



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

# IDENTIFICACIÓN DE CICLOS DE DETERIORO EN FUNCIÓN DEL IRI MEDIANTE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS

José Ricardo Solorio Murillo<sup>1</sup>, Agustín Sánchez Olguín<sup>2</sup>, Marcos Ariel Villanueva Guzmán<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Mexicano del Transporte, San Fandila, México, [rsolorio@imt.mx](mailto:rsolorio@imt.mx)

<sup>2</sup> Instituto Mexicano del Transporte, San Fandila, México, [Agustin.Sanchez@imt.mx](mailto:Agustin.Sanchez@imt.mx)

<sup>3</sup> Instituto Mexicano del Transporte, San Fandila, México, [ariel.villanueva@imt.mx](mailto:ariel.villanueva@imt.mx)

## Resumen

El presente trabajo aborda la aplicación de un enfoque alternativo para la delimitación de ciclos de deterioro de segmentos de pavimento y la subsecuente recuperación de información complementaria para el desarrollo de modelos de evolución. Este enfoque comprende, por un lado, la identificación de tramos candidatos para la modelización en función de las diferencias entre mediciones anuales y, por otro, la validación de estos tramos mediante la aplicación de la prueba t por pares a las mediciones. La identificación preliminar tiene como propósito evitar la búsqueda y procesamiento de información complementaria de tramos sin utilidad real para la modelización, tareas que forman parte del enfoque convencional empleado en el desarrollo de modelos para familias de tramos. En el enfoque alternativo, se ha previsto el tratamiento de la información complementaria mediante la aplicación reiterada de los mismos procesos de identificación preliminar / análisis estadístico con los indicadores que correspondan, así como la posterior combinación de los segmentos obtenidos con cada indicador. El nuevo enfoque puede ser útil para reducir los tiempos de consulta y proceso de información en los casos en los que la misma no se encuentre almacenada en una plataforma formal de bases de datos.

**Palabras Clave:** Modelos de deterioro, familias de tramos, prueba t por pares.

## 1 Introducción

Se resumen en este documento los hallazgos del proyecto II-24/21 del Instituto Mexicano del Transporte, titulado “Desarrollo de modelos de evolución del IRI a nivel de red mediante la regresión de datos históricos. Fase 1: Identificación de ciclos de deterioro mediante técnicas estadísticas”. El proyecto se definió inicialmente en torno a dos actividades principales: por un lado, seleccionar y clasificar un conjunto de tramos de la red federal de carreteras en función de variables explicativas del incremento del IRI y, por otro, delimitar para esos tramos posibles ciclos de deterioro con el auxilio de técnicas estadísticas. Al proceso implícito en la segunda actividad se le llama también “validación estadística” o “análisis detallado” en el resto del documento.

La primera actividad forma parte de un método para el desarrollo de modelos empíricos a nivel de red para familias de tramos definidas mediante un proceso de clasificación, método de uso común en los EUA [1]. La necesidad de la validación estadística se deriva de la falta de registros sistemáticos y confiables del historial de conservación de las carreteras federales, lo que impide delimitar los ciclos de deterioro de manera directa y, con ello, recuperar los datos necesarios para el desarrollo de los modelos. En el caso de la red federal, la fuente principal de datos está constituida por el programa de auscultación de carreteras que ejecuta la Dirección General de Servicios Técnicos de la SICT desde 2012.

El programa de auscultación utiliza como plataforma principal de almacenamiento un conjunto de archivos de Excel individuales organizados por tramo, año y aspecto evaluado (características superficiales, estructurales y resistencia al deslizamiento). Dado el número considerable de archivos del programa, cualquier consulta de información resulta laboriosa, y en particular las necesarias para clasificar los tramos según lo antes mencionado. Consecuentemente, se añadió al proyecto una actividad consistente en la identificación preliminar de tramos con información potencialmente útil (tramos



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

candidatos), a partir del cálculo de las diferencias entre valores medios anuales del indicador de interés (en este caso el IRI). Así, tanto la consulta de información sobre variables explicativas como el análisis detallado se llevaría a cabo solo en el caso de los tramos con incrementos sostenidos de la irregularidad, lo que constituye un enfoque alternativo para la selección de los datos para la modelización.

Por otro lado, se decidió que el proceso de clasificación de los tramos estuviera también basado en la identificación preliminar de datos útiles y en la verificación estadística. Con ello se generaría una serie de ciclos de deterioro en términos de distintos indicadores, cuya combinación permitiría en última instancia definir las familias de tramos a las que corresponderían los modelos. Por su complejidad, se decidió postergar el desarrollo del nuevo proceso de clasificación, de manera que el presente documento trata únicamente la identificación de tramos candidatos y la evaluación estadística en lo que se refiere a la evolución del IRI.

La siguiente sección contiene una breve descripción de los modelos de deterioro y del enfoque alternativo propuesto para la identificación de datos útiles. En la sección 3 se presentan los datos utilizados en el análisis, que provienen de mediciones efectuadas en el corredor México – Nuevo Laredo durante el periodo 2012-2022. La sección 4 trata el procedimiento referente a la identificación de tramos candidatos a partir del promedio de las diferencias entre mediciones anuales consecutivas y de criterios relacionados con su posible utilidad en el desarrollo de los modelos

En la sección 5 se describe el análisis detallado y se ejemplifica su uso en la validación de tramos candidatos. El procedimiento incluye la aplicación de la prueba t por pares a mediciones anuales consecutivas para determinar la significación de las diferencias negativas observadas, el cual se ensayó con tres niveles de agregación de la información: tramos completos, segmentos homogéneos y segmentos definidos por marcas kilométricas. Esto último tuvo como propósito evaluar el efecto del tamaño de la muestra en los resultados. Finalmente, la sección 6 presenta las conclusiones del trabajo.

