desprendimiento de agregados	%
	Desviación estándar de la profundidad de roderas	mm
	Irregularidad	m/km
	Profundidad de la macrotextura	mm
	Profundidad media de roderas	mm
	Resistencia al deslizamiento	SCRIM a 50 km/h
Rotura de borde	m <sup>2</sup> /km	
Datos del tránsito	Ejes equivalentes acumulados	10 <sup>6</sup> ESAL/carril
	Pasadas	no.
	TDPA en ambos sentidos	vehículos/día
Parámetros temporales	Año de ejecución	-
	Intervalo entre acciones	Años

<sup>a</sup> Se refiere a grietas con un ancho mayor o igual a 3 mm.

<sup>b</sup>  $ACX = 0.62ACA + 0.39ACW$ , donde  $ACX$  es el agrietamiento indexado, y  $ACA$  y  $ACW$  los agrietamientos estructural total y estructural ancho, respectivamente.

<sup>c</sup> Incluye rotura de borde, baches, agrietamiento total y desprendimientos.

<sup>d</sup> Incluye baches, agrietamiento estructural ancho y desprendimientos.

Como puede observarse en esta tabla, entre los indicadores del pavimento no figura ninguno referido a la capacidad estructural. Si bien esta característica puede estar relacionada con el daño superficial o con el volumen y composición del tránsito, es

claro que sin un criterio que la tome en cuenta explícitamente el sistema no puede reaccionar de manera directa con la activación de trabajos apropiados para remediar deficiencias de capacidad de carga.

En el inciso 2.2, se mencionó que la deflexión central medida con un deflectómetro de impacto ( $D_0$ ) constituye uno de los parámetros con los que el sistema HDM-4 representa la resistencia de pavimentos asfálticos. Sin embargo, la variable principal del HDM-4 para ese propósito es el llamado *número estructural ajustado* (Odoki & Kerali, 2006). Esta variable, que se denota por  $SNP_s$ , tiene su antecedente más remoto en el número estructural de AASHTO (AASHTO, 1993). El subíndice  $s$  en el nombre de la variable indica si la capacidad estructural fue evaluada durante las estaciones seca o húmeda.

La documentación del HDM-4 establece la relación primaria entre  $SNP_s$  y las deflexiones del pavimento en términos de la deflexión bajo carga medida con viga Benkelman. Tal relación está dada por (Odoki & Kerali, 2006):

$$DEF_s = 6.5(SNPK_s^{-1.6}) \text{ para bases no cementadas y:}$$

$$DEF_s = 3.5(SNPK_s^{-1.6}) \text{ para bases cementadas.}$$

Con:

$$SNPK_s = SNP_s - dSNPK \text{ y:}$$

$$dSNPK = 0000758\{\min(63, ACX_a)HSNEW + \max[\min(ACX_a - PACX, 40), 0]HSOLD\}$$

En las ecuaciones anteriores:

- $DEF_s$ : Deflexión medida con viga Benkelman durante la estación  $s$ .
- $SNPK_s$ : Número estructural ajustado durante la estación  $s$ , reducido por efecto del agrietamiento.
- $dSNPK$ : Reducción del número estructural ajustado debida al agrietamiento.
- $ACX_a$ : Agrietamiento indexado al inicio del periodo de análisis como porcentaje del área de la calzada.
- $HSNEW$ : Espesor más reciente de la capa superficial estructural, en mm.
- $PACX$ : Agrietamiento indexado de las capas superficiales estructurales previas como porcentaje del área de la calzada.
- $HSOLD$ : Espesor total de las capas superficiales estructurales previas.

La deflexión  $D_0$  se considera equivalente a la deflexión de la viga Benkelman siempre que, además de haber sido medida bajo el punto de aplicación de la carga del deflectómetro, se encuentre normalizada para una presión de 700 kPa.

El procedimiento utilizado en este trabajo para incluir  $D_0$  en un criterio de intervención, se basa en los siguientes hechos:

- Los resultados de los análisis con el HDM-4 se almacenan en una base de datos con formato de Microsoft Access. Dentro de esta base de datos, destaca la tabla `AnnualData`, en la que pueden encontrarse los registros de evolución por alternativa y por año del periodo de análisis de cualquiera de las variables del sistema, incluyendo  $SNPK_S$ .

Esta información puede importarse en Excel para llevar a cabo los procesos adicionales que se desee, como expresar la evolución de la capacidad de carga en términos de  $D_0$ .

- Prácticamente cualquier *objeto de datos* del HDM-4, entre los que pueden mencionarse flotas vehiculares, redes de carreteras, estándares de conservación, patrones de flujo vehicular, zonas climáticas, series de calibración y, también, las propias definiciones de los análisis, son susceptibles de exportarse e importarse mediante archivos de intercambio con formato de Access. Así, los componentes de los diferentes objetos pueden modificarse en Excel o en alguna otra aplicación externa al HDM-4.
- La definición de los tres tipos de análisis incluidos en el HDM-4 (de *proyecto*, de *programa* o de *estrategia*) pasa por una especificación de las alternativas y los estándares de trabajo aplicables en cada tramo durante el periodo de análisis. De acuerdo con lo mencionado en el párrafo anterior, se pueden hacer cambios a esta definición por fuera del HDM-4, a fin de tomar en cuenta la evolución del número estructural pronosticada en un análisis previo y almacenada en la correspondiente base de datos de resultados.

Tomando en cuenta estos hechos, en los cursos sobre *Aplicación del HDM-4 en la obtención de programas de obra para contratos basados en el desempeño* impartidos en el IMT, se ha aplicado un procedimiento para tomar en cuenta la capacidad estructural que puede resumirse en los pasos que se indican a continuación.

- a) Definir un estándar de conservación periódica que contemple la rehabilitación de la carpeta asfáltica siempre que el *IRI* sobrepase un valor límite.
- b) Definir una alternativa de proyecto basada en el estándar del punto anterior y una alternativa base ligada a un estándar con mantenimiento rutinario únicamente, y efectuar un primer análisis. En el curso y en el presente estudio se ha optado por un análisis de estrategia, pero el método es aplicable con cualquier tipo de análisis.
- c) Extraer de la base de datos de resultados del HDM-4 los pronósticos de  $SNPK_S$  para el periodo de análisis y convertirlos a sus equivalentes de  $D_0$ . A

partir de esta información, identificar el primer año en el que  $D_0$  excede un valor límite, por ejemplo, el de 0.5 mm designado en la normativa SCT como umbral de “una buena condición estructural” (SCT, 2017), si es que esto efectivamente ocurre.

Como ejemplo, en la Tabla 4.2 se presenta el resultado de este ejercicio para el cuerpo “A” de la carretera 1, con el estándar de conservación periódica que se describen en el inciso 4.2 y el valor límite de 0.5 mm.

**Tabla 4.2 Evolución de  $D_0$  en el tramo 1 - A.**

Seg.	$D_0$										Año $D_0 \geq 0.5$
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	
1A001	0.635	0.543	0.543	0.545	0.546	0.548	0.554	0.556	0.560	0.527	2020
1A002	0.249	0.252	0.254	0.257	0.241	0.241	0.241	0.241	0.241	0.241	-
1A003	0.343	0.348	0.351	0.354	0.352	0.356	0.353	0.358	0.330	0.330	-
1A004	0.288	0.290	0.292	0.296	0.298	0.301	0.299	0.302	0.300	0.282	-
1A005	0.372	0.375	0.380	0.382	0.385	0.389	0.386	0.361	0.361	0.361	-
1A006	0.253	0.254	0.258	0.259	0.260	0.263	0.261	0.264	0.262	0.247	-
1A007	0.385	0.391	0.395	0.399	0.396	0.400	0.370	0.370	0.370	0.370	-
1A008	0.271	0.273	0.277	0.278	0.281	0.284	0.281	0.285	0.265	0.265	-

- d) Exportar el análisis con la alternativa de proyecto del inciso *b*, recuperar la información del archivo de Access exportado y modificarla en Excel de manera que, para los segmentos con  $D_0 \geq 0.5$  mm, se fije la ejecución de trabajos de reconstrucción en el año en el que la condición se cumpla por primera vez.
- e) Crear estándares de conservación adicionales, basados en el de conservación periódica, que contemplen los trabajos de reconstrucción mencionados en el inciso anterior.
- f) Reimportar el análisis y hacer una nueva corrida.

De esta manera, el procedimiento aplicado en el curso no solo evalúa la capacidad estructural de cada segmento durante el periodo de análisis, sino que también asigna los trabajos de conservación necesarios para atender las deficiencias que pudieran detectarse.

## 4.2 Estándares de conservación

Los trabajos de conservación del HDM-4 se definen a través de componentes que se conocen como *estándares de conservación* y que, esencialmente, son conjuntos de acciones o trabajos de conservación específicos seleccionados y diseñados para atender un segmento carretero de una manera determinada.

Para los propósitos del presente estudio, se han definido tres estándares de conservación:

- a) Un estándar de *mantenimiento rutinario*, destinado a corregir defectos superficiales para disminuir la tasa de deterioro del pavimento. Conforman el estándar las siguientes acciones: bacheo, reparación de áreas afectadas por el desprendimiento de agregado pétreo y reparación de grietas anchas.
- b) El estándar de *conservación periódica* al que se ha hecho referencia previamente, que tiene por objeto restituir las características deseadas de regularidad, normalmente expresadas a través de un valor máximo admisible de *IRI*. Para el presente estudio se ha elegido  $IRI_{máx} = 2.5$  m/km, umbral que coincide con el límite establecido en la normativa SCT para calificar la regularidad de un tramo de autopista o corredor carretero como “aceptable”. A fin de cumplir con este objetivo, se proponen trabajos de fresado de 5 cm de la capa superficial y colocación de una nueva carpeta asfáltica con este mismo espesor.
- c) Un tercer estándar genérico de *reconstrucción + conservación periódica* que contempla, por un lado, la reconstrucción del pavimento en el primer año en el que se detecte que  $D_0$  excede el valor límite de 0.5 mm especificado en la normativa SCT para tramos con una buena capacidad de carga. La reconstrucción incluye la colocación de una capa asfáltica de 10 cm. Asimismo, forman parte de este estándar los trabajos de fresado y reemplazo del estándar anterior.

Nótese que, en los dos últimos estándares, también se han incorporado las acciones de mantenimiento de rutina. La Tabla 4.3 contiene los detalles de los trabajos propuestos.

En lo que se refiere a los efectos que se presentan en la misma tabla, el HDM-4 puede estimar el *IRI*, la profundidad de la macrotextura y el coeficiente de fricción posteriores a la ejecución de acciones de conservación periódica y reconstrucción. Sin embargo, a fin de normalizar las comparaciones que se presentan en el capítulo 5, se ha optado por especificar estos efectos directamente, como de hecho debe hacerse para los trabajos de mantenimiento rutinario.

Por otro lado, con relación al efecto de la reconstrucción sobre  $D_0$ , debe aclararse que el valor que se indica se obtuvo al convertir el número estructural especificado como parte de los datos de diseño de esta obra a su equivalente en deflexión bajo carga.

Finalmente, cabe señalar que los costos unitarios de la Tabla 4.3 corresponden a órdenes de magnitud y no a precios de mercado debidamente actualizados.

**Tabla 4.3 Estándares de conservación definidos para los análisis.**

Trabajos	Criterio de intervención	Efectos	Costo unitario
<i>Mantenimiento rutinario</i>			
Bacheo	$n \geq 1$ baches / km	100 % reparado	\$286.00/m <sup>2</sup>
Reparación de desprendimientos	$ARV \geq 5$ %	100 % reparado	\$73.97/m <sup>2</sup>
Reparación de grietas anchas	$ACW \geq 5$ %	100 % reparado	\$117.85/ m <sup>2</sup>
<i>Conservación periódica</i>			
Fresado y reemplazo de 5 cm	$IRI \geq 2.5$ m / km	$IRI = 1.5$ m/km $MTX = 1$ mm $CF = 0.55$	\$196.08/m <sup>2</sup>
Acciones de mantenimiento rutinario			
<i>Reconstrucción + conservación periódica</i>			
Reconstrucción	$D_0 \geq 0.500$ mm	$D_0 = 0.257$ mm $IRI = 1.5$ m/km $IRI = 1.5$ m/km $MTX = 1$ mm $CF = 0.55$	\$465.52 /m <sup>2</sup>
Acciones de conservación periódica			
Acciones de mantenimiento rutinario			

$n$ : Número de baches por kilómetro.

$ARV$ : Área con desprendimiento de agregado pétreo, en porcentaje.

$ACW$ : Área con agrietamiento estructural ancho (ancho mayor o igual a 3 mm), en porcentaje.

$MTX$ : Profundidad de la macrotextura, en mm.

$CF$ : Coeficiente de fricción medido con equipo *SCRIM* a 50 km/h.

## 4.3 Flota vehicular

Un elemento esencial de la metodología del HDM-4 son los costos de operación vehicular en los que, inevitablemente, incurren los usuarios de las carreteras cuando circulan por ellas. De hecho, los ahorros en costos de operación derivados de los trabajos de conservación y mejora constituyen uno de los principales beneficios económicos de las inversiones en infraestructura vial. La comparación de estos y otros beneficios con los costos de los trabajos permite determinar la rentabilidad de un listado de proyectos candidatos y utilizarla como criterio para jerarquizarlos e integrar los programas de obra definitivos.

A fin de estimar la rentabilidad de las alternativas de proyecto consideradas en el trabajo, se integró una flota vehicular con los vehículos y los datos de la publicación del IMT relativa a la estimación de *costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano*, actualizada al año 2018 (Arroyo, et al., 2018).

Las estimaciones de esta y otras versiones de la misma publicación, se hacen con referencia en el conjunto de vehículos que se presenta en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Vehículos de la flota utilizada en el estudio (Arroyo, et al., 2018).

Tipo de vehículo	Vehículo representativo
A	Nissan Urvan
B3	Scania K 380
C2	International 4300
C3	International 4400
T3-S2	International 9200i / semirremolque de 2 ejes
T3-S3	International 9200i / semirremolque de 3 ejes
T3-S2-R4	International 9200i / semirremolque de 2 ejes y remolque de 4 ejes

## 4.4 Datos de configuración

La información necesaria para la realización de un análisis con el HDM-4 comprende un subconjunto de datos suplementarios diversos, agrupados en la sección *configuración* de la interfaz de usuario del sistema. En este subconjunto se agrupa información como los patrones de flujo horario del tránsito, la capacidad de la carretera para distintas secciones transversales, las tasas de accidentalidad, parámetros climáticos y coeficientes de calibración.

Los patrones de flujo, los datos de capacidad y las tasas de accidentalidad son especialmente relevantes en la evaluación de proyectos de mejora. En cambio, los parámetros climáticos lo son mayormente para los proyectos de conservación, ya que tienen una incidencia directa sobre las tasas de deterioro de los pavimentos. Entre los parámetros climáticos, destacan por su importancia la precipitación media mensual y la temperatura media anual. El HDM-4 agrupa los datos climáticos en objetos denominados *zonas climáticas*.

Por lo que toca a los coeficientes de calibración, su propósito es adaptar los diversos modelos de deterioro del HDM-4 a las condiciones locales. El sistema los agrupa en *juegos de calibración*, que son subconjuntos vinculados a un tipo de pavimento específico, y en *series de calibración*, grupos de juegos aplicables a una red o a tipos de análisis determinados.

Es importante señalar que, aun cuando no se haya calibrado el HDM-4 y, por lo tanto, no se cuente con coeficientes de calibración, será necesario definir juegos y series de calibración para caracterizar los tipos de pavimento y aplicar los coeficientes por defecto que correspondan.

En la Tabla 4.4 se resumen los datos de calibración seleccionados para su uso en el presente estudio.

**Tabla 4.5 Datos de calibración.**

<b>Subcategoría</b>	<b>Valores</b>
Modelos de tránsito	Por defecto (modelo de <i>flujo libre</i> )
Tipos de velocidad/capacidad	Por defecto (tipo <i>dos carriles</i> , análisis por cuerpo)
Tipos de accidentes	Accidentes no considerados (tasas de accidentalidad iguales a cero)
Zonas climáticas*	<p>Proporcionadas junto con los datos del estado de los tramos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (A)Ca(w0)(w): <math>PMM = 61.1</math>, <math>TMA = 20.6</math></li> <li>• BS1hw(w): <math>PMM = 91.6</math>, <math>TMA = 18.6</math></li> <li>• BWhw: <math>PMM = 15.6</math>, <math>TMA = 14.9</math></li> <li>• Cb(w1)(w): <math>PMM = 60.3</math>, <math>TMA = 13.3</math></li> </ul> <p><math>PMM</math> es la precipitación mediad mensual (mm) y <math>TMA</math> la temperatura media anual (°C)</p>
Unidades monetaria	Peso mexicano
Datos agregados de tramo	Por defecto
Tablas agregadas de tramo	Por defecto
Parámetros de calibración	Por defecto
Series y juegos de calibración	<p>Se definió la serie de calibración <i>SC Red Federal</i> y, al interior de ella, los siguientes juegos por tipo de pavimento:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>AMGB</i> (mezcla asfáltica sobre base granular)</li> <li>• <i>AMSB</i> (mezcla asfáltica sobre base estabilizada)</li> <li>• <i>AMAP</i> (mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico)</li> </ul>

\* La definición de las zonas climáticas proporcionadas se basa en el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por Enriqueta García para las condiciones de México (García, 2004).



## 5. Obtención y comparación de programas de obra

---

### 5.1 Consideraciones generales

Se presentan en este capítulo los resultados de la aplicación del HDM-4 para estimar las necesidades de conservación de los tramos en estudio, bajo los dos escenarios planteados al inicio: tomar o no en cuenta la capacidad estructural del pavimento en la definición de los criterios de intervención.

Como se ha mencionado en otras partes del documento, el HDM-4 no provee mecanismos para que la capacidad de carga funcione como activador de acciones específicas, lo que lleva a la aplicación con este fin del procedimiento que se describe en el inciso 4.1.

Para la realización de los diferentes análisis, los seis tramos del estudio fueron divididos en *segmentos homogéneos*, de acuerdo con la variación longitudinal de la deflexión central  $D_0$  en cada tramo. La división se llevó a cabo mediante un algoritmo de segmentación desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte, como parte de un proyecto externo (Gorrostieta, et al., 2008).

Como ejemplo del proceso de segmentación, en la Figura 5.1 se presenta el larguillo de  $D_0$  del tramo 2 - A junto con los segmentos homogéneos obtenidos para este tramo. El larguillo muestra un comportamiento claramente diferenciado del subtramo comprendido aproximadamente entre los kilómetros 146 y 182, lo que podría explicar el comportamiento bimodal del histograma de  $D_0$  para este tramo que se incluye en la Figura 2.4.

En lo referente a la deflexión central, cada segmento homogéneo fue caracterizado mediante el promedio de las mediciones efectuadas en su interior. Dado que el resto de los datos de entrada necesarios para los análisis están igualmente definidos en longitudes diferentes a las de los segmentos homogéneos, para la asignación de los correspondientes valores representativos se formularon y aplicaron diferentes reglas de transformación, como se indica en la Tabla 5.1 (Bennett, 2004).

Por lo que concierne a los análisis propiamente dichos, se decidió utilizar la aplicación de *análisis de estrategias* del HDM-4 debido a que es la única con la que se pueden integrar, jerarquizar y optimizar los programas de obra con base en su contribución a la mejora del estado del pavimento, medida en términos del *IRI*. A este respecto, es menester recordar que, cuando se aplica el criterio alternativo basado en los aspectos económicos, las acciones con beneficios negativos son excluidas de los programas de obra, lo que dificulta la realización de estudios que,

como el presente trabajo, se orientan primordialmente hacia la vertiente técnica del análisis.

Adicionalmente, debe tenerse presente que, aunque el análisis de estrategias del HDM-4 fue originalmente concebido para ejercicios de planeación estratégica, en realidad las tres aplicaciones disponibles en el sistema (análisis de estrategias, de programas y de proyectos) realizan los análisis de costos del ciclo de vida de manera muy similar, y emplean los mismos modelos de deterioro (Solorio, 2019). Así, lo que realmente produce diferencias en los resultados de las aplicaciones es el nivel de detalle de los datos de entrada y, en general, el enfoque particular con el que se aborde cada problema.

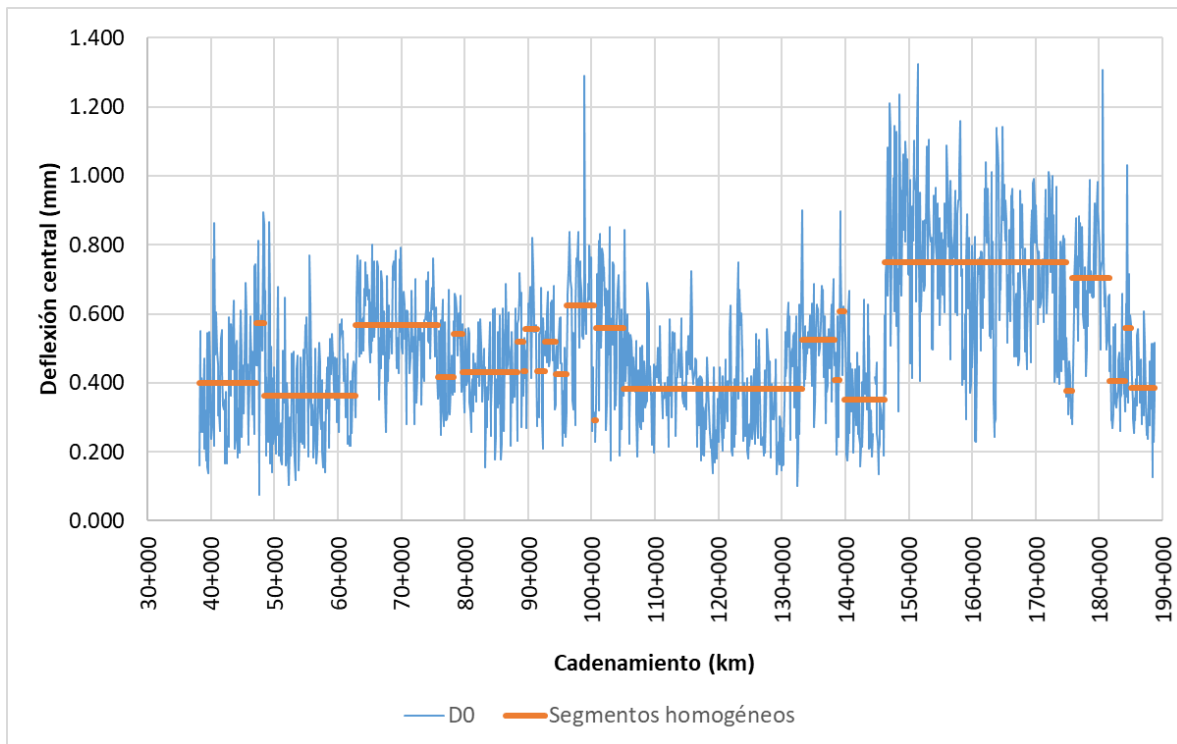


Figura 5.1. Larguillo de deflexiones y segmentos homogéneos del tramo 2 - A.

Tabla 5.1 Procesos de transformación de datos.

Parámetro	Regla de transformación
Indicadores del estado ( <i>IRI</i> , roderas, agrietamiento, macrotextura, etc.)	Promedio de mediciones en el segmento homogéneo
Espesores de las capas	
Alineamientos, altitud	
Climas	Ajuste a partir de la información recibida
Años de ejecución de trabajos previos	
Tipos de pavimento	
Volumen y composición del tránsito	Valores del segmento de aforo si no hay cortes de este dentro del segmento homogéneo o promedio ponderado en caso contrario

Los diferentes análisis efectuados compartieron los siguientes datos:

- Tipo de análisis: análisis de estrategias.
- Método de selección/jerarquización/optimización: maximizar  $\Delta IRI$ .
- Año de inicio: 2020.
- Periodo de análisis: 10 años.
- Tasa de actualización: 10 %.
- Tasa de crecimiento del tránsito: 3.5 %.

Las tasas de crecimiento del tránsito, que pueden ser una o varias (por periodo o por tipo de vehículo) se definen junto con las flotas vehiculares, sin embargo, en realidad, se asignan en el momento de configurar el análisis. El valor global de 3.5 % se eligió debido a que no se contaba con información al respecto y a que el estudio tenía fines comparativos y no prospectivos.

Para cada ejercicio de comparación, se llevaron a cabo dos corridas de análisis de estrategias en las que se evaluaron alternativas de proyecto definidas como se indica a continuación:

- *Corrida 1.* Alternativa de proyecto vinculada al estándar de conservación periódica basado en la realización de trabajos de fresado y reemplazo cuando el *IRI* exceda el umbral de 2.5 m/km (alternativa *CP*).
- *Corrida 2.* Alternativa de proyecto vinculada a estándares de reconstrucción + conservación periódica en los que se prevé la reconstrucción del pavimento en el primer año en el que  $D_0$  exceda el límite de 0.5 mm y la realización subsecuente de trabajos de fresado y reemplazo siempre que  $IRI \geq 2.5$  m/km (alternativa *REC+CP*).

En ambas corridas, las alternativas de proyecto se evalúan en relación con una alternativa base que contempla únicamente trabajos de mantenimiento rutinario.

En la Figura 5.2 se presenta una vista del espacio de trabajo del HDM-4 en la que pueden apreciarse las redes de carreteras que corresponden a cada uno de los tramos analizados, los estándares de conservación que sirvieron de base para la definición de las alternativas y los diferentes análisis de estrategias preparados. Se realizaron un total de once análisis de estrategias, uno menos que los doce originalmente previstos, pues en el caso del tramo 1 - B no se identificó ningún segmento homogéneo que necesitara trabajos de reconstrucción.

