

ANÁLISIS DEL DETERIORO ESTRUCTURAL EN PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE MODELOS MULTICAPA, REDES NEURONALES SUSTITUTAS Y SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

Fernando Trejo¹, Carlos Chávez²

¹ PavAnalyzer, Pachuca, México, contacto@pavanalyzer.com

² Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Morelia, México, cachavez@umich.mx

Resumen

El diseño mecanicista de pavimentos suele transformar el tránsito mixto en un eje equivalente y analizar una estructura nominal como si sus espesores, módulos y condiciones de construcción fueran constantes. En la práctica, el pavimento recibe combinaciones distintas de cargas y presenta variaciones inevitables, por lo que una sola vida calculada no describe completamente su desempeño.

Este trabajo desarrolla una metodología mecanicista-probabilística con orquestación agéntica, estructurada mediante el Marco de Estados Mecánicos del Pavimento (MEMP). El proceso inicia con registros de pesaje y aforo, que se clasifican por configuración de eje y se convierten en firmas de carga, conservando su magnitud, geometría y frecuencia. Cada firma se transforma en una solicitud física y se relaciona con la estructura, el punto evaluado y la respuesta obtenida.

Las respuestas mecánicas se calculan con PavAnalyzer, un programa multicapa desarrollado por los autores a partir de la teoría de Burmister y contrastado con KENLAYER y soluciones analíticas. Con sus resultados se construyó el conjunto de datos utilizado para entrenar una red neuronal sustituta. La red acelera las consultas dentro de su dominio; cuando un caso queda fuera, el análisis regresa al programa. Las respuestas unitarias se escalan y superponen para reconstruir los ejes completos y calcular posteriormente el deterioro acumulado.

La simulación de Monte Carlo incorpora variaciones de espesores, módulos y tránsito para generar distribuciones de vida y riesgo. El flujo agéntico organiza los datos, selecciona las herramientas numéricas adecuadas y audita cada etapa sin sustituir los modelos físicos. A partir de esta cadena pueden compararse alternativas, estimar la probabilidad de alcanzar la vida requerida, identificar el mecanismo gobernante, reconocer las configuraciones más dañinas y determinar qué variables influyen más en la incertidumbre. Un caso aplicado verifica el funcionamiento integral de la metodología.

Palabras Clave: pavimentos flexibles; espectros de carga; redes neuronales sustitutas; análisis probabilístico.

1 Introducción

En el diseño de pavimentos se estima la vida útil de una estructura en años, aunque su desempeño real puede diferir de lo previsto. El tránsito, los materiales y la construcción presentan variaciones que dificultan conocer con certeza cuándo se alcanzará una condición de falla. Cuando el deterioro aparece antes de lo programado, también deben adelantarse las intervenciones de conservación, lo que obliga a reasignar recursos y dificulta la planeación del presupuesto. Por ello, además de estimar una vida útil, resulta necesario determinar la probabilidad de que el pavimento alcance el periodo de servicio esperado.

Los métodos tradicionales suelen transformar el tránsito mixto en repeticiones de un eje estándar y analizar una estructura definida mediante espesores y módulos nominales [1]. Esta simplificación ha permitido desarrollar procedimientos prácticos de diseño, pero reduce la información disponible cuando se cuenta con registros de peso por eje.

A esta variabilidad se suma la incertidumbre propia de la estructura. Los espesores construidos, la compactación, las propiedades mecánicas de los materiales y las cargas que actuarán durante el periodo de servicio pueden diferir de los valores considerados en el diseño. Por ello, no resulta sencillo establecer una sola vida útil, ya que el desempeño depende de la interacción de un gran número de variables que

cambian a lo largo del tiempo. La vida de un pavimento debe entenderse entonces como un problema probabilístico y no únicamente determinista. En lugar de obtener una fecha exacta de falla, es más conveniente estimar un intervalo de vidas posibles y la probabilidad de alcanzar un límite de desempeño en cada año. Cuanto mejor se caractericen las variables que controlan el deterioro, menor será la incertidumbre y será posible identificar, controlar y mitigar los riesgos antes de que afecten el desempeño de la estructura.

Los espectros de carga permiten representar con mayor detalle las configuraciones y magnitudes observadas. Sin embargo, cada grupo de carga debe analizarse con su geometría, frecuencia y posición, y este procedimiento debe repetirse para numerosas combinaciones de espesores y módulos. Aunque la teoría elástica multicapa permite calcular las respuestas necesarias [2,3], su aplicación directa dentro de miles de escenarios probabilísticos representa un costo computacional elevado.

Este trabajo integra los datos de tránsito, el análisis multicapa, una red neuronal sustituta y la simulación de Monte Carlo dentro de una metodología mecanicista-probabilística con orquestación agéntica. La información se organiza mediante el Marco de Estados Mecánicos del Pavimento (MEMP), que conserva la relación entre la solicitud, la estructura, el punto evaluado y la respuesta obtenida. El objetivo es transformar la variabilidad del tránsito y de la estructura en distribuciones de vida y probabilidades de falla que permitan comparar alternativas, identificar los factores que controlan el deterioro y respaldar una planeación más informada de las intervenciones de conservación.

2 Marco de estados mecánicos del pavimento

El Marco de Estados Mecánicos del Pavimento (MEMP) es una estructura multidimensional, indexada y dispersa, que relaciona las solicitudes, las condiciones estructurales, los puntos de evaluación y las respuestas mecánicas. Su componente numérica puede interpretarse como un tensor de respuestas, mientras que las propiedades de las cargas, las capas y la procedencia de los cálculos se conservan como bloques asociados a sus índices.

En términos sencillos, el MEMP funciona como una biblioteca de estados mecánicos. Cada estado relaciona una carga, una estructura y un punto de evaluación con los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos obtenidos. Esta organización permite localizar, comparar y reutilizar resultados sin repetir cálculos que ya fueron realizados.

El MEMP no sustituye al modelo elástico multicapa ni a las ecuaciones de deterioro. Su función es organizar las respuestas obtenidas mediante PavAnalyzer o la red neuronal, conservar su procedencia y permitir que puedan reutilizarse cuando cambian las repeticiones del tránsito, el periodo de análisis o los criterios de deterioro. De esta manera, el cálculo mecánico permanece separado de la acumulación del daño, pero ambos conservan una relación trazable.

2.1 Definición del estado mecánico

Cada estado se representa mediante cuatro bloques:

$$\mathcal{E}_{bkj} = \{L_b, S_k, X_j, R_{bkj}\} \quad (1)$$

Donde $\mathcal{E}_{bkj}$ representa el estado mecánico completo del pavimento producido por la solicitud b , sobre la condición estructural k , en el punto de evaluación j . Debido a que reúne variables de distinta naturaleza, $\mathcal{E}_{bkj}$ no posee una unidad única. El bloque L_b describe la configuración del eje, la carga en toneladas, la presión de contacto en MPa, y el radio y la posición de los neumáticos en centímetros. El bloque S_k contiene el número de capas, sus espesores en centímetros, módulos elásticos en MPa y relaciones de Poisson. El bloque X_j identifica las coordenadas y la profundidad de evaluación en centímetros, mientras que R_{bkj} reúne los esfuerzos en MPa, las deformaciones unitarias y los desplazamientos en centímetros.

La frecuencia observada de cada carga se mantiene asociada con la solicitud, pero no interviene en la solución mecánica. Primero se determina qué respuesta produce una carga y , posteriormente, se incorpora cuántas veces actúa durante el periodo analizado.

2.2 Organización, reutilización y trazabilidad

Cada estado conserva qué carga actuó, sobre qué estructura, en qué punto y qué respuesta produjo. También puede registrar el método utilizado, la versión del programa o de la red neuronal y la procedencia de los datos. Esta organización evita reducir desde el inicio el comportamiento del pavimento a una sola deformación crítica y permite recuperar otras componentes cuando sean necesarias.

El MEMP se construye de manera incremental. Cuando una combinación ya fue calculada, su respuesta puede reutilizarse; únicamente se generan los estados que aún no existen o que cambian debido a una nueva carga, estructura o posición. Por ejemplo, si se modifica el aforo o el periodo de análisis, pero se mantiene la estructura, no es necesario volver a resolver la mecánica: se actualizan las repeticiones y se recalcula el deterioro.

Esta separación permite utilizar los mismos estados para entrenar modelos sustitutos, comparar la red neuronal con el programa multicapa y proporcionar al flujo agéntico una estructura común para consultar resultados o solicitar nuevos cálculos. Los agentes coordinan el acceso a la información, pero las respuestas numéricas permanecen a cargo de las herramientas físicas y probabilísticas.

2.3 Del estado mecánico al deterioro

A partir de las respuestas almacenadas se identifican las deformaciones asociadas con cada mecanismo. Las repeticiones admisibles por fatiga de la carpeta y por deformación permanente sobre la subrasante se calcularon con los modelos del Asphalt Institute [4]:

$$N_f = f_1 |\varepsilon_t|^{-f_2} E_{AC}^{-f_3} \quad (2)$$

$$N_d = f_4 \varepsilon_z^{-f_5} \quad (3)$$

En (2) y (3), N_f y N_d son las repeticiones admisibles, para fatiga y deformación permanente respectivamente; ε_t es la deformación horizontal de tensión en la base de la carpeta; ε_z es la magnitud de la deformación vertical de compresión sobre la subrasante; y E_{AC} es el módulo de la carpeta expresado en kilopascasles. Se utilizaron $f_1=0.414$, $f_2=3.291$, $f_3=0.854$, $f_4=1.365 \times 10^{-9}$ y $f_5=4.477$.

El daño de cada mecanismo se acumuló mediante la regla de Miner [5]:

$$D_m = \sum_{b=1}^B \frac{n_b}{N_{bm}} \quad (4)$$

En (4), n_b es el número proyectado de repeticiones de la carga b , N_{bm} es la capacidad admisible para el mecanismo m y D_m es el daño acumulado. El límite de desempeño se alcanza cuando $D_m \geq 1$.

Al mantener separadas la respuesta mecánica y la ecuación de deterioro, los mismos estados pueden analizarse con diferentes modelos, espectros o periodos sin perder la trazabilidad desde cada configuración de eje hasta su contribución al daño. De esta manera, el MEMP funciona como el vínculo entre el tránsito, el programa multicapa, la red neuronal y la simulación probabilística.

3 Generación acelerada de estados mecánicos

La construcción del Marco de Estados Mecánicos del Pavimento requiere calcular la respuesta de numerosas combinaciones de estructuras, solicitaciones y puntos de evaluación. Este volumen crece cuando se utilizan espectros detallados y se incorporan variaciones de espesores y módulos mediante simulación de Monte Carlo. Aunque el programa multicapa desarrollado por los autores permite resolver cada condición, su ejecución directa para millones de estados representa un costo computacional elevado. Por ello, se utilizó el programa para generar soluciones de referencia y entrenar una red neuronal sustituta capaz de aproximarlas con mayor rapidez [6, 7].

3.1 Programa multicapa PavAnalyzer y contraste con KENLAYER

Los estados de referencia se generaron mediante un programa elástico multicapa desarrollado por los autores e implementado originalmente en PavAnalyzer [6]. El modelo se basa en la teoría de Burmister [2,3] y representa el pavimento mediante capas horizontales, homogéneas, isótropas y linealmente elásticas, adheridas entre sí y apoyadas sobre una subrasante semiinfinita. Cada neumático se modela como una presión uniforme aplicada sobre una huella circular.

Antes de utilizarlo para generar los datos de entrenamiento, el programa se contrastó con KENLAYER en 24 estructuras y 1185 pares subsuperficiales por respuesta. Para σ_z/q , σ_r/q y wE_N/qa , los coeficientes de determinación fueron mayores que 0.999995 y el error absoluto medio normalizado por el pico (MAE/pico) permaneció entre 0.0014 % y 0.0214 %. La Figura 1 muestra esta concordancia.

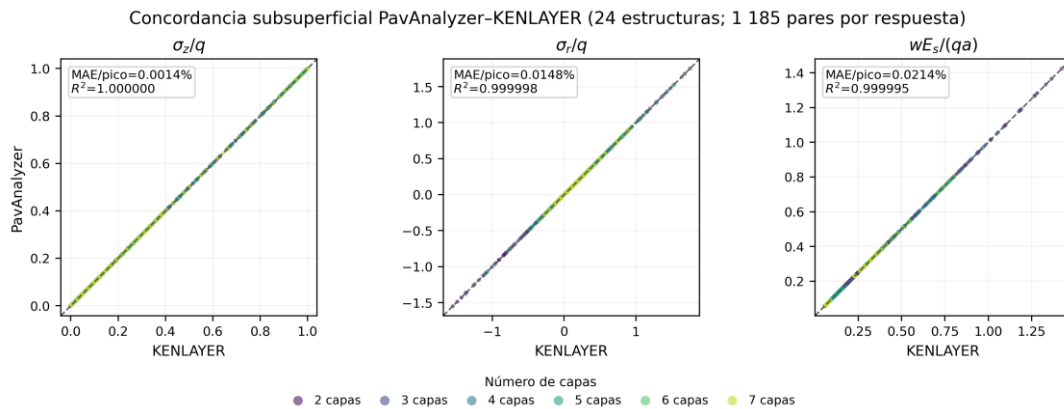


Figura 1. Concordancia subsuperficial entre PavAnalyzer y KENLAYER en 24 estructuras; la línea discontinua representa la igualdad.

La verificación en la superficie mostró una diferencia clara entre ambos programas. Para una carga circular uniforme aplicada sobre un semiespacio con relación de Poisson de 0,35, la solución analítica de Boussinesq establece un esfuerzo horizontal normalizado de 0,850 bajo el centro de la carga. PavAnalyzer reprodujo este valor exacto, con un error prácticamente nulo. En cambio, KENLAYER obtuvo aproximadamente 0,907, lo que representa una sobreestimación de 6,7 %. Por tanto, PavAnalyzer presentó mayor exactitud que KENLAYER para la evaluación de este punto superficial. Como comprobación adicional, las deformaciones calculadas mediante derivación numérica coincidieron con las obtenidas a partir de los esfuerzos, con diferencias del orden de 10^{-10} .

3.2 Formulación adimensional y generación del conjunto de datos

Para que una misma solución pudiera representar diferentes radios, presiones y niveles de rigidez, las entradas y respuestas se expresaron mediante las relaciones adimensionales de (5):

$$\left(\frac{\sigma}{q}, \frac{\tau}{q}, \frac{wE_N}{qa}\right) = F\left(\frac{r}{a}, \frac{z}{a}, \frac{h_i}{a}, \frac{E_i}{E_N}, \nu_i\right) \quad (5)$$

En (5), σ y τ son los esfuerzos normal y cortante, expresados en MPa; w es el desplazamiento vertical; r y z son la coordenada radial y la profundidad; h_i , E_i y ν_i son el espesor, el módulo elástico y la relación de Poisson de la capa i ; a es el radio de contacto; q es la presión aplicada; y E_N es el módulo de la subrasante. Todas las relaciones de (5) son adimensionales, por lo que no dependen de un sistema de unidades específico, siempre que los esfuerzos, presiones y módulos se expresen en una misma unidad y todas las longitudes utilicen una unidad común. La solución puede escalarse a otras condiciones físicas siempre que las relaciones permanezcan dentro del dominio considerado.

Se generaron 11994 estructuras de dos a siete capas mediante una secuencia cuasialeatoria de Sobol. El muestreo incluyó relaciones modulares E_i/E_N entre aproximadamente 1.3 y 200, espesores relativos h_i/a cercanos al intervalo 0.3-3.0 y relaciones de Poisson entre 0.20 y 0.50. Las coordenadas abarcaron r/a de 0 a 28 y z/a de 0 a 15, con mayor densidad cerca del borde de la huella y de las interfaces.

El conjunto final quedó integrado por 26,154,602 estados mecánicos, generados a partir de 11,994 estructuras de dos a siete capas. Cada estado contiene la descripción adimensional de la estructura, la posición evaluada y las cinco respuestas calculadas por el programa multicapa. Como una misma estructura genera numerosos estados en diferentes posiciones y profundidades, la división se realizó por estructuras completas y no por estados individuales.

Las estructuras se dividieron en 8,395 para entrenamiento (70 %), 1,799 para validación (15 %) y 1,800 para prueba independiente (15 %). La separación se hizo por estructuras completas para impedir que sus puntos aparecieran en más de una partición. Los intervalos de generación definieron la puerta de dominio: los casos externos regresan al programa multicapa.

3.3 Representación, entrenamiento y evaluación de la red

Cada capa se representó mediante un token numérico que conserva su rigidez, espesor, relación de Poisson y posición dentro del pavimento. El término token designa aquí una unidad mecánica de entrada, no una palabra.

El token correspondiente a la capa i se definió como:

$$\mathbf{t}_i = \left[\frac{E_i}{E_N}, \frac{h_i}{a}, \nu_i, p_i \right] \quad (6)$$

Donde E_i/E_N es la rigidez relativa, h_i/a el espesor relativo, ν_i la relación de Poisson y p_i la posición de la capa.

Las estructuras de dos a siete capas se completaron con posiciones neutras y una máscara para ignorarlas. La atención combina los tokens activos y aprende la influencia conjunta del orden y las propiedades de las capas.

La arquitectura contiene tres bloques de atención, dimensión interna de 224 y ocho cabezas. Los tokens se combinan con r/a y z/a para estimar cinco respuestas adimensionales. El tránsito, la geometría de los ejes, la superposición de neumáticos y el deterioro permanecen fuera de la red [8].

El desempeño se midió mediante la raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE, por sus siglas en inglés), definida en (7); los resultados se resumen en la Tabla 1:

$$\text{NRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}}{\max |y_i|} \times 100 \quad (7)$$

En (7), y_i es la respuesta del programa, $\hat{y}_i$ es la predicción de la red, n es el número de estados evaluados y $\max |y_i|$ es la magnitud máxima de la respuesta de referencia.

Tabla 1. Desempeño de la red en el conjunto independiente de prueba.

Respuesta mecánica	Error normalizado (%)
σ_z/q	0.131
σ_r/q	0.066
σ_θ/q	0.055
τ_{rz}/q	0.043
$wE_n/(qa)$	0.032

Como muestra la Tabla 1, los errores fueron inferiores a 0,14 % en las cinco respuestas. La red se utiliza exclusivamente dentro del dominio representado por el conjunto de entrenamiento; los casos externos se resuelven directamente mediante el programa multicapa.

Además de la precisión, se evaluó la ganancia de velocidad. En el mismo procesador, el programa multicapa resolvió 87.37 estados por segundo, mientras que la red alcanzó 1,772.70 estados por segundo, por lo que fue 20.29 veces más rápida en una unidad central de procesamiento (CPU). En una unidad de

procesamiento gráfico (GPU) NVIDIA Tesla T4 procesó 81,323 estados por segundo, equivalente a aproximadamente 931 veces el rendimiento del programa ejecutado en un solo núcleo. Debido a que la prueba en GPU se realizó en una plataforma distinta, este último factor se presenta como referencia de capacidad y no como una comparación controlada. Esta aceleración permite realizar las miles de evaluaciones necesarias para la simulación de Monte Carlo en tiempos prácticos.

3.4 Reconstrucción de las configuraciones de eje

La red neuronal calcula la respuesta producida por una huella circular individual. Para formar las configuraciones reales se adoptaron como referencia las separaciones propuestas por Huang [2]: 34.3 cm entre neumáticos duales y 121.9 cm entre ejes consecutivos de configuraciones tándem y trídem. Estos valores no constituyen una limitación del procedimiento y pueden sustituirse cuando se dispone de mediciones específicas de los vehículos o de las huellas de contacto.

La respuesta completa se obtiene mediante:

$$\mathbf{R}(x, y, z) = \sum_{m=1}^M q_m \bar{\mathbf{R}}\left(\frac{x - x_m}{a_m}, \frac{y - y_m}{a_m}, \frac{z}{a_m}\right) \quad (8)$$

En donde q_m es la presión dada en MPa; a_m y el radio de contacto, en centímetros; (x_m, y_m) , la posición del neumático, en centímetro; M es el número de neumáticos y $\bar{\mathbf{R}}$ es la respuesta adimensional unitaria de la red. Para cada neumático se recupera la respuesta física, se transforma al sistema global y se suma con las demás contribuciones. Así se reconstruyen ejes sencillos, duales, tándem y trídem antes de localizar los puntos críticos. Para la deflexión se aplica además el escalado con a_m y el módulo de referencia. Al modelar medio eje, la carga por neumático sigue calculándose con el eje físico completo.

Las consultas de cada neumático, punto y estructura son independientes y pueden organizarse en grandes lotes. Debido a que la red realiza principalmente multiplicaciones matriciales, una unidad de procesamiento gráfico puede ejecutar muchas de estas operaciones en paralelo. Posteriormente, la superposición física se realiza de forma explícita, lo que permite acelerar el análisis sin hacer que la red aprenda la geometría de los ejes.

4 Flujo de trabajo agéntico

Una vez disponibles el Marco de Estados Mecánicos del Pavimento, el programa multicapa y la red neuronal, el problema deja de ser únicamente numérico: también es necesario decidir qué información consultar, qué resultados pueden reutilizarse, qué herramienta debe ejecutar cada cálculo y si las condiciones del análisis son válidas. Para coordinar estas decisiones se implementó un sistema agéntico híbrido, en el que un agente orquestador asigna tareas a especialistas, mientras que el orden de las etapas críticas permanece controlado mediante código [9, 10].

4.1 Selección de datos y herramientas

El flujo inicia con la recuperación de la estructura, los espectros de carga, los aforos, el periodo de análisis y las versiones de los modelos utilizados. Esta información se normaliza y se vincula con su fuente, fecha y unidades antes de enviarse a los módulos de cálculo.

Para cada combinación de carga, estructura y punto de evaluación, el agente mecánico consulta primero el MEMP. Si el estado ya existe y fue generado con versiones compatibles, se reutiliza. Cuando el estado no está almacenado, el sistema verifica si la estructura se encuentra dentro del dominio de la red neuronal. Los casos válidos se calculan con la red; aquellos que quedan fuera de sus intervalos regresan al programa multicapa. Posteriormente se reconstruye la geometría de los ejes, se superponen las respuestas de los neumáticos y se determinan las respuestas necesarias para evaluar el deterioro.

El agente probabilístico recibe únicamente estados mecánicos validados. A partir de ellos aplica los modelos de deterioro, proyecta las repeticiones del tránsito y ejecuta las realizaciones de Monte Carlo para obtener distribuciones de daño, vida y probabilidad de falla. Los agentes seleccionan y coordinan las herramientas, pero los valores numéricos son producidos por funciones deterministas.

4.2 Auditoría y trazabilidad

El flujo se ejecuta mediante un ciclo agéntico de verificación, corrección y nueva ejecución. Este planteamiento retoma el esquema de trabajo prolongado con memoria persistente, criterios cuantificables y una implementación de referencia descrito para cómputo científico por Mishra-Sharma [11]. Después de cada etapa, el agente auditor verifica la correspondencia entre las fuentes de tránsito, la consistencia de unidades, la conservación de la carga, el dominio de la red, el tratamiento de los casos enviados al programa multicapa, la acumulación de repeticiones y la integridad de las realizaciones probabilísticas.

Cuando alguna comprobación no se satisface, el agente identifica la etapa que originó la inconsistencia y selecciona una acción dentro de reglas preestablecidas. Puede reconstruir los grupos de ejes, corregir una conversión autorizada, repetir una realización incompleta o enviar a PavAnalyzer los casos que se encuentran fuera del dominio neuronal. Después de la corrección se repite únicamente la etapa afectada y se realiza una nueva auditoría. El estado se guarda después de cada iteración, por lo que una ejecución interrumpida puede continuar desde el último punto terminado.

Los casos resueltos por PavAnalyzer se documentan con sus variables estructurales, razones de exclusión, versiones y archivos de respuesta, y forman un banco para una siguiente etapa de entrenamiento. No se incorporan directamente a la red vigente: primero se eliminan duplicados, se seleccionan estructuras que amplían el dominio, se generan nuevos campos adimensionales y se realiza una partición independiente para entrenamiento, validación y prueba. El ciclo termina cuando todas las comprobaciones cumplen las tolerancias. Si falta información original o una decisión no cuenta con una regla autorizada, se genera un reporte de excepción y no una conclusión sin respaldo. Cada iteración conserva las entradas, la corrección, la semilla y las versiones del programa y de la red. La Figura 2 resume la consulta de estados y la evaluación probabilística.

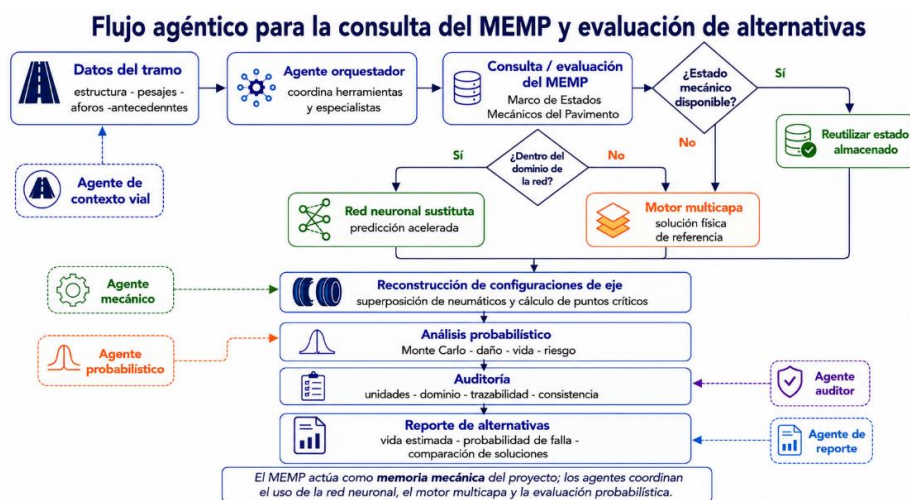


Figura 2. Consulta del marco mecánico y evaluación probabilística.

5 Caso de aplicación

La metodología se verificó mediante un caso aplicado que combina registros reales de pesaje con información actualizada de aforo. El propósito no fue diagnosticar la condición actual de la vialidad, ya que no se contó con una auscultación completa de su estructura, sino demostrar cómo los datos de tránsito pueden transformarse en espectros de carga y utilizarse para estimar distribuciones de daño, vida y probabilidad de falla.

5.1 De los registros de pesaje a los espectros de carga

Se utilizaron los registros del estudio de origen-destino y pesaje realizado en la Plaza de Cobro Palmillas del 30 de julio al 2 de agosto de 2013. Los datos se separaron por dirección de circulación y se seleccionó el sentido 2, correspondiente al tránsito de Querétaro hacia la Ciudad de México, por presentar el mayor volumen de vehículos pesados y la mayor carga acumulada observada [12].

Cada vehículo se descompuso en los grupos de carga que actúan sobre el pavimento. Estos se clasificaron como eje sencillo con rueda simple, eje sencillo con rueda dual, eje tándem o eje trídem. Después de eliminar pesos faltantes, valores no positivos y registros que no podían asociarse de manera confiable con una configuración, se conservaron 99,426 grupos de ejes válidos.

Las cargas se discretizaron con una resolución de 0.1 toneladas. Se definió como combinación única de carga a cada conjunto formado por el tipo de eje y las cargas discretizadas de sus componentes. De esta manera, los registros repetidos se agruparon sin perder su frecuencia, mientras que los ejes tándem y trídem con cargas desiguales conservaron el valor correspondiente a cada componente. Los 99,426 grupos de ejes observados quedaron representados mediante 6,332 combinaciones únicas de carga: 139 de ejes sencillos, 151 de sencillos duales, 4,917 de tándem y 1,125 de trídem. La Tabla 2 resume las combinaciones obtenidas para el sentido seleccionado.

Tabla 2. Resumen de las combinaciones de carga del sentido 2.

Configuración	Combinaciones	Grupos	Mediana (t)	P95 (t)
Sencillo simple	139	33,670	4.1	6.8
Sencillo dual	151	7,306	5.4	11.0
Tándem	4,917	56,679	13.8	22.1
Trídem	1,125	1,771	23.8	32.8
Total	6332	99426	—	—

La Figura 3 compara la distribución de la carga total observada para cada configuración de eje.

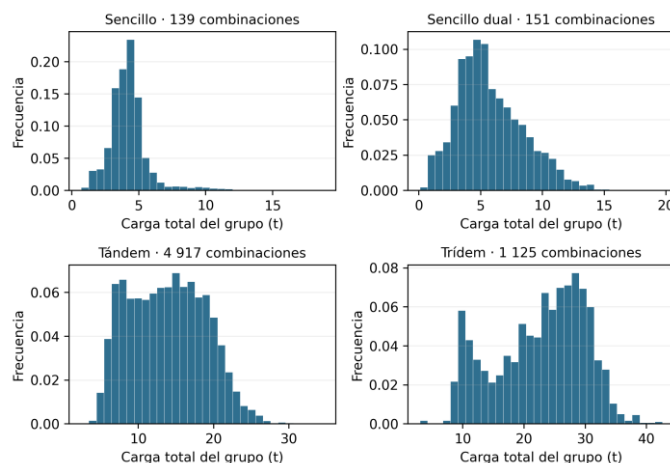


Figura 3. Distribución de la carga total observada por configuración de eje.

Esta transformación conserva la frecuencia y la magnitud observadas. Por tanto, el análisis no depende de una carga media o de la carga máxima, sino del efecto acumulado de todas las combinaciones de carga presentes en el espectro.

5.2 Proyección de las repeticiones

El estudio de pesaje proporciona la distribución de las cargas, pero cubre únicamente cuatro días. Para estimar las repeticiones futuras, esta información se combinó con los datos viales publicados por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [13].

El tránsito diario promedio anual de ambos sentidos pasó de 34583 vehículos en 2013 a 41186 en 2025, equivalente a una tasa media anual de crecimiento de 1.4668 %. Para 2026 se estimaron aproximadamente 23350 vehículos diarios en el sentido analizado. Después de considerar la distribución direccional, la composición vehicular y un factor de utilización del carril de diseño de 0.70, se obtuvieron aproximadamente 7.67 millones de grupos de ejes para 2026 y 176.88 millones acumulados entre 2026 y 2045.

Las distribuciones de peso observadas en 2013 se conservaron y únicamente se actualizaron las repeticiones. Este cruce de fuentes permite construir el caso aplicado, pero no equivale a disponer de pesaje continuo: la muestra describe la variación observada durante cuatro días, pero no permite representar por completo la estacionalidad anual.

5.3 Estructura analizada y variables inciertas

Se adoptó una estructura representativa formada por una carpeta asfáltica de 20 cm, una base de 30 cm, una subbase de 30 cm y una subrasante semiinfinita. Los módulos nominales, expresados en megapascals (MPa), fueron de 8,000, 385, 200 y 70, respectivamente.

La estructura se utilizó como escenario de demostración y no como una reconstrucción de la vialidad existente. Para representar posibles variaciones constructivas, los espesores se modelaron mediante distribuciones normales truncadas y los módulos mediante distribuciones lognormales. El coeficiente de variación (CV) expresa la dispersión relativa adoptada para los módulos. La Tabla 3 reúne los valores nominales y las distribuciones utilizadas.

Tabla 3. Estructura base y variables consideradas.

Capa	Valor nominal	Variación utilizada	v
Carpeta asfáltica	h=20 cm; E=8 000 MPa	h: normal truncada, $\sigma=1$ cm, 17–23 cm; E: lognormal, CV=10 %	0.30
Base	h=30 cm; E=385 MPa	h: normal truncada, $\sigma=1.5$ cm, 25.5–34.5 cm; E: lognormal, CV=20 %	0.35
Subbase	h=30 cm; E=200 MPa	h: normal truncada, $\sigma=1.5$ cm, 25.5–34.5 cm; E: lognormal, CV=20 %	0.35
Subrasante	E=70 MPa	E: lognormal, CV=25 %	0.40

Estas distribuciones representan supuestos para verificar la metodología. En una aplicación de diseño o seguimiento deben sustituirse por resultados de control de calidad, sondeos y ensayos realizados en el tramo.

5.4 Simulación probabilística

Se generaron 5000 realizaciones con una misma semilla aleatoria. Cada realización representa una posible combinación de espesores, módulos y condiciones de tránsito. Para cada estructura se consultó el Marco de Estados Mecánicos del Pavimento; los estados faltantes se obtuvieron con la red neuronal dentro de su dominio o con el programa multicapa cuando la estructura quedó fuera de él.

Se analizaron tres escenarios pareados: C, variabilidad de construcción con tránsito fijo; CT, construcción y remuestreo de los cuatro conteos diarios de tránsito pesado; y CTG, que añadió la variación de la tasa futura de crecimiento.

La fatiga se evaluó con la deformación horizontal de tensión en la base de la carpeta y la deformación permanente con la deformación vertical de compresión sobre la subrasante. Las capacidades y el daño se calcularon con (2)-(4), y el límite se alcanzó cuando $D_m \geq 1$. Se obtuvieron distribuciones de vida y daño, riesgo anual, mecanismo gobernante, contribución por eje y sensibilidad.

6 Resultados e implicaciones para la toma de decisiones

Las 5000 realizaciones sustituyeron la vida única por una distribución de desempeños posibles. De estas, 4091 estructuras, equivalentes a 81.82 %, se encontraron dentro del dominio de la red neuronal, mientras que 909, correspondientes a 18.18 %, fueron enviadas a PavAnalyzer para evitar extrapolaciones sin respaldo.

6.1 Tiempo de cálculo y funcionamiento del esquema híbrido

La ejecución completa requirió 172.10 s. La red neuronal resolvió sus casos en 6.32 s, equivalentes a 3.67 % del tiempo total. PavAnalyzer empleó 143.43 s en resolver los casos fuera del dominio y concentró 83.34 % del tiempo. Los 22.35 s restantes correspondieron, en conjunto, a la preparación de los datos, las transferencias, la reconstrucción de los ejes, la evaluación del deterioro y la escritura de resultados.

Esta separación muestra que la red permitió resolver rápidamente la mayor parte de las estructuras, mientras que PavAnalyzer mantuvo la solución física de referencia en las regiones donde la red todavía no cuenta con suficiente información. Los 909 casos externos también identifican dónde conviene ampliar el conjunto de entrenamiento. Por tanto, el resultado no solamente demuestra una reducción del tiempo: establece un procedimiento para acelerar el análisis sin aceptar predicciones fuera del dominio conocido.

6.2 Vida probable, riesgo y ventana de conservación

En el escenario que incorporó variabilidad constructiva, remuestreo de los cuatro días de tránsito y variación del crecimiento futuro, las vidas P05, P50 y P95 fueron de 5, 8 y 13 años. El P05 representa las combinaciones desfavorables que podrían alcanzar primero el límite de desempeño; el P50 indica que la mitad de las realizaciones lo habría alcanzado alrededor del octavo año; y el P95 representa las condiciones más favorables. Esto confirma que no existe una sola vida esperada, sino un intervalo condicionado por el tránsito y la calidad de la estructura construida.

La probabilidad de falla no representa el colapso repentino de la vialidad. Expresa la proporción de realizaciones en las que el daño acumulado alcanzó $D \geq 1$. Esta probabilidad superó 10 % en 2031, 25% en 2032, 50% en 2033 y 90% en 2037. En términos de gestión, estos resultados proponen 2030–2032 como una ventana para intensificar la auscultación, verificar espesores y capacidad estructural, reservar presupuesto y preparar un proyecto de intervención. Si las mediciones de campo confirman la tendencia, la actuación debería encontrarse programada antes de que el riesgo supere 50 %.

Estos niveles son indicadores para la planeación y no umbrales normativos. Como la estructura analizada es representativa, las fechas deben actualizarse con información real del tramo antes de tomar una decisión de inversión.

6.3 Mecanismo gobernante y variables controlables

La fatiga gobernó 99.38 % de las realizaciones. Esto orienta la inspección hacia el agrietamiento estructural y la verificación de la respuesta de la carpeta, en lugar de limitar el seguimiento a la deformación superficial. El eje tandem aportó 58.60 % del daño por fatiga y 84.73 % del daño por deformación permanente. Su importancia se debe a la combinación entre frecuencia y severidad, por lo que el control del tránsito debe considerar tanto el peso como la configuración de los ejes.

Las variables con mayor asociación con el daño fueron el espesor de la carpeta (-0.623), el módulo de la base (-0.514), el módulo de la carpeta (-0.378) y el crecimiento futuro del tránsito (0.338). Los signos negativos indican que mejores espesores o propiedades mecánicas reducen el daño, mientras que un mayor crecimiento del tránsito lo incrementa. En consecuencia, constructor y supervisor pueden reducir el riesgo mediante el control de espesores, compactación y calidad mecánica; gobierno o concesionaria pueden hacerlo mediante pesaje continuo, actualización de aforos y programación anticipada de la conservación. La Tabla 4 resume la utilidad de los principales resultados para la gestión.

Tabla 4. Resultados e implicaciones para la gestión del caso aplicado.

Indicador	Resultado	Utilidad para la decisión
Resolución híbrida	4091 con la red; 909 con PavAnalyzer	Acelera el análisis sin extrapolar fuera del dominio neuronal.
Tiempo de cálculo	6.32 s red; 143.43 s PavAnalyzer; 22.35 s resto del flujo	Identifica los casos externos al dominio como la principal oportunidad de optimización.
Vida P05/P50/P95	5/8/13 años	Sustituye una fecha única por una ventana de desempeño.
Probabilidad de falla > 50 %	2033	Permite anticipar auscultación, proyecto, presupuesto e intervención.
Mecanismo gobernante	Fatiga: 99.38 %	Orienta la inspección y el control de calidad hacia la carpeta.
Configuración dominante	Eje tándem	Justifica reforzar el pesaje y analizar la composición del tránsito.

La Figura 4 integra la distribución de la vida, la evolución anual del riesgo, la contribución por configuración de eje y las variables de mayor influencia.

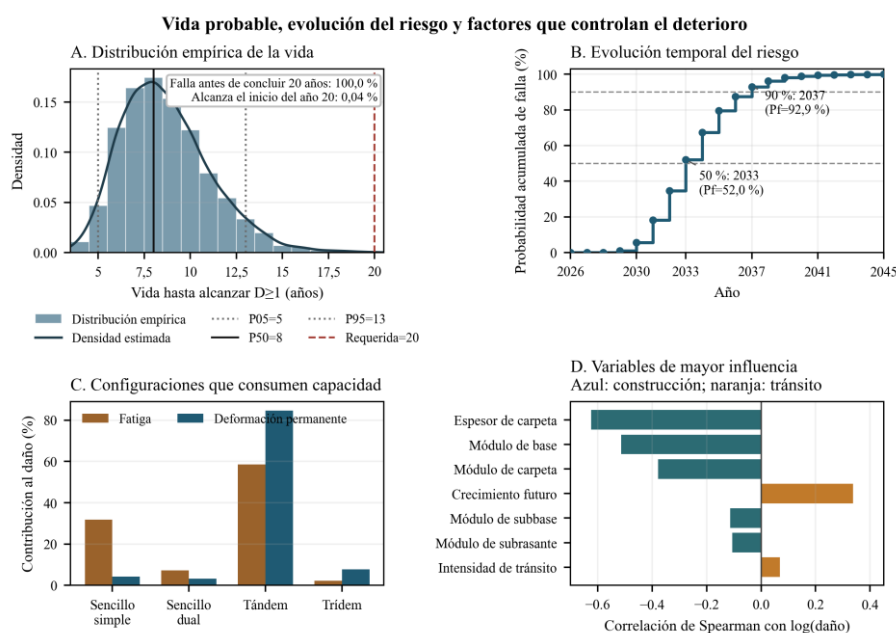


Figura 4. Distribución empírica de la vida, evolución anual del riesgo, contribución al daño por configuración de eje y variables de mayor influencia. La vida requerida fue de 20 años.

7 Discusión

La aportación del método no se limita a acelerar el análisis multicapa. Mantiene la relación entre el tránsito observado, la configuración de eje, la respuesta mecánica y el deterioro; así, los estados pueden reutilizarse cuando se actualizan las repeticiones o se sustituye una ley de daño. Esta trazabilidad evita reducir desde el inicio el tránsito a una carga media o a un eje equivalente.

La distribución empírica transforma una vida determinista en información para decidir: los percentiles describen la dispersión, la curva anual permite anticipar recursos y la sensibilidad señala qué variables deben vigilarse. La puerta de dominio conserva la velocidad de la red sin aceptar

extrapolaciones; los 909 retornos también muestran dónde conviene ampliar de forma controlada los datos de entrenamiento.

La interpretación permanece limitada por la elasticidad lineal, la estructura representativa, cuatro días de pesaje y la ausencia de calibración regional. Una aplicación de gestión debe incorporar espesores y módulos medidos, pesaje continuo y contraste periódico con el deterioro observado. En ese contexto, el flujo puede convertirse en un protocolo de actualización para laboratorios vivos de infraestructura.

8 Conclusiones

El Marco de Estados Mecánicos del Pavimento conserva una relación auditable entre solicitud, estructura, punto evaluado y respuesta. El programa PavAnalyzer coincidió con KENLAYER en el interior y con una solución analítica independiente en superficie; con él se generaron más de 26 millones de estados para estructuras de dos a siete capas.

La división por estructuras completas evitó fuga de información. En 1800 estructuras no vistas, la red reprodujo cinco respuestas con errores normalizados inferiores a 0.14 %. Fue 20.29 veces más rápida que el programa en el mismo procesador y alcanzó una referencia de 931 veces en una Tesla T4; los casos externos siempre regresaron al programa.

En el caso Palmillas, el tándem concentró el daño por su frecuencia y severidad. La vida empírica P05, P50 y P95 fue de 5, 8 y 13 años; la fatiga gobernó 99.38 % de las realizaciones y el riesgo superó 50 % en 2033. El espesor asfáltico y el módulo de la base fueron las variables constructivas de mayor influencia.

El método convierte espectros de carga y variabilidad constructiva en indicadores útiles para programar inspección, presupuesto e intervención. Su uso como herramienta de diseño o diagnóstico exige caracterización del tramo, pesaje continuo y calibración regional; el caso presentado demuestra el flujo, no la condición real de la autopista.

9 Referencias

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C.
- [2] Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis and Design (2.^a ed.). Pearson Prentice Hall.
- [3] Burmister, D. M. (1945). The general theory of stresses and displacements in layered systems. I. Journal of Applied Physics, 16(2), 89-94. <https://doi.org/10.1063/1.1707558>
- [4] Asphalt Institute. (1982). Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1), Ninth Edition. Research Report 82-2.
- [5] Miner, M. A. (1945). Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics, 12(3), A159-A164. <https://doi.org/10.1115/1.4009458>
- [6] Trejo, F., Chávez, C. y Alarcón, J. (2025). PavAnalyzer Beta: software web para el diseño y análisis comparativo de pavimentos reciclados y convencionales. Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.
- [7] Abed, A., Thom, N. y Neves, L. (2024). A novel surrogate model for flexible pavement performance prediction. International Journal of Pavement Research and Technology, 17, 479-492. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00255-x>
- [8] Vaswani, A., et al. (2017). Attention is all you need. Advances in Neural Information Processing Systems, 30.
- [9] OpenAI. (2025). A practical guide to building AI agents.
- [10] Anthropic. (2024). Building effective agents.
- [11] Mishra-Sharma, S. (2026). Long-running Claude for scientific computing. Anthropic. <https://www.anthropic.com/research/long-running-Claude>
- [12] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2013). Estudio origen-destino y pesaje: Plaza de Cobro Palmillas, carretera México-Querétaro. Dirección General de Servicios Técnicos.
- [13] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2026). Datos Viales 2026: Querétaro. Dirección General de Servicios Técnicos.