La sostenibilidad de la industria del asfalto se encuentra sin duda vinculada a la idoneidad, rentabilidad económica y durabilidad de las intervenciones para la preservación de los pavimentos asfálticos. A su vez, estos factores dependen en buena medida del uso de modelos de deterioro adecuados, lo que relaciona estrechamente al proyecto con el tema del seminario.

## 2 Modelos de deterioro e identificación de datos útiles

### 2.1 Aspectos generales

Durante su vida útil, los pavimentos son objeto de una serie de ciclos continuos de deterioro que se reinician cada vez que se ejecutan trabajos de conservación, como lo ilustra el gráfico de la evolución del IRI en función del tiempo de la Figura 1. Los *modelos de deterioro* son expresiones matemáticas que se utilizan para simular estos ciclos, tarea de gran importancia en el diseño y la gestión de pavimentos. En el primer caso, los modelos se utilizan como base para dimensionar la sección y especificar los materiales necesarios para ofrecer condiciones de servicio adecuadas durante la vida útil requerida. En el caso de la gestión, las previsiones de los modelos permiten justificar los programas de conservación necesarios para asegurar esas mismas condiciones a nivel de proyecto y de red, en la medida en que lo permitan los recursos disponibles.

### 2.2 Modelos de deterioro empíricos a nivel de red

Dentro de la esfera de competencia de las organizaciones de carreteras, resultan de especial interés los llamados *modelos de deterioro empíricos a nivel de red*, un tipo de modelos que se utiliza para representar el comportamiento del pavimento a través de cambios en variables que se calculan a partir de los datos de muestras representativas [1]. El carácter empírico de estos modelos proviene del hecho de que su desarrollo se basa en observaciones realizadas a través de la medición en campo de indicadores diversos del estado del pavimento. Por otro lado, la designación *nivel de red* implica que los modelos no se sustentan en una descripción teórica rigurosa del comportamiento del pavimento y que, en general,



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

sus resultados deben considerarse como estimaciones del orden de magnitud de los indicadores de condición en el futuro.

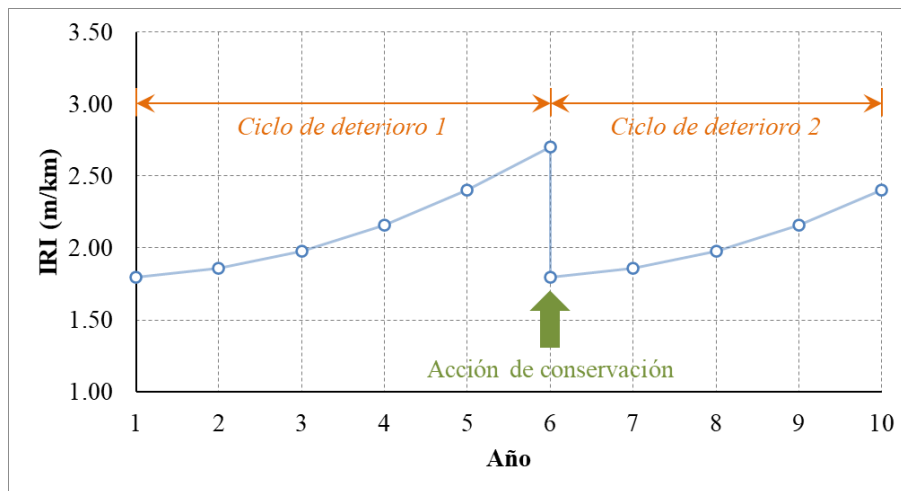


Figura 1. Ciclos de deterioro de un pavimento en función del IRI.

En los EUA, es común el desarrollo de modelos de deterioro empíricos a nivel de red con base en una metodología que puede dividirse en dos fases principales: en primer lugar, seleccionar un conjunto de tramos y clasificarlos en familias, de acuerdo con una serie predefinida de variables explicativas del deterioro del pavimento (volumen de tránsito, indicadores de la capacidad estructural, deterioros superficiales, agentes ambientales, etc.). La segunda fase comprende el ensamble propiamente dicho del modelo mediante técnicas de regresión, cadenas de Márkov (métodos más comunes) o empleando procedimientos alternativos [2]. En cualquier caso, el uso de esta metodología conduce a la obtención de modelos de tipo paramétrico, uno por cada combinación de las variables explicativas y todos ellos con una sola variable independiente: el tiempo transcurrido (en años) desde el último año de recopilación de los datos.

### 2.3 Identificación de datos útiles

El proceso para el desarrollo de modelos empíricos de deterioro exige que la información de base corresponda exclusivamente a ciclos como los que aparecen en la Figura 1. Para lograr lo anterior, debe dividirse cualquier periodo que incluya trabajos de conservación y señalarse los años de inicio y finalización de las obras (que a menudo coinciden) como los años de terminación y comienzo de ciclos distintos. Nótese que, con la delimitación de ciclos de deterioro, queda definido también el conjunto de datos útiles para el proceso de modelización.