Por último, es necesario enfatizar que este trabajo aborda el tema de la capacidad estructural y la conservación de pavimentos asfálticos *a nivel de red*, ya que, como quedó establecido en la parte inicial del documento, solo en este nivel es posible evaluar intervenciones que no necesariamente resulten óptimas desde el punto de vista técnico.

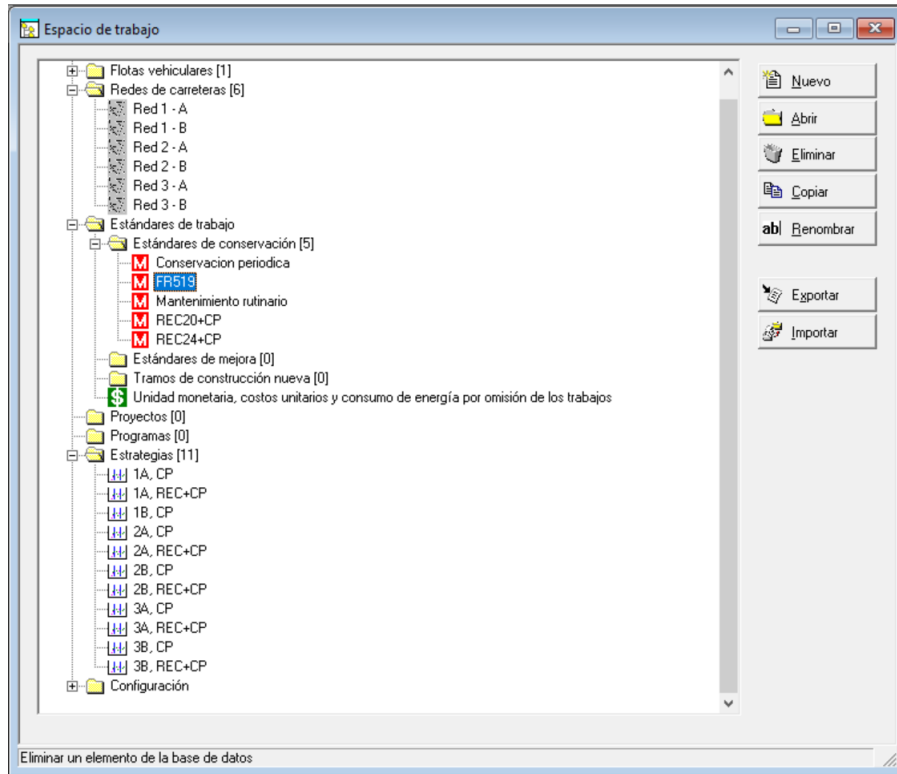


Figura 5.2. Espacio de trabajo del HDM-4 para la realización de los análisis.

Tabla 5.2 Segmentos homogéneos del tramo 1 - A.

Segmento	Longitud (km)	IRI (m/km)	D <sub>0</sub> (mm)	Agrietamiento (%)	TDPA (veh/día)	Veh. pesados (%)
1A001	0.700	4.01	0.517	23.1	22,886	14.9
1A002	8.800	2.13	0.226	3.4	22,886	14.9
1A003	1.900	1.41	0.310	3.5	22,886	14.9
1A004	1.400	1.46	0.264	0.5	22,886	14.9
1A005	8.900	1.66	0.339	1.1	21,621	14.8
1A006	1.203	1.49	0.231	1.1	20,141	14.7
1A007	0.498	1.81	0.347	3.5	20,141	14.7
1A008	3.899	1.69	0.248	1.2	20,141	14.7

Tabla 5.3 Programa de obra del tramo 1 - A (CP).

Segmento	Obras por año										No. obras	
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	FR5	REC
1A001	FR5								FR5		2	0
1A002				FR5							1	0
1A003								FR5			1	0
1A004									FR5		1	0
1A005							FR5				1	0
1A006									FR5		1	0
1A007						FR5					1	0
1A008								FR5			1	0
<b>Totales</b>											<b>9</b>	<b>0</b>

En los siguientes incisos se presentan los resultados obtenidos para los diferentes tramos considerados en el estudio.

## 5.2 Tramo 1 - A

De acuerdo con la Tabla 5.2, el proceso de segmentación basado en  $D_0$  produjo un total de ocho segmentos homogéneos para el tramo 1 - A. De estos, solo en el caso del primero (segmento 1A001) se advierte que se exceden los límites máximos establecidos para  $IRI$  y  $D_0$ , con registros de 4.01 m/km y 0.517 mm, respectivamente, que van acompañados de un porcentaje alto de área agrietada (23.1 %). Nótese, sin embargo, que se trata de un segmento corto de solo 700 m. Como se indicó en el inciso 2.3, este y el resto de los segmentos homogéneos del tramo tienen un volumen de tránsito que puede considerarse muy alto.

El  $IRI$  del segundo segmento (segmento 1A002) se encuentra relativamente próximo al límite establecido, no así el valor de la deflexión central. Los valores representativos de regularidad y deflexión del resto de los segmentos tienen un margen de crecimiento mayor con respecto a los umbrales correspondientes.

En consonancia con lo anterior, el programa obtenido para la alternativa de proyecto CP (Tabla 5.3) contempla una acción de fresado y reemplazo de 5 cm ( $FR5$ ) en el segmento 1A001 durante el primer año del periodo de análisis, así como la repetición de estos trabajos en 2028. Para el resto de los segmentos, los trabajos de conservación periódica fueron programados una sola vez, en años posteriores al inicio del periodo que incluso llegan también hasta 2028.

La Tabla 5.4 contiene el programa de obra de la alternativa REC+CP para este tramo. La comparación de este programa y el anterior arroja como única diferencia la sustitución de las dos intervenciones tipo  $FR5$  previstas para el segmento 1A001 en el primer programa por una acción de reconstrucción ( $REC$ ) durante el primer año del periodo de análisis en el segundo programa. En términos de costos no actualizados, esto conlleva un incremento de 38.432 a 38.791 millones de pesos (o 9 %, ver Tabla 5.19) y una reducción también menor del valor presente neto ( $VPN$ ), de 19.148 a 18.456 millones de pesos.

**Tabla 5.4 Programa de obra del tramo 1 - A (REC+CP).**

Segmento	Obras por año										Total obras	
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	FR5	REC
1A001	REC										0	1
1A002				FR5							1	0
1A003								FR5			1	0
1A004									FR5		1	0
1A005							FR5				1	0
1A006									FR5		1	0
1A007						FR5					1	0
1A008								FR5			1	0
										<b>Totales</b>	<b>7</b>	<b>1</b>

De cualquier forma, ambas alternativas resultaron rentables, hecho que podría atribuirse a la reducción del *IRI* de los dos primeros segmentos y al alto volumen de tránsito que circula por el tramo.

### 5.3 Tramo 1 - B

Los valores de *IRI* y  $D_0$  de los cuatro segmentos generados con la división del tramo representada en la Tabla 5.5, implican un intervalo más o menos amplio para el cumplimiento de los límites definidos para ambos parámetros. Lo anterior es congruente con la clasificación la Tabla 2.2, en la que el tramo 1 - B aparece con los mejores indicadores de estado físico.

Así, según lo mostrado en la Tabla 5.6, el programa CP solo contiene obras para el primero y cuarto segmentos en el último año del periodo de análisis, con lo que las condiciones para la generación de beneficios se reducen drásticamente y las inversiones producen un VPN negativo (-8.592 millones de pesos, ver Tabla 5.19).

Adicionalmente, al aplicar el procedimiento descrito en el inciso 4.1, se pudo verificar que la condición  $D_0 > 0.5$  mm no se cumple en ninguno de los años del periodo de análisis, de manera que, en este caso, no se generó el programa de obra para la alternativa de proyecto REC+CP.

**Tabla 5.5 Segmentos homogéneos del tramo 1 - B.**

Segmento	Longitud (km)	IRI (m/km)	$D_0$ (mm)	Agrietamiento (%)	TDPA (veh/día)	Veh. pesados (%)
1B001	5.499	1.56	0.272	0.1	22413	15.5
1B002	6.396	1.44	0.194	0.0	22413	15.5
1B003	1.688	1.51	0.251	0.0	22413	15.5
1B004	13.717	1.49	0.184	0.4	20210	15.5

**Tabla 5.6 Programa de obra del tramo 1 - B (CP).**

Segmento	Obras por año										Total obras	
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	FR5	REC
1B001										FR5	1	0
1B002											0	0
1B003											0	0
1B004										FR5	1	0
<b>Totales</b>											<b>2</b>	<b>0</b>

### 5.4 Tramo 2 - A

La carretera 2 tiene una longitud casi seis veces mayor que la de la carretera 1 (150 contra 27 km), lo que, aunado a la falta de homogeneidad de su estado físico, ha contribuido a la generación de un número de segmentos homogéneos 3.5 veces más grande, como puede comprobarse en la Tabla 5.7.

De acuerdo con esta tabla, la mayoría de los segmentos homogéneos tienen un *IRI* menor a 2.5 m/km. Sin embargo, y en contraste, al revisar secuencialmente los valores de  $D_0$ , se observa que estos exceden de manera alternada el umbral de 0.5 mm.

Como quedó consignado en la Tabla 4.3, el estándar de conservación en el que se basa la alternativa de proyecto CP fue diseñado con el objeto de activar trabajos para la remediación del *IRI*. De esta manera, no es extraño que las obras previstas en el programa producido por esta alternativa (Tabla 5.8) estén distribuidas en todo el periodo de análisis y que, incluso, tiendan a concentrarse en los últimos cinco años.

No obstante, el comportamiento alternado de  $D_0$  al inicio del periodo con respecto al umbral, provocó la activación también alternada de trabajos de reconstrucción en el primer año con la alternativa REC+CP, como puede apreciarse en la Tabla 5.9. Con lo anterior, el total de las trece acciones de reconstrucción contenidas en el programa quedó concentrado en el primer año.

**Tabla 5.7 Segmentos homogéneos del tramo 2 - A.**

Segmento	Longitud (km)	IRI (m/km)	$D_0$ (mm)	Agrietamiento (%)	TDPA (veh/día)	Veh. pesados (%)
2A001	8.900	2.89	0.519	10.9	1799	55.9
2A002	1.300	1.70	0.435	0.3	1779	59.9
2A003	14.400	2.27	0.556	0.9	1779	59.9
2A004	13.000	2.10	0.434	0.9	1779	59.9
2A005	2.500	1.70	0.518	0.1	1779	59.9
2A006	1.300	1.41	0.425	0.2	1779	59.9
2A007	8.700	1.49	0.624	0.1	1779	59.9
2A008	0.900	1.50	0.292	0.3	1779	59.9
2A009	0.400	1.30	0.558	0.6	1779	59.9
2A010	1.800	1.46	0.381	0.2	1779	59.9
2A011	1.200	1.48	0.524	0.1	1779	59.9
2A012	1.800	1.88	0.408	2.9	1779	59.9
2A013	1.700	2.20	0.607	12.0	1779	59.9
2A014	4.300	2.69	0.352	14.8	1779	59.9
2A015	0.300	2.64	0.749	10.2	1779	59.9
2A016	4.300	2.63	0.377	10.6	1779	59.9
2A017	28.200	1.76	0.704	2.0	1777	60.0
2A018	5.100	1.60	0.406	0.0	1766	60.5
2A019	0.800	1.53	0.559	0.0	1766	60.5
2A020	0.700	1.35	0.386	0.1	1766	60.5
2A021	6.400	1.47	0.519	0.1	1766	60.5
2A022	28.700	1.41	0.435	0.1	1717	58.0
2A023	0.900	1.24	0.556	0.0	1682	56.2
2A024	5.900	1.30	0.434	0.0	1682	56.2
2A025	2.400	1.27	0.518	0.0	1682	56.2
2A026	0.900	1.19	0.425	0.0	1682	56.2
2A027	3.800	1.32	0.624	0.0	1682	56.2

Tabla 5.8 Programa de obra del tramo 2 - A (CP).

Segmento	Obras por año										No. obras	
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	FR5	REC
2A001	FR5										1	0
2A002							FR5				1	0
2A003				FR5							1	0
2A004				FR5							1	0
2A005								FR5			1	0
2A006									FR5		1	0
2A007										FR5	1	0
2A008									FR5		1	0
2A009											0	0
2A010									FR5		1	0
2A011										FR5	1	0
2A012						FR5					1	0
2A013			FR5								1	0
2A014	FR5										1	0
2A015	FR5										1	0
2A016	FR5										1	0
2A017							FR5				1	0
2A018								FR5			1	0
2A019									FR5		1	0
2A020									FR5		1	0
2A021										FR5	1	0
2A022								FR5			1	0
2A023											0	0
2A024									FR5		1	0
2A025											0	0
2A026											0	0
2A027											0	0
<b>Totales</b>											<b>22</b>	<b>0</b>

Este cambio drástico tuvo consecuencias significativas en los costos, que pasaron de 195.178 a 328.439 millones de pesos. En lo que respecta al rendimiento económico, en ambos casos se obtuvieron VPN negativos y, de hecho, en el caso de la alternativa REC+CP el VPN disminuyó hasta -177.022 millones de pesos desde los -41.921 millones calculados para la alternativa CP.

Los malos resultados en términos de rentabilidad parecen ser consecuencia de la falta de mejoras significativas en el *IRI* pero, sobre todo, de los bajos volúmenes de tránsito que circulan por el tramo.

## 5.5 Tramo 2 - B

En el inciso 2.3 se destacó el hecho de que el tramo 2 - B poseía los peores indicadores del estado del pavimento del pavimento de acuerdo con los datos originales. Para este tramo se obtuvo el conjunto más numeroso de segmentos homogéneos, con veintinueve en total (ver Tabla 5.10)



**Tabla 5.9 Programa de obra del tramo 2 - A (REC+CP).**

Segmento	Obras por año										No. obras	
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	FR5	REC
2A001	FR5										1	0
2A002	REC										0	1
2A003				FR5							1	0
2A004	REC										0	1
2A005								FR5			1	0
2A006	REC										0	1
2A007										FR5	1	0
2A008	REC										0	1
2A009											0	0
2A010	REC										0	1
2A011										FR5	1	0
2A012	REC										0	1
2A013			FR5								1	0
2A014	REC										0	1
2A015	FR5										1	0
2A016	REC										0	1
2A017							FR5				1	0
2A018	REC										0	1
2A019									FR5		1	0
2A020	REC										0	1
2A021										FR5	1	0
2A022	REC										0	1
2A023											0	0
2A024	REC										0	1
2A025											0	0
2A026	REC										0	1
2A027											0	0
<b>Totales</b>											<b>10</b>	<b>13</b>

Al igual que con el tramo 2 - A, se observa una incidencia importante de valores de la deflexión central que exceden el límite de intervención, que afecta a 12 de los 29 segmentos (50 % de la longitud total). Pero, además, se advierte un pobre desempeño en lo referente a la regularidad, ya que también 12 de los 29 segmentos exceden el umbral correspondiente (46 % de la longitud). Asimismo, se pueden apreciar porcentajes importantes de agrietamiento en las porciones inicial y final del tramo.

Como consecuencia de las deficiencias en la regularidad, el programa de la alternativa CP (Tabla 5.11) contempla la ejecución de obras de fresado y reemplazo en los trece tramos afectados desde el primer año del periodo de análisis, además de otras quince obras de este tipo durante el resto del periodo. Al tomar en cuenta los defectos estructurales, la alternativa REC+CP convierte en reconstrucciones cinco de los trece fresados iniciales y programa seis reconstrucciones adicionales en el primer año y una más en 2024 (ver Tabla 5.12).

**Tabla 5.10 Segmentos homogéneos del tramo 2 - B.**

Segmento	Longitud (km)	IRI (m/km)	D <sub>0</sub> (mm)	Agrietamiento (%)	TDPA (veh/día)	Veh. pesados (%)
2B001	1.400	5.10	0.344	39.6	1902	57.1
2B002	5.600	2.82	0.679	10.5	1814	59.3
2B003	2.500	2.58	0.388	1.1	1779	59.9
2B004	0.900	2.05	0.464	0.5	1779	59.9
2B005	3.900	2.48	0.403	1.9	1779	59.9
2B006	17.900	2.34	0.549	2.4	1779	59.9
2B007	1.600	1.64	0.419	0.2	1779	59.9
2B008	2.900	1.73	0.485	0.0	1779	59.9
2B009	2.200	1.60	0.389	0.1	1779	59.9
2B010	3.600	1.56	0.502	0.0	1779	59.9
2B011	5.200	1.71	0.337	0.0	1779	59.9
2B012	20.900	2.59	0.574	7.6	1779	59.9
2B013	1.800	2.87	0.333	6.0	1779	59.9
2B014	1.400	2.75	0.472	4.9	1779	59.9
2B015	5.700	2.05	0.406	2.4	1779	59.9
2B016	0.600	1.78	0.527	0.9	1779	59.9
2B017	1.500	1.72	0.358	0.1	1779	59.9
2B018	4.200	1.96	0.500	0.1	1779	59.9
2B019	2.800	2.02	0.358	5.8	1779	59.9
2B020	1.500	1.94	0.577	9.6	1779	59.9
2B021	0.700	1.98	0.378	6.8	1779	59.9
2B022	1.700	2.39	0.519	9.1	1779	59.9
2B023	1.500	2.57	0.430	8.6	1767	60.0
2B024	3.300	2.78	0.531	44.3	1766	60.5
2B025	6.200	3.61	0.333	75.8	1766	60.5
2B026	16.000	2.93	0.777	69.4	1766	60.5
2B027	3.400	3.12	0.368	74.9	1692	59.7
2B028	1.700	2.95	0.498	21.0	1537	58.0
2B029	28.000	1.58	0.212	0.6	1537	58.0

Tabla 5.11 Programa de obra del tramo 2 - B (CP).

Segmento	Obras por año										No. obras		
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	FR5	REC	
2B001	FR5										1	0	
2B002	FR5										1	0	
2B003	FR5										1	0	
2B004						FR5					1	0	
2B005	FR5										1	0	
2B006			FR5								1	0	
2B007										FR5	1	0	
2B008									FR5		1	0	
2B009										FR5	1	0	
2B010										FR5	1	0	
2B011									FR5		1	0	
2B012	FR5										1	0	
2B013	FR5										1	0	
2B014	FR5										1	0	
2B015					FR5						1	0	
2B016							FR5				1	0	
2B017								FR5			1	0	
2B018						FR5					1	0	
2B019					FR5						1	0	
2B020					FR5						1	0	
2B021					FR5						1	0	
2B022		FR5									1	0	
2B023	FR5										1	0	
2B024	FR5										1	0	
2B025	FR5										1	0	
2B026	FR5										1	0	
2B027	FR5										1	0	
2B028	FR5										1	0	
2B029											0	0	
											<b>Totales</b>	<b>28</b>	<b>0</b>

Tabla 5.12 Programa de obra del tramo 2 - B (REC+CP).

Segmento	Obras por año										No. obras	
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	FR5	REC
2B001	FR5										1	0
2B002	REC										0	1
2B003	FR5										1	0
2B004						FR5					1	0
2B005	FR5										1	0
2B006	REC										0	1
2B007										FR5	1	0
2B008					REC						0	1
2B009										FR5	1	0
2B010	REC										0	1
2B011									FR5		1	0
2B012	REC										0	1
2B013	FR5										1	0
2B014	FR5										1	0
2B015					FR5						1	0
2B016	REC										0	1
2B017								FR5			1	0
2B018	REC										0	1
2B019					FR5						1	0
2B020	REC										0	1
2B021					FR5						1	0
2B022	REC										0	1
2B023	FR5										1	0
2B024	REC										0	1
2B025	FR5										1	0
2B026	REC										0	1
2B027	FR5										1	0
2B028	REC										0	1
2B029											0	0
<b>Totales</b>											<b>16</b>	<b>12</b>

Por lo que se refiere a los costos, nuevamente se observa un incremento significativo entre los dos programas (de 168.276 a 318.974 millones de pesos) como resultado de los trabajos de reconstrucción. Este incremento, redonda en un abatimiento drástico de la rentabilidad de las inversiones que, en términos del VPN, pasa de +9.804 a -123.275 millones.

## 5.6 Tramo 3 - A

Para este tramo, el proceso de segmentación produjo un número de segmentos homogéneos ligeramente menor, con 21 en total. En general, los niveles *IRI* que se observan son menores que para el tramo 2 - B, sin embargo, se advierte una zona de alta irregularidad al principio del tramo, que afecta a los primeros 25 km. Lo anterior, aunado a la evolución natural del *IRI* en el resto del tramo, se tradujo en un programa CP con obras de fresado y reemplazo para todos los tramos en alguno de los años del periodo de análisis, como puede verificarse en la Tabla 5.14. Incluso, el programa prevé una segunda obra para los segmentos 2, 4, 6, 10 y 12.

En lo que corresponde a la alternativa de proyecto REC+CP, al aplicar el procedimiento del inciso 4.1 solo se detectaron valores excesivos de  $D_0$  al inicio del periodo de análisis en los segmentos 2, 6 y 18, con lo cual el programa de obra se modificó para quedar como se ilustra en la Tabla 5.15. Este cambio implicó un cambio en el costo de 164.021 a 205.614 millones de pesos (25 %) debido, en buena parte, a que los segmentos involucrados tienen una longitud combinada de casi 25 km.

Tabla 5.13 Segmentos homogéneos del tramo 3 - A.

Segmento	Longitud (km)	IRI (m/km)	$D_0$ (mm)	Agrietamiento (%)	TDPA (veh/día)	Veh. pesados (%)
3A001	4.600	3.16	0.283	1.9	14823	35.6
3A002	3.500	3.36	0.463	3.3	13335	36.2
3A003	0.400	4.40	0.234	0.7	10089	37.4
3A004	4.400	3.66	0.401	0.8	17084	30.2
3A005	11.800	2.97	0.265	1.2	17921	29.3
3A006	0.100	2.33	0.517	0.4	17921	29.3
3A007	5.200	1.68	0.262	0.6	17921	29.3
3A008	3.300	1.57	0.425	0.2	17921	29.3
3A009	4.600	1.49	0.259	0.8	17921	29.3
3A010	1.200	1.97	0.411	0.6	17921	29.3
3A011	0.200	1.93	0.206	0.4	17921	29.3
3A012	5.800	2.00	0.438	0.5	17060	29.1
3A013	6.800	2.19	0.234	0.7	12928	28.2
3A014	0.500	1.87	0.388	1.1	12928	28.2
3A015	7.800	1.93	0.258	0.3	12928	28.2
3A016	1.900	1.29	0.398	0.1	12928	28.2
3A017	0.600	1.19	0.345	0.1	12928	28.2
3A018	21.000	1.58	0.507	2.7	12342	29.0
3A019	4.800	1.84	0.231	1.5	7401	36.4
3A020	1.500	2.62	0.402	1.0	7401	36.4
3A021	14.500	1.73	0.202	3.1	14475	33.6

Tabla 5.14 Programa de obra del tramo 3 - A (CP).

Segmento	Obras por año										No. obras	
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	FR5	REC
3A001	FR5										1	0
3A002	FR5							FR5			2	0
3A003	FR5										1	0
3A004	FR5								FR5		2	0
3A005	FR5										1	0
3A006	FR5						FR5				2	0
3A007							FR5				1	0
3A008						FR5					1	0
3A009								FR5			1	0
3A010			FR5							FR5	2	0
3A011					FR5						1	0
3A012			FR5							FR5	2	0
3A013			FR5								1	0
3A014				FR5							1	0
3A015				FR5							1	0
3A016								FR5			1	0
3A017									FR5		1	0
3A018					FR5						1	0
3A019					FR5						1	0
3A020	FR5										1	0
3A021							FR5				1	0
											<b>26</b>	<b>0</b>

Tabla 5.15 Programa de obra del tramo 3 - A (REC+CP).

Segmento	Obras por año										No. obras	
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	FR5	REC
3A001	FR5										1	0
3A002	REC										0	1
3A003	FR5										1	0
3A004	FR5								FR5		2	0
3A005	FR5										1	0
3A006	REC									FR5	1	1
3A007							FR5				1	0
3A008						FR5					1	0
3A009								FR5			1	0
3A010			FR5							FR5	2	0
3A011					FR5						1	0
3A012			FR5							FR5	2	0
3A013			FR5								1	0
3A014				FR5							1	0
3A015				FR5							1	0
3A016								FR5			1	0
3A017									FR5		1	0
3A018	REC										0	1
3A019					FR5						1	0
3A020	FR5										1	0
3A021							FR5				1	0
											<b>22</b>	<b>3</b>

A pesar de los valores iniciales relativamente bajos del IRI, en este caso las dos alternativas de proyecto produjeron beneficios mayores a los costos, lo cual se refleja en VPN de 577.096 y 484.683 para las alternativas CP y REC+CP, respectivamente. Aparentemente, el último resultado se debe a que el volumen de tránsito del tramo, que puede considerarse alto, genera una tasa de evolución del *IRI* también alta, como queda de manifiesto en ambos programas por las obras activadas. Al mismo tiempo, el alto nivel de tránsito se convierte en una amplia base para la recepción de los beneficios de los proyectos y para la consolidación de la rentabilidad.

## 5.7 Tramo 3 - B

El gráfico cadenamamiento - deflexiones de la Figura 5.3 revela un comportamiento estructural con pocos cambios para el tramo 3 - B. Consecuentemente, el proceso de división produjo únicamente los cinco segmentos homogéneos que aparecen en la figura. Los detalles de estos segmentos se presentan en la Tabla 5.16.

Según la misma tabla, cuatro de los seis segmentos generados, cuyas longitudes representan el 43 % de los 104.4 km de la longitud total del tramo, tienen indicadores no satisfactorios de capacidad funcional y estructural. Como resultado de lo anterior, se obtuvo un programa de CP con un número importante de obras que, además, deben repetirse de dos a cuatro veces en cada segmento, como puede verificarse en la Tabla 5.17.

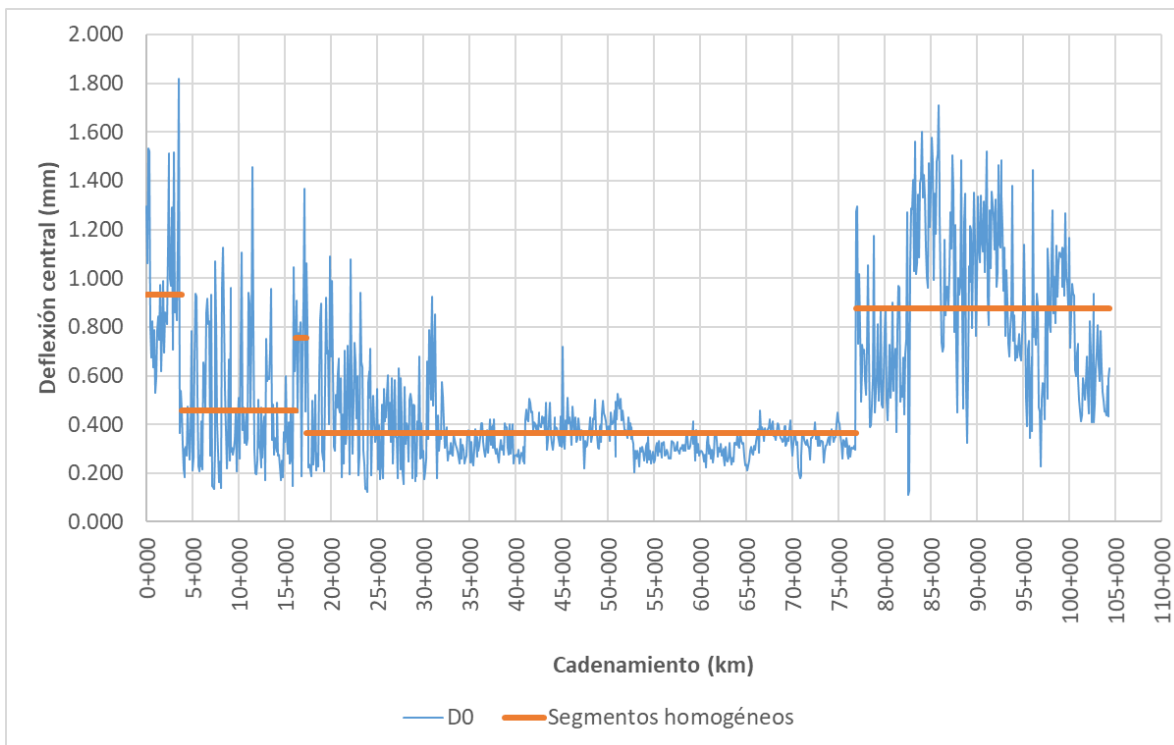


Figura 5.3. Larguillo de deflexiones y segmentos homogéneos del tramo 3 - B.

Al tomar en cuenta el comportamiento estructural, los fresados y reemplazos contemplados en el año de inicio en el programa CP se convierten en obras de reconstrucción, lo que reduce de manera notable la cantidad de reemplazos de carpeta programados en años posteriores (ver Tabla 5.18 con el programa REC+CP). Aún así, el HDM-4 estima, con base en los datos proporcionados, que será necesario efectuar reemplazos en el último año del periodo de análisis en los segmentos 2 y 3.

No obstante los mayores costos de la reconstrucción, la reducción en el número de obras de reemplazo entre ambos programas redundó en una disminución, aunque marginal, de los costos del programa REC+CP con respecto al programa CP, un hecho que no se había presentado en ninguno de los tramos analizados previamente. En contraste, el VPN bajó de 2,677.713 a 1,182.834 millones de pesos, lo cual es indicativo de la prevalencia en el tiempo de valores de *IRI* más alejados del nivel de recuperación de 1.5 m/km en el caso del programa REC+CP.

De cualquier forma, se considera que la alta rentabilidad de los dos programas es producto de una disminución importante del *IRI* en un subtramo significativo y del alto volumen de tránsito que circula por esta vía.

**Tabla 5.16 Segmentos homogéneos del tramo 3 - B.**

Segmento	Longitud (km)	IRI (m/km)	D <sub>0</sub> (mm)	Agrietamiento (%)	TDPA (veh/día)	Veh. pesados (%)
3B001	3.800	3.47	0.932	2.9	14323	36.5
3B002	12.400	3.04	0.457	3.3	15637	34.5
3B003	1.100	4.39	0.757	13.7	17730	32.9
3B004	35.100	2.21	0.366	1.5	16607	32.8
3B005	24.500	1.66	0.366	0.0	12979	32.4
3B006	27.500	3.81	0.876	16.7	11392	34.2

**Tabla 5.17 Programa de obra del tramo 3 - B (CP).**

Segmento	Obras por año										No. obras	
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	FR5	REC
3A001	FR5			FR5			FR5			FR5	4	0
3A002	FR5							FR5			2	0
3A003	FR5				FR5				FR5		3	0
3A004			FR5								1	0
3A005								FR5			1	0
3A006	FR5				FR5				FR5		3	0
											<b>14</b>	<b>0</b>



Tabla 5.18 Programa de obra del tramo 3 - B (REC+CP).

Segmento	Obras por año										No. obras	
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	FR5	REC
3A001	REC										0	1
3A002	REC									FR5	1	1
3A003	REC									FR5	1	1
3A004			FR5								1	0
3A005								FR5			1	0
3A006	REC										0	1
											<b>4</b>	<b>4</b>

## 5.8 Costos y rentabilidad de las alternativas de proyecto

Los incisos previos contienen múltiples referencias a las cifras de costos y VPN concentradas en la Tabla 5.19. A este respecto, conviene subrayar lo siguiente:

- Los costos se refieren a los presupuestos de inversión necesarios durante el periodo de análisis para la implantación de las alternativas de proyecto respectivas y, en todos los casos, corresponden a montos sin actualizar.
- Exceptuando al tramo 3 - B, los costos de la alternativa REC+CP siempre fueron mayores que los de la alternativa CP, lo que básicamente se debe a que el costo unitario estimado para la reconstrucción es 1.4 veces mayor que el del fresado y reemplazo (ver Tabla 4.3).
- La rentabilidad de las inversiones está directamente relacionada con las deficiencias de *IRI* relativas al nivel máximo admisible definido para este indicador. Se sabe que, por lo regular, cuando se utiliza la metodología de análisis económico del HDM-4, resulta complicado justificar los proyectos de conservación que implican mejoras marginales de los niveles de *IRI*.
- Otro factor decisivo en el cálculo de la rentabilidad es el volumen de tránsito. Generalmente, la justificación económica de proyectos con un TDPA menor a 3,000 veh/día constituye también una tarea ardua.

Tabla 5.19 Costos y VPN de las alternativas de proyecto.

Tramo	Montos en millones de pesos			
	Costos		VPN	
	CP	REC+CP	CP	REC+CP
1 - A	38.432	38.791	19.148	18.456
1 - B	26.375	-	-8.592	-
2 - A	195.178	328.439	-41.921	-177.022
2 - B	168.276	318.974	9.804	-123.275
3 - A	164.021	205.614	577.096	484.683
3 - B	254.472	246.321	2677.713	1182.834



## 6. Conclusiones

---

De los resultados obtenidos en las diferentes etapas del trabajo descrito se derivan las conclusiones que se presentan a continuación:

- Por distintas razones, administraciones de carreteras en México y en todo el mundo estiman las necesidades de conservación de las redes a su cargo empleando únicamente mediciones de la capacidad funcional y los deterioros superficiales de los pavimentos, lo que conlleva el riesgo de subestimar tales necesidades.
- El análisis de estadística descriptiva de las muestras de *IRI* y  $D_0$  de los tramos del estudio mostró lo siguiente:
  - Si se colocan los valores de desviación estándar de acuerdo con el orden creciente de las medias, se observa una línea de tendencia similar y casi paralela. Este hecho, evidencia que la dispersión de las mediciones puede constituir también una medida del deterioro de los pavimentos.
  - Los datos de *IRI* y  $D_0$  examinados tienen distribuciones con un marcado sesgo a la derecha y con un exceso de curtosis. A este respecto, cabe recordar que los indicadores del estado del pavimento siempre pueden adquirir valores alejados de las medidas de tendencia central, ya sea por deficiencias en los materiales y procedimientos de construcción o por las características intrínsecas de los métodos de recolección de datos.
  - Vinculado con lo anterior, los rangos de las muestras son bastante amplios.
- En México, se ha utilizado la hipótesis de que existe una correlación entre el estado superficial (medido en términos de la regularidad) y la capacidad estructural de los pavimentos. La posible relación directa entre ambas variables se encuentra prácticamente ausente en la literatura técnica, sin embargo, los modelos de evolución del *IRI* del HDM-4 contemplan esta relación, aunque también vinculan la regularidad con los deterioros superficiales.
- Para investigar la hipótesis del punto anterior, se realizó un ejercicio de aplicación de técnicas de regresión lineal con los datos de cada uno de los tramos. Este ejercicio produjo las siguientes conclusiones parciales:

- No se puede establecer la dependencia directa del *IRI* con respecto a  $D_0$ , al menos no a través de un modelo de regresión lineal simple.
  - En la mayoría, de los casos, los modelos explican una fracción marginal del error. Así, el mejor resultado para el coeficiente de determinación fue  $R^2 = 0.3295$ .
  - Todos los análisis generaron errores residuales con una desviación estándar considerable, que podría estar vinculada a la dispersión de los datos originales.
  - Se obtuvieron modelos estadísticamente significativos en la mitad de los análisis. Esta fracción está vinculada a tramos con niveles relativamente altos de  $D_0$ .
  - Los deterioros de la capa de rodadura parecen actuar como un mecanismo de enlace entre las deficiencias de capacidad estructural y funcional. Por lo tanto, se considera que tales defectos deberían eventualmente incorporarse al ejercicio de modelización.
- El HDM-4 no permite la definición de criterios de intervención basados en la capacidad estructural de los pavimentos, por lo que es incapaz de activar trabajos apropiados para atender expresamente deficiencias relacionadas con ese atributo. Sin embargo, esta carencia puede solucionarse mediante el procedimiento que se ha utilizado en los cursos del IMT sobre la aplicación del HDM-4 en la formulación de programas basados en el desempeño.
  - En estudios como el descrito en este documento, que se enfocan primordialmente en la vertiente técnica de la evaluación de proyectos carreteros, conviene utilizar la aplicación de *análisis de estrategias* del HDM-4, ya que es la única con la que se pueden integrar, jerarquizar y optimizar los programas de obra según su contribución a la mejora del estado del pavimento, medida en términos del *IRI*.
  - El presente trabajo se ha enfocado en los cambios que pueden generarse en un programa de conservación cuando se toman en cuenta debidamente las características de capacidad de carga de los tramos involucrados. Con el estudio se ha verificado que estos cambios se reflejan en aspectos como la cantidad, extensión y año de ejecución de las obras programadas, los costos del ciclo de vida del conjunto de tramos de interés, el desempeño técnico de los tramos y la rentabilidad de las inversiones, todos ellos relevantes en el nivel de red de la gestión de pavimentos y la gestión de activos.
  - En términos generales, se observa que la importancia de las diferencias entre los programas que omiten o toman en cuenta la capacidad de carga

crece con la magnitud de las deficiencias estructurales existentes. Para los tramos del estudio, utilizando como métrica el porcentaje de obras de reconstrucción en la solución final, la importancia de las diferencias varió entre 0 (tramo 1 - B, en buen estado integral) y 57 % (tramo 2 - A, con alta incidencia de valores de  $D_0$  por encima del límite máximo). Las obras de reconstrucción forman parte de la alternativa diseñada para revertir las deficiencias estructurales.

- El costo unitario estimado para la reconstrucción fue casi 1.5 veces mayor que el del fresado y reemplazo, obra de conservación periódica propuesta como intervención principal para la solución de problemas de capacidad funcional. Consecuentemente, los costos para el periodo de análisis de la alternativa de reconstrucción fueron mayores en cinco de los seis casos analizados, lo que a su vez provoca que esta alternativa tenga menores márgenes de rentabilidad y que, en ciertos casos, se vuelva inviable desde el punto de vista económico.
- Tomando en cuenta lo expresado en el párrafo anterior, se recomienda el análisis conjunto de las alternativas de reconstrucción y conservación periódica en las corridas del HDM-4 que se efectúen con fines de optimización del presupuesto.
- En relación con los dos últimos puntos, debe tenerse en cuenta que, en el contexto del HDM-4, la rentabilidad de los proyectos de conservación de pavimentos es altamente sensible a la diferencia del *IRI* actual con respecto al deseado y al volumen del tránsito usuario.



## Bibliografía

---

- AASHTO, 1993. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington(D.C.): American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- AENOR, 2016. *UNE 41250-4: Métodos de ensayo para la medida de las deflexiones en firmes de carretera. Parte 4: Curviámetro*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- Arroyo, J. A., Torres, G., González, J. A. & Hernández, S., 2018. *Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2018. Publicación técnica no. 526*, San Fandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte.
- Bennett, C. R., 2004. *Sectioning of Road Data for Pavement Management*. Brisbane, Australia, Queensland Department of Main Roads.
- Bennett, C. R. y otros, 2007. *Data Collection Technologies for Road Management*, Washington, D.C., Estados Unidos de América: The World Bank.
- Brown, S., 2016. *Measures of Shape: Skewness and Kurtosis*. [En línea] Available at: <https://brownmath.com/stat/shape.htm> [Último acceso: 1 junio 2020].
- Cheusheva, S., 2018. *Linear Regression Analysis in Excel*. [En línea] Available at: <https://www.ablebits.com/office-addins-blog/2018/08/01/linear-regression-analysis-excel/> [Último acceso: 1 junio 2020].
- De Solminihaç, H., 2001. *Gestión de Infraestructura Vial*. 2a. ed. Santiago: Ediciones Universidad Católica de Chile.
- García, E., 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. Quinta ed. Ciudad de México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Gorrostieta, C., Solorio, R. & Hernández, R. I., 2008. *Algoritmo para la segmentación de carreteras con base en parámetros de respuesta del pavimento. Informe interno*, San Fandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte.
- Haas, R. & Hudson, W. R., 2015. *Pavement Asset Management*. Salem(MA): John Wiley & Sons, Inc; Scrivener Publishing LLC.

Kerali, H. R. G., Odoki, J. B. & Stannard, E. E., 2006. *HDM-4, Desarrollo y gestión de carreteras: Volumen 1, descripción general de HDM-4*. París: Asociación Mundial de la Carretera (PIARC).

MG Lay Library, 2015. *Austrroads Glossary of Terms*. Sidney: Austrroads Ltd.

Minitab, 2015. *What Is the F-test of Overall Significance in Regression Analysis?*. [En línea]

Available at: <https://blog.minitab.com/en/adventures-in-statistics-2/what-is-the-f-test-of-overall-significance-in-regression-analysis>

[Último acceso: 1 junio 2020].

Montgomery, D. C. & Runger, G. C., 2003. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Tercera ed. Nueva York(NY): John Wiley & Sons, Inc.

Odoki, J. B. & Kerali, H. G. R., 2006. *HDM-4, Highway Development and Management: Volume 4, Analytical Framework and Model Descriptions*. París: Asociación Mundial de la Carretera (PIARC).

Rada, G. R. y otros, 2016. *Pavement Structural Evaluation at the Network Level: Final Report*, McLean, VA, Estados Unidos de América: Federal Highway Administration.

Rico, A., Orozco, J. M., Téllez, R. & Pérez, A., 1990. *Primera fase, Sistema Mexicano para la Administración de los Pavimentos (SIMAP). Documento técnico no. 3*, San Fandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte.

SCT, 2016. N-CSV-CAR-1-03-004-16: Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI). En: *Normativa para la Infraestructura del Transporte*. Ciudad de México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

SCT, 2017. N-CSV-CAR-1-03-010-17: Determinación de las deflexiones de un pavimento (DEF). En: *Normativa de la Infraestructura del Transporte*. Ciudad de México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

SCT, 2020-1. N-CSV-CAR-1-03-007-20: Determinación del coeficiente de fricción (CF). En: *Normativa de la Infraestructura del Transporte*. Ciudad de México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

SCT, 2020-2. N-CSV-CAR-1-03-006-20: Determinación de la macrotextura (MAC). En: *Normativa para la Infraestructura del Transporte*. Ciudad de México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Solorio, R., 2019. Programación de la conservación para contratos basados en el desempeño empleando el HDM-4. *Routes/Roads*, Issue 381, pp. 53-55.

Westfall, P. H., 2014. Kurtosis as Peakedness, 1905 – 2014. R.I.P. *The American Statistician*, 68(3), pp. 191-195.







# COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



**Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo"**  
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,  
Querétaro, México. C.P. 76703  
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610  
Fax: +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>