

# **REVISION Y MEJORA DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES USANDO TÉCNICAS ESTADÍSTICAS**

Luis Loria, MsC, Autor correspondiente  
Estudiante de Doctorado,  
Centro Superpave para el Oeste de Estados Unidos  
Universidad de Nevada Reno/ MS257  
E-mail: lorial@unr.nevada.edu

Elie Y. Hajj, PhD, autor correspondiente  
Profesor,  
Centro Superpave para el Oeste de Estados Unidos  
Universidad de Nevada Reno/ MS257  
E-mail: elieh@unr.edu

Alejandro Navas, MsC  
Director,  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME)  
Universidad de Costa Rica  
E-mail: anavas@lanamme.ucr.ac.cr

Peter E. Sebaaly, PhD, P.E.  
Director/Profesor  
Centro Superpave para el Oeste de Estados Unidos  
Universidad de Nevada Reno/ MS257  
E-mail: psebaaly@unr.edu

## **Resumen**

La Comisión Regional de Transporte (CRTW) del Condado del Washoe en Nevada, usa la información aportada por su Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP) para tomar decisiones oportunas acerca del mantenimiento y rehabilitación de su red de pavimentos. Dicho condado usa un programa de cómputo del cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos llamado MicroPAVER® y el Índice de Condición del Pavimento (ICP o PCI por sus siglas en inglés) como procedimiento para determinar la condición actual de cada sección de pavimento y predecir sus necesidades de mantenimiento o rehabilitación. Cambios recientes en las propiedades de los materiales, volúmenes de tráfico, cargas de tránsito y presión de inflado de las llantas de los vehículos; así como nuevas técnicas constructivas han inducido inexactitud en la capacidad predictiva de los modelos de deterioro de la CRTW. Por este motivo, los actuales modelos no logran predecir adecuadamente el valor correcto de ICP. Por esto, la CRTW realizó esta investigación, con el fin de actualizar los modelos de predicción de condición del pavimento de las rutas del condado. Con este fin, un total de 872 secciones de pavimento fueron seleccionadas de la base de datos del SGP para desarrollar y

actualizar nuevos modelos de predicción de ICP tomando en cuenta condiciones particulares de clima y tráfico vehicular. Los nuevos modelos fueron desarrollados con técnicas estadísticas.

## INTRODUCCIÓN

La Comisión Regional de Transporte (CRTW) del Condado del Washoe en Nevada, usa la información aportada por su Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP) para tomar decisiones oportunas acerca del mantenimiento y rehabilitación de su red de pavimentos. Dicha comisión tiene a su cargo más de 1600 kilómetros de pavimentos en el norte de Nevada.

Dicho condado usa un programa de cómputo del cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos llamado MicroPAVER<sup>®</sup> (Shanin, 2005) y el Índice de Condición del Pavimento (ICP o PCI por sus siglas en inglés) como procedimiento para determinar la condición actual de cada sección de pavimento y predecir sus necesidades de mantenimiento o rehabilitación. El ICP es un indicador numérico que determina la condición estructural y superficial del pavimento asignando un valor que varía de cero para pavimentos fallados hasta 100 para un pavimento en condición excelente. El ICP provee información importante acerca de las causas de deterioro de un pavimento, sean producidas por carga o clima. El sistema de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos de la CRTW usa el ICP como base para la toma de decisiones.

La exactitud en la predicción del desempeño de un pavimento es fundamental para un manejo eficiente de los sistemas de infraestructura del transporte. Un ahorro significativo en el presupuesto para infraestructura puede lograrse si los modelos de predicción del desempeño están propiamente calibrados. La Tabla 1 muestra los modelos actuales de predicción del desempeño para pavimentos nuevos o rehabilitaciones que aplica la CRTW para dos zonas diferentes, la de Truckee Meadows y la de Incline Village. Se usan dos modelos porque las condiciones de clima de ambas zonas son totalmente diferentes. Asimismo, tres categorías de tránsito vehicular se pueden distinguir: Arterias, cuyo tráfico promedio diario es inferior a 3000; colectores, cuyo tráfico promedio diario es inferior a 1000, y carreteras residenciales, cuyo tránsito promedio diario es inferior a 500.

**Tabla 1. Modelos actuales de predicción del desempeño de la Comisión Regional de Transporte del Condado de Washoe y secciones de pavimento seleccionadas**

Zona**	Clasificación de la Ruta	ID%	Modelo de Predicción de ICP <sup>i</sup>	Número de Secciones*
TM	Arteria	TM-A	$100-2.2842Age-1.4028Age^2+0.1676Age^3-0.0055Age^4$	18
	Colector	TM-B	$100-4.1088Age-0.5338Age^2+0.0721Age^3-0.0022Age^4$	17
	Residencial	TM-C	$100-4.1088Age-0.5338Age^2+0.0721Age^3-0.0022Age^4$	555
IV	Arteria	INV-A	$100-6.34Age-0.1888Age^2+0.04236Age^3+0.00107Age^4$	--
	Colector	INV-B	$100-7.6104Age+1.1702Age^2-0.1169Age^3+0.00352Age^4$	24
	Residencial	INV-C	$100-0.5651Age-0.0337Age^2+0.01022Age^3+0.00093Age^4$	258

\* Número total de secciones analizadas por zona.