Desafortunadamente, en el caso de las carreteras mexicanas no existen registros institucionales sistematizados de los trabajos de conservación llevados a cabo en el tiempo. Derivado de este hecho, en años recientes se realizó en el IMT un proyecto vinculado a una tesis de grado en el que se propuso un método para subsanar en cierta medida la carencia de registros históricos. El método se basa en la aplicación de una prueba de hipótesis para evaluar la significación estadística de diferencias negativas de IRI entre mediciones anuales consecutivas y, con ello, identificar los años que posiblemente correspondan al final de un ciclo de deterioro y al inicio de uno nuevo [3]. Con este fin, puede aplicarse la *prueba de los signos* o la *prueba t por pares*.

En lo que corresponde a la segunda de las pruebas, la significación de las diferencias negativas puede evaluarse mediante las expresiones:

$$H_0: \mu_D = 0 \quad (1)$$



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

$$H_1: \mu_D < 0 \quad (2)$$

En las expresiones anteriores,  $H_0$  y  $H_1$  son la hipótesis nula y la hipótesis alternativa, respectivamente, mientras que  $\mu_D$  es la media de las diferencias entre las mediciones de IRI anteriores y posteriores de cada par de años consecutivos considerados. La significación de las diferencias negativas puede evaluarse en términos del *valor p* de la prueba, para un intervalo de confianza dado.

Por otra parte, el programa de auscultación de la red federal de carreteras que tiene en marcha la Dirección General de Servicios Técnicos de la SICT desde 2012, constituye la principal fuente de información para el desarrollo de modelos de deterioro de los pavimentos de esta parte de la red nacional. La plataforma de almacenamiento de los datos del programa es un vasto conjunto de archivos de Excel que, hasta el año 2022, comprendía aproximadamente 150,000 archivos y un espacio de almacenamiento de 224 GB. Este hecho, representa una limitante para recuperar y procesar la información en forma ágil, de manera que el ejercicio descrito en este documento y otros realizados en el pasado han estado precedidos con la migración de información a plataformas formales de bases de datos [4], [5].

El proceso de identificación de datos útiles comprende no solo al parámetro de interés para la modelización del deterioro, sino también a las variables explicativas utilizadas en la clasificación de los tramos a que se refiere la metodología delineada en el inciso 2.2. En ambos casos, es necesario recuperar datos útiles dentro de los ciclos de deterioro delimitados en función del parámetro principal, por lo que la recuperación de información para el desarrollo de modelos empíricos a nivel de red y la identificación de datos útiles pueden ser tareas laboriosas y lentas en el caso de la red federal de carreteras.

#### 2.4 Enfoque alternativo

Tomando en cuenta lo expuesto en el inciso anterior, se propone investigar un método alternativo para la identificación de tramos útiles, que permita seleccionar tramos de manera preliminar antes de proceder a la validación estadística de los datos y a la recuperación de información complementaria para la clasificación de los tramos en familias. A continuación, se precisan las distintas tareas del método:

- a) Seleccionar una muestra de tramos de la red federal de carreteras.
- b) Integrar series anuales del indicador de interés (en este caso el IRI) para esos tramos, que abarquen la cobertura total del programa de auscultación.
- c) Para cada tramo considerado y cada par de mediciones anuales disponibles, calcular el promedio de las diferencias de las mediciones de cada par.
- d) Delimitar en forma preliminar posibles ciclos de deterioro con base en el signo de los promedios de las diferencias y seleccionar tramos para el análisis estadístico tomando en cuenta criterios como los que se indican a continuación:
  - i. Duración de los ciclos.
  - ii. Ocurrencia de los ciclos en los últimos años del periodo de análisis.
  - iii. Similitud de los patrones de evolución con las curvas teóricas.
  - iv. Similitud de los patrones de evolución en tramos contiguos.
  - v. Longitud: a mayor longitud mayor disponibilidad de datos.
  - vi. Diferencias negativas mínimas, las cuales pueden tener relación con un comportamiento estable de los tramos con respecto al deterioro.
- e) Validar estadísticamente la utilidad de cada tramo seleccionado mediante las siguientes acciones:
  - i. Verificar la duración del ciclo de deterioro del tramo aplicando la prueba t a cada par de mediciones consecutivas.
  - ii. Utilizando el método de segmentación dinámica del IMT [6] u otro similar, dividir el tramo en segmentos homogéneos de longitud variable obtenidos en función del indicador de interés, y aplicar la prueba a cada segmento.
  - iii. Dividir el tramo en segmentos definidos entre postes kilométricos y aplicar la prueba a todos los segmentos resultantes.



**Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.**

- iv. Determinar los efectos de las segmentaciones de los dos puntos previos en amplitud de los ciclos y, de ser necesario, ajustar correspondientemente la definición de los tramos con datos útiles.
- f) Repetir los pasos c) a e) en función de otros parámetros relacionados con el deterioro del pavimento, como el coeficiente de fricción, el agrietamiento o las deflexiones.
- g) Integrar segmentos con patrones de deterioro homogéneos mediante la combinación de los ciclos de deterioro identificados para los diferentes parámetros
- h) De ser necesario, dividir los segmentos del punto anterior en función de sus características de tránsito, clima y de su jurisdicción.

En las siguientes secciones, se describe la aplicación de lo indicado en los cinco primeros incisos del procedimiento al análisis de la evolución del IRI en el corredor México - Nuevo Laredo durante el periodo 2012-2022. Se contempla el análisis y estructuración del resto del procedimiento en estudios posteriores.

### **3 Información utilizada**

#### **3.1 Programa de auscultación de la SICT**

Los datos utilizados en el presente trabajo son producto del Programa de Auscultación de la Red Carretera Federal puesto en marcha por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SICT en el año 2012 y vigente hasta la fecha. Este programa tiene como fin último la evaluación de la capacidad funcional y estructural de las carreteras federales del país, libres y de cuota. Para ello, se miden anualmente distintos indicadores del estado físico de los pavimentos como el Índice de Regularidad Internacional (IRI), el coeficiente de fricción, la profundidad de la macrotextura, la profundidad de roderas, el área afectada por deterioros superficiales y las deflexiones del pavimento [7].

La información recopilada cada año se entrega a las Direcciones Generales de la Subsecretaría de Infraestructura, que la utilizan en la caracterización del estado actual de las carreteras federales y en la preparación de programas y proyectos para su conservación y modernización. El Instituto Mexicano del Transporte también ha sido destinatario de los datos de programa y los ha empleado en proyectos de investigación y desarrollo diversos como el aquí presentado.

#### **3.2 Tramos considerados: corredor México – Nuevo Laredo**

Dado el inconveniente que, en términos de accesibilidad de la información, representa el uso de archivos de Excel por tramo / año / aspecto evaluado como plataforma principal para el almacenamiento de los datos del programa, en estudios previos del IMT relacionados con la evolución del IRI en la red federal se ha migrado parte de la información del programa a una plataforma de bases de datos, en particular las mediciones de IRI efectuadas entre 2012 y 2016 en el corredor México - Nuevo Laredo.

A fin de aprovechar la migración de esta información, se decidió enfocar el nuevo proyecto en el mismo conjunto de tramos, lo que implicó la necesidad de complementar la base de datos con las mediciones efectuadas entre 2017 y el último año con información disponible al momento de iniciar el proyecto, esto es, 2022. Al igual que en la última migración, efectuada como parte del proyecto II-15/21, se utilizó como plataforma de destino el sistema de gestión de bases de datos relacionales SQL Server [5].

El procesamiento de información para la identificación preliminar de datos útiles, se llevó a cabo a través de una serie de libros de Excel, en los que se utilizaron referencias a archivos con este mismo formato creados mediante el software que se desarrolló como parte del mismo proyecto II-15/21.

Cabe destacar que la muestra del estudio comprende todos los tramos de carreteras con algún tramo dentro del corredor, independientemente de la pertenencia al mismo de cada tramo individual. Así, la muestra quedó integrada por sesenta y nueve tramos que forman parte del corredor y veinte localizados fuera de él. La identificación de carreteras y tramos se basa, en lo general, en el sistema de clasificación



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

del Libro de Datos Viales de la SICT [8]. Sin embargo, para facilitar la referencia a los tramos en los distintos resúmenes de resultados, se adoptó una clave del tipo:

$$nn - [EC|FC] - SCm,$$

donde  $nn$  es un número consecutivo con formato de dos dígitos y las siglas  $EC|FC$  indican si el tramo se encuentra dentro o fuera del corredor y  $SCm$  indica el sentido de circulación con  $m = 1$  para el sentido en el que crece el cadenamiento, 2 para el sentido en el que decrece y 0 para ambos sentidos en vías de un carril por sentido.

### 3.3 Mapas de calor del IRI

La migración a una plataforma de bases de datos de los resultados del programa de auscultación facilita la realización de consultas de muy diversa índole y gran utilidad. Una de ellas consiste en la visualización de la variación espacial y temporal de las mediciones, mediante gráficos conocidos como *mapas de calor*. En general, este tipo de gráficos permite representar la magnitud de un fenómeno mediante escalas de colores y dar seguimiento a su evolución en dos dimensiones, en este caso, la distancia con respecto a un origen determinado y el tiempo.

A manera de ejemplo considérese el mapa de la Tabla 1 en el que se ilustra la variación espacial de los valores medios de IRI en los tramos en los que se divide la autopista Puerto México - La Carbonera según el Libro de Datos Viales de la DGST. Se presentan únicamente los tramos con sentido de circulación coincidente con la dirección en la que crece el cadenamiento. El mapa se ha construido con base en una escala de colores que varía gradualmente entre verde ( $IRI \leq 1.00$ ), amarillo ( $IRI = 2.25$ ) y rojo ( $IRI \geq 3.50$ ).

Tabla 1. Mapa de calor del IRI, autopista Puerto México - La Carbonera, SC1 (202+000 - 235+600).

Tramo	CadIni	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
48-EC-SC1	202+000	1.89	2.02	3.85	3.06	2.46	2.14		2.56	2.85	3.58	3.95
49-EC-SC1	203+640	2.32	2.31	2.12	2.66	2.93	2.29		2.78	2.51	3.31	3.96
50-EC-SC1	204+070	1.49	1.07	2.02	1.56	1.69	1.73		2.19	2.24	2.87	3.42
51-EC-SC1	204+500	1.63	1.54	2.66	1.95	2.29	2.31		2.64	3.09	3.86	4.67
52-EC-SC1	205+760	1.69	1.21	1.59	0.95	1.08	1.15		1.43	1.43	1.81	2.06
53-EC-SC1	224+940	1.75	1.16	1.48	1.00	1.48	1.68		1.25	1.36	1.72	1.86
54-EC-SC1	228+300	1.85	1.45	1.83	1.01	1.21	1.23		1.65	1.67	2.06	2.35

El mapa muestra dos zonas contrastantes: la primera, abarca los tramos 48 al 51 (del km. 202+000 al 205+760), y exhibe un comportamiento de bueno a regular entre 2012 y 2017, que empeora a partir de 2019 con un deterioro sostenido que da como resultado valores de IRI de alrededor de 4 m/km en las mediciones de 2022. La otra zona se encuentra definida entre los tramos 52 al 54 (km. 205+760 al 235+600) y presenta un comportamiento más estable, con valores de IRI que no superan los 2.5 m/km, aunque se observa también una mayor degradación hacia el final del periodo. El mapa permite también advertir que no se realizaron mediciones en el año 2018.

## 4 Identificación preliminar de datos útiles

### 4.1 Diferencias entre mediciones sucesivas

A través de los mapas de calor basados en los valores medidos de IRI, se pueden identificar de manera expedita los niveles de irregularidad existentes en un tramo y las tendencias de su evolución en el tiempo. Sin embargo, resulta difícil apreciar en ellos el signo del cambio en el promedio del IRI entre dos



mediciones consecutivas, el cual se pretende utilizar como indicador para la delimitación preliminar de los ciclos de deterioro, de acuerdo con lo expuesto en el inciso 2.4.

De esta manera, para los fines del presente estudio, resulta de mayor utilidad la generación de mapas de calor de las diferencias entre tales mediciones. Como ejemplo de este modo alternativo de visualizar la evolución temporal del IRI, en la Tabla 2 se presenta el mapa de las diferencias entre promedios anuales para la misma autopista Puerto México - La Carbonera, en el sentido de circulación SC1.

Tabla 2. Mapa de las diferencias, Puerto México - La Carbonera, SC1 (202+000 - 235+600).

Tramo	CadIni	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22
48-EC-SC1	202+000	0.14	1.82	-0.79	-0.60	-0.32			0.29	0.73	0.37
49-EC-SC1	203+640	-0.02	-0.18	0.54	0.27	-0.64			-0.27	0.80	0.65
50-EC-SC1	204+070	-0.42	0.96	-0.46	0.13	0.04			0.05	0.63	0.56
51-EC-SC1	204+500	-0.42	1.11	-0.71	0.35	0.01			0.45	0.77	0.81
52-EC-SC1	205+760	-0.49	0.38	-0.64	0.13	0.07			0.01	0.37	0.25
53-EC-SC1	224+940	-0.52	0.32	-0.47	0.48	0.20			0.10	0.36	0.14
54-EC-SC1	228+300	-0.52	0.38	-0.82	0.20	0.01			0.02	0.39	0.29

En este caso, se utiliza una escala graduada de colores diferente, que varía entre: rojo ( $\mu_D \leq -2.5$ ), blanco ( $\mu_D = 0$ ) y verde ( $\mu_D \geq 2.5$ ), donde  $\mu_D$  representa la media de las diferencias entre años consecutivos. Si bien la Tabla 2 también muestra cierto contraste entre el comportamiento de los tramos 48 al 51 y 52 al 54, en particular por el deterioro a mayor tasa del primer grupo al final del periodo, en realidad este nuevo diagrama proporciona evidencia de un comportamiento más o menos homogéneo del conjunto de tramos en lo que respecta a los ciclos de deterioro, especialmente por la aparente ejecución de obras entre los años 2012-2013 y 2014-2015 y por el franco deterioro del conjunto a partir de 2019. Este es, precisamente, el tipo de indicios que se procura encontrar en esta etapa de identificación preliminar de datos útiles. En el mapa de la Tabla 2 se advierte también que una suspensión de las mediciones como la ocurrida en 2018 provoca no solo la pérdida de datos de modelización para ese año, sino la del patrón de deterioro que cubre el periodo que va del año inmediato anterior al siguiente, es decir de 2017 a 2019.

Aunque los mapas como el de la Tabla 2 proporcionan una vista general de los patrones de deterioro, son los valores de las diferencias en sí mismos y su secuencia los elementos que condicionan la utilidad potencial de los tramos para el desarrollo de los modelos. En este sentido, es claro que solo serán de interés aquellos tramos en los que se observen secuencias de un cierto número de años consecutivos (duraciones de los ciclos) con diferencias medias positivas o negativas cercanas a cero. El conjunto de estos pares constituye la base para la selección de los tramos candidatos que serán objeto del proceso de análisis estadístico que se describe en la sección 5.

A fin de facilitar el proceso de identificación preliminar de los tramos, se escribió un código corto en lenguaje *Visual Basic for Applications* de Excel que calcula la duración máxima de los ciclos de deterioro de cada tramo, a partir de las diferencias contenidas en los mapas de calor. En la Tabla 3 se resumen estos resultados en términos del número de tramos por duración máxima del ciclo en años.

De acuerdo con esta Tabla, la duración máxima de los posibles ciclos de deterioro detectada en la muestra fue de seis años, y solo se presenta en uno de los 173 tramos disponibles al considerar los diferentes sentidos de circulación. Asimismo, solo doce del total de los tramos presenta ciclos de cinco años, de manera que para el resto (92 %), la duración máxima de los posibles ciclos es de entre dos y cuatro años. Este resultado es congruente con una percepción existente en el medio respecto a la preponderancia de ciclos de deterioro cortos en la red federal de carreteras, especialmente en lo que concierne a la red primaria y de corredores de las que forman parte los tramos explorados en este trabajo.



Tabla 3. Duraciones máximas de los ciclos para los tramos de la muestra.

Tipo de tramo	SC	No. (%) de tramos por duración máxima del ciclo en años					Totales
		2	3	4	5	6	
En corredor	1	15 (9)	32 (18)	20 (12)	2 (1)		69 (40)
	2	8 (5)	33 (19)	18 (10)	10 (6)		69 (40)
	0			2 (1)			2 (1)
Fuera de corredor	1	3 (2)	10 (6)			1 (1)	14 (8)
	2	1 (1)	10 (6)	3 (2)			14 (8)
	0		2 (1)	3 (2)			5 (3)
<b>Totales</b>		27 (16)	87 (50)	46 (27)	12 (7)	1 (1)	173 (100)

#### 4.2 Selección de tramos para exploración detallada

Para la selección de los tramos candidatos se utilizaron los criterios indicados en el inciso 2.4, que incluyen, además de la duración de los ciclos a que se refiere la Tabla 3, aspectos como la ocurrencia de los ciclos en años recientes, la similitud de los patrones de evolución observados con los teóricos y la presencia de diferencias negativas mínimas.

Para ilustrar la validación estadística de tramos candidatos se utilizaron dos tramos cuya longitud y criterios de selección para el análisis detallado se indican en la Tabla 4. Los datos de localización de los tramos se proporcionan en los incisos 5.2 y 5.3.

Tabla 4. Tramos seleccionados para exploración detallada.

Tramo	Longitud (km)	Criterios de selección
07-FC-SC1	12.90	Duración máxima del ciclo (6 años)
52-EC-SC1	19.18	Ciclo reciente, parte de un grupo con tendencias similares (Lib. Ote. de Saltillo), tendencia parecida a la teórica, longitud

Antes de abordar el análisis estadístico de los tramos, se verificó que el tipo de pavimento (asfáltico o de concreto) no se modificara, ya que ello introduciría un elemento de heterogeneidad incompatible con la modelización del deterioro. La revisión permitió comprobar que los tramos empleados en los ejemplos tienen y han tenido pavimentos flexibles durante el periodo de análisis.

## 5 Análisis estadístico

### 5.1 Procedimiento de análisis

Como se indica en el inciso 2.4, la validación estadística de los tramos candidatos se basa esencialmente en la aplicación de la prueba t por pares con distintos niveles de agregación de los datos. Específicamente, el procedimiento comprende las siguientes tareas:

- Aplicar la prueba t por pares a las diferencias entre todos los pares de mediciones anuales consecutivas del tramo, y comparar los resultados con las medias de las diferencias calculadas según lo descrito en el inciso 4.1.
- Seleccionar un año del periodo que resulte de interés para la definición de los ciclos de deterioro y dividir el tramo en segmentos homogéneos en función del IRI recopilado ese año, mediante el algoritmo de segmentación dinámica desarrollado por el IMT.





Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

- c) Aplicar la prueba t por pares a las mediciones que corresponden a los segmentos del punto anterior.
- d) Dividir el tramo en segmentos definidos entre postes kilométricos y aplicar la prueba t a los datos de estos segmentos.

Para la aplicación de la prueba t por pares se utilizó la función t de Student de cola izquierda disponible en Excel, con un nivel de significación dado por  $p \leq 0.05$ . Los resultados se presentan también con el auxilio de mapas de calor, basados en una escala definida por los siguientes colores y valores: rojo ( $p = 0$ ), blanco ( $p = 0.05$ ) y verde ( $p = 1$ ).

Respecto al algoritmo de segmentación dinámica del IMT, cabe señalar que se trata de un procedimiento que aplica el método de diferencias acumuladas documentado en la guía de diseño de pavimentos de AASHTO de 1986 y en técnicas de procesamiento de señales [6].

## 5.2 Tramo 07-FC-SC1

Este primer tramo conecta los entronques de la carretera Querétaro - San Luis Potosí con caminos que tienen como destinos las localidades de Juriquilla y San Miguel de Allende. El tramo solo comprende la calzada que conduce a la ciudad de San Luis Potosí y no forma parte del corredor México - Nuevo Laredo, que en esta zona discurre por el Libramiento Nororiente de Querétaro.

Por lo que toca a la comparación entre los resultados de significación estadística de la prueba t por pares a nivel de tramo y los signos de las diferencias entre las medias anuales de IRI, la Tabla 5 muestra que existe una correspondencia absoluta entre ambos.

Tabla 5 Valor  $p$  y media de las diferencias, tramo 07-FC-SC1.

CadIni	CadFin	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22
15+630	28+530			1.00	0.57	0.98	1.00	1.00	0.00	0.00	0.05
				0.22	0.01	0.11	0.24	0.39	-0.38	-0.21	-0.05

De acuerdo con la misma tabla, el año 2019 podría marcar el fin de un ciclo de deterioro, de manera que se dividió el tramo en segmentos homogéneos según el IRI medido en ese año con el fin de representar la evolución de la distribución espacial de la regularidad entre 2014 y 2019. En la Tabla 6 se presentan los resultados de la aplicación de la prueba t a las mediciones correspondientes. Estos resultados indican que, si bien los pares de mediciones con diferencias negativas significativas representan apenas un tercio del total del periodo 2019 - 2022, en general se aprecia una disminución de los valores  $p$  con respecto a los años anteriores. Adicionalmente, aunque en general el mapa de segmentos homogéneos reproduce el patrón representativo del tramo completo, este mapa contiene para años previos 2019 algunas celdas con valores  $p$  menores a los de la Tabla 5 e incluso inferiores al límite de significación establecido.

Tabla 6 Valor  $p$  para segmentos homogéneos, tramo 07-FC-SC1.

CadIni	CadFin	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22
15+630	19+480			1.00	0.40	0.00	0.99	1.00	0.00	0.00	0.18
19+480	22+700			1.00	0.38	1.00	0.97	1.00	0.00	0.00	0.08
22+700	23+420			0.94	0.49	0.95	0.16	0.92	0.23	0.63	0.11
23+420	25+980			1.00	0.42	0.99	1.00	0.25	0.00	0.44	0.04
25+980	28+530			0.00	0.93	0.29	0.13	1.00	0.30	0.57	0.71

Finalmente, la Tabla 7 agrupa los valores de la prueba t por pares aplicada por segmentos definidos entre marcas de kilometraje. Si se compara este mapa con el de los segmentos homogéneos, se aprecia una mayor ocurrencia de segmentos/pares de años en los que podrían haberse realizado obras de conservación, lo que implicaría cierta reducción en el volumen útil de información.



Tabla 7 Valor  $p$  para segmentos entre postes de kilometraje, tramo 07-FC-SC1.

CadIni	CadFin	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22
15+630	16+000			0.25	0.31	0.93	0.98	0.98	0.10	0.41	0.61
16+000	17+000			1.00	0.29	0.03	0.77	0.99	0.03	0.00	0.54
17+000	18+000			0.67	0.14	0.99	0.86	1.00	0.02	0.01	0.07
18+000	19+000			1.00	0.48	0.00	0.76	1.00	0.08	0.11	0.12
19+000	20+000			1.00	0.65	0.01	0.97	1.00	0.08	0.01	0.45
20+000	21+000			0.83	0.53	1.00	0.26	1.00	0.00	0.00	0.39
21+000	22+000			0.98	0.82	0.99	0.99	1.00	0.00	0.00	0.20
22+000	23+000			0.95	0.17	0.97	0.73	1.00	0.00	0.48	0.06
23+000	24+000			0.85	0.52	1.00	0.01	1.00	0.00	0.51	0.18
24+000	25+000			0.99	0.29	0.82	1.00	0.12	0.00	0.38	0.06
25+000	26+000			1.00	0.63	0.38	0.99	0.07	0.03	0.57	0.13
26+000	27+000			1.00	0.91	0.74	0.24	0.97	0.30	0.44	0.27
27+000	28+000			0.00	0.52	0.05	0.83	0.97	0.20	0.89	0.86
28+000	28+530			0.00	0.86	0.45	0.00	0.94	0.89	0.08	0.56

### 5.3 Tramo 52-EC-SC1

Como se menciona en el inciso 0, en la selección de este tramo para el análisis detallado se utilizó como criterio la ocurrencia del ciclo de deterioro en los últimos años del periodo de medición, lo cual queda de manifiesto en la representación de las diferencias entre mediciones anuales que aparece en la Tabla 8. Los resultados de la prueba  $t$  por pares contenidos también en la tabla son nuevamente congruentes con los signos de las diferencias. El tramo está definido por el par origen - destino (Lím. edos. N. L. - Coah.) - T. der. San Antonio de las Alazanas, dentro de la calzada orientada en el sentido del cadenamiento de la autopista Puerto México - La Carbonera.

Tabla 8 Valor  $p$  y media de las diferencias, tramo 52-EC-SC1.

CadIni	CadFin	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22
205+760	224+940	0.00	1.00	0.00	1.00	0.94			0.97	1.00	1.00
		-0.49	0.38	-0.64	0.13	0.07			0.01	0.37	0.25

Los resultados de la Tabla 8 sugieren que el ciclo de deterioro podría haberse iniciado desde 2015, sin embargo, no se puede tener certeza al respecto por la ausencia de mediciones en 2018. Con todo, la cercanía de los valores  $p$  a la unidad en el periodo 2015 - 2022 podría ser un reflejo del incremento sostenido del IRI entre esos años.

En este caso, los segmentos homogéneos se obtuvieron a partir de las mediciones efectuadas en el año supuesto de inicio del ciclo, es decir, 2015. Los resultados correspondientes de aplicación de la prueba  $t$  pueden consultarse en la Tabla 9.

Tabla 9 Valor  $p$  para segmentos homogéneos, tramo 52-EC-SC1.

CadIni	CadFin	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22
205+760	211+480	0.00	1.00	0.00	1.00	0.90			0.99	1.00	0.77
211+480	223+480	0.00	1.00	0.00	1.00	0.79			0.97	1.00	1.00
223+480	224+380	0.00	1.00	0.00	0.79	0.89			0.00	1.00	0.00
224+380	224+940	0.00	0.70	0.00	0.85	0.17			0.03	1.00	0.04



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

En esta tabla puede observarse que los primeros dos segmentos homogéneos cubren la mayor parte de la longitud del tramo (17.72 de un total de 19.18 km), y que tales segmentos tendrían un patrón de deterioro similar al del tramo en su conjunto. En contraste, los resultados que corresponden a los 1.46 km finales contienen evidencia de posibles intervenciones entre 2019 - 2020 y 2021 - 2022, lo que haría prácticamente inútiles los datos del periodo para la modelización del deterioro en los segmentos finales.

En lo que concierne al mapa de valores  $p$  de la segmentación basada en las marcas de kilometraje, de acuerdo con la Tabla 10, entre los pares de años 2016 - 2017 y 2019 - 2020 se observan valores más cercanos al umbral de rechazo de la hipótesis nula, aunque la significación estadística de las diferencias negativas en los pares de años solo se verifica para el último segmento entre los mismos años indicados para el mapa de segmentos homogéneos.

Tabla 10 Valor  $p$  para segmentos fijos de 1 km, tramo 52-EC-SC1.

CadIni	CadFin	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22
205+760	206+000	0.01	0.95	0.67	0.84	0.51			0.53	0.89	0.99
206+000	207+000	0.00	1.00	0.00	0.92	0.85			0.79	1.00	0.76
207+000	208+000	0.00	1.00	0.00	0.96	0.74			0.89	0.98	0.44
208+000	209+000	0.00	1.00	0.00	1.00	0.19			0.93	0.99	0.00
209+000	210+000	0.00	1.00	0.00	0.97	0.86			1.00	0.93	0.35
210+000	211+000	0.00	1.00	0.00	1.00	0.59			1.00	0.68	0.91
211+000	212+000	0.00	0.99	0.00	1.00	0.51			0.38	0.80	0.50
212+000	213+000	0.00	1.00	0.00	1.00	0.31			1.00	1.00	0.99
213+000	214+000	0.00	0.86	0.00	0.70	0.52			0.26	1.00	1.00
214+000	215+000	0.00	0.97	0.00	0.92	0.66			0.28	0.99	1.00
215+000	216+000	0.00	0.99	0.00	0.62	0.43			0.98	1.00	1.00
216+000	217+000	0.00	1.00	0.00	0.52	0.74			0.74	0.99	1.00
217+000	218+000	0.00	0.85	0.00	0.96	0.49			0.87	0.99	0.99
218+000	219+000	0.00	0.89	0.00	0.78	0.83			0.49	0.99	0.93
219+000	220+000	0.00	1.00	0.00	1.00	0.75			0.91	0.99	1.00
220+000	221+000	0.00	1.00	0.00	0.99	0.71			0.55	0.98	1.00
221+000	222+000	0.00	1.00	0.00	0.99	0.32			0.56	1.00	0.83
222+000	223+000	0.00	1.00	0.00	0.92	0.88			0.50	0.99	0.25
223+000	224+000	0.00	1.00	0.00	0.59	0.78			0.30	0.99	0.57
224+000	224+940	0.00	0.99	0.00	0.95	0.38			0.00	1.00	0.00

En cualquier caso este ejercicio, y el anterior, muestran la conveniencia de explorar los resultados de la prueba  $t$  con el menor nivel de agregación posible de los datos.

## 6 Conclusiones y recomendaciones

- El uso de datos del programa de auscultación de la DGST en el desarrollo de modelos de deterioro presenta dos dificultades importantes: a) Almacenamiento de los datos en archivos de Excel individuales por tramo / año / aspecto evaluado; b) Carencia de un registro histórico sistematizado de trabajos de conservación. El enfoque alternativo de identificación de datos útiles constituye una opción para sortear ambas dificultades.
- Los resultados de los ejemplos muestran que los criterios de selección de tramos candidatos permiten identificar datos con un potencial de utilidad real para modelizar la evolución del IRI en ausencia de acciones de conservación adicionales al mantenimiento rutinario.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

- En algunos años del periodo cubierto por el programa de auscultación no se realizaron mediciones, lo que representa una dificultad adicional a las ya citadas. Sin embargo, como se desprende del segundo ejemplo, existen casos en que la tendencia de los datos muestra que los tramos con datos faltantes aun podrían ser de utilidad para el desarrollo de los modelos. Para tener mayor certeza respecto a tal utilidad, sería conveniente encontrar algún mecanismo que permitiera confirmar la homogeneidad de esta tendencia.
- En general, se observa que la aplicación de la prueba t con menores niveles de agregación revela mayores detalles respecto a la utilidad de la información, de modo que se recomienda utilizar un nivel relativamente menor que, a la vez, tenga un sentido práctico con respecto a las tareas de evaluación y conservación de pavimentos. En este sentido, parece adecuado utilizar segmentos con una longitud de 1 km.
- Se recomienda continuar con el desarrollo y validación del enfoque de acuerdo con lo planteado en el inciso 2.4, a fin de contar con una opción viable para el acopio de datos destinados al desarrollo de modelos de deterioro empíricos a nivel de red apropiados para los pavimentos de la red federal de carreteras.

## 7 Referencias

- [1] FHWA, *Pavement Management Systems*, s. l.: Federal Highway Administration (FHWA), 1998.
- [2] R. Solorio, J. C. Toral y R. Soto, «Estado actual en el desarrollo de modelos de deterioro de pavimentos. Publicación técnica no. 739,» Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, 2023.
- [3] R. Solorio, «Aplicación de Cadenas de Márkov para modelizar la evolución del IRI en la red federal de carretera,» UACH, Chihuahua, Chih., 2018.
- [4] R. Solorio, M. Montoya y P. Garnica, «Proyecto no. IE 18/19: Análisis sobre el estado de la red federal de carreteras recopilada en el periodo 2012-2018,» Instituto Mexicano del Transporte, San Fandila, Qro., 2020.
- [5] R. Solorio y N. Ruiz, «Generación de archivos de auscultación por tramo a partir de una base de datos relacional. Publicación técnica no.735,» Querétaro, Qro., 2023-2.
- [6] C. Gorrostieta, R. Solorio y R. Hernández, «Algoritmo para la segmentación de carreteras con base en parámetros de respuesta del pavimento: Informe interno,» Instituto Mexicano del Transporte, San Fandila, Qro., 2008.
- [7] SCT, «Programa de auscultación de la red carretera federal: memoria documental, DGST,» Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Ciudad de México, 2018.
- [8] SICT, «Datos viales 2023,» 4 Enero 2024. <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/datos-viales/2023/>.