%ID=Identificación de la zona

\*\* TM=Truckee Meadows, IV=Incline village.

<sup>i</sup> Age = Edad del pavimento o periodo transcurrido en años desde la última rehabilitación.

Cambios recientes en las propiedades de los materiales, volúmenes de tráfico, cargas de tránsito y presión de inflado de las llantas de los vehículos; así como nuevas técnicas constructivas han inducido inexactitud en la capacidad predictiva de los modelos de deterioro de la CRTW. Por este motivo, los actuales modelos no logran predecir adecuadamente el valor correcto de ICP. Por esto, la CRTW realizó esta investigación, con el fin de actualizar los modelos de predicción de condición del pavimento de las rutas del condado.

## **REVISION BIBLIOGRAFICA**

El desempeño de un pavimento está definido como la tendencia de este a proveer serviceabilidad en un periodo de diseño dado. La serviceabilidad está definida como la habilidad de un pavimento de servir a la demanda de tráfico actual, proveyendo capacidad estructural, confort y seguridad a los usuarios de la vía (AASHO, 1962). Los modelos de predicción de desempeño del pavimento son críticos para el sistema de administración de pavimentos de una región, porque determinar el programa de trabajo anual, la inversión de fondos públicos en infraestructura vial así como la determinación de si un pavimento requiere rehabilitación o mantenimiento (Li y Zhang, 2004).

En el año 2001, Gulen et al desarrollaron modelos de predicción simple del desempeño de pavimentos para varios tipos de carreteras con el objetivo de formular adecuadamente el planeamiento, rehabilitación y reconstrucción de los pavimentos flexibles de Indiana (Gulen et al, 2001). En el año 2004, se desarrolló un modelo para priorizar la inversión de municipalidades en los Estados Unidos basándose en el ICP. En 1994, Shanin indicó que los modelos de predicción de pavimentos son imperativos para tener un sistema de gestión de pavimentos integral. Adicionalmente, Shanin muestra en su trabajo diferentes aspectos de cómo se debe realizar la predicción del desempeño, enfatizando que se deben tomar decisiones sanas, en el tiempo adecuado en vez de reparaciones de emergencia (Shanin et al, 2005).

En el año 2006, el Departamento de Transporte de Virginia, condujo un estudio para desarrollar métodos de gestión de pavimentos para rutas de alta prioridad basándose en información existente. Los primeros resultados de esta evaluación han sido utilizados en modelos de predicción del desempeño de pavimentos para la guía de diseño mecánica de los Estados Unidos. Un aporte importante de este estudio es que provee de técnicas para comparar los deterioros actuales de los pavimentos con los que había predicho el modelo que desarrollaron (Gramajo et al, 2007).

## **SISTEMA DE GESTION DE PAVIMENTOS DE LA CRTW**

El programa de cómputo llamado MicroPAVER es utilizado por la CRTW para administrar su sistema de pavimentos. Dicho programa de cómputo fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos a finales de los años 70. El MicroPAVER puede ser utilizado para monitorear el estado de un pavimento, las labores de mantenimiento y rehabilitación ejecutadas en cada sección de pavimentos así como para predecir el estado del pavimento cuando se requiera. Mediante una formulación matemática sencilla y los datos actuales que tiene registrados puede generar automáticamente modelos de predicción de ICP para cada sección de pavimento que se requiera. También tiene la ventaja de que el usuario puede generar su propio modelo de deterioro e introducirlo (Shanin et al, 2007).

## **Categorización de los Pavimentos**

Los datos empleados en esta investigación provienen de la División de Mantenimiento de la CRTW. Cada red o zona indicada en la Tabla 1 fue dividida en ramales, que es el segundo nivel jerárquico del MicroPAVER. Cada ramal corresponde a una carretera o sección de carretera. Dichas secciones son diferencias por su geometría, espesor o materiales utilizados, así como fechas de construcción o tráfico. Cada ramal es a su vez dividido en secciones. Cada sección es dividida a su vez en unidades de muestreo. La evaluación de deterioros se hace en unidades de muestreo elegidas aleatoriamente. Cada sección tiene un área similar y en general tiene 10 metros de largo por el ancho total de la vía. De este modo, la evaluación de la condición del pavimento se efectúa todos los años en las unidades de muestreo elegidas.

## **Recolección de Información**

Antes de realizar cualquier labor de recolección de datos, cada ramal, sección y unidad de muestreo debe ser identificada con un código único lo cual es realizado automáticamente por el programa de cómputo. Los datos recolectados se dividen en dos tipos: datos históricos de intervenciones y evaluación de deterioros de unidades de muestreo. El procedimiento actual de evaluación se basa en las definiciones de la norma ASTM D6433. Dicho procedimiento se basa en efectuar una inspección visual del 10% de las unidades de muestreo de toda la red (ASTM, 2007).

Los diversos tipos de deterioros utilizados se encuentran definidos en el Manual de Deterioros de Pavimentos Asfálticos de la CRTW (CRTW, 2007). El modelo de cálculo y procedimiento utilizados para calcular el ICP, que se basa en los deterioros evaluados, se pueden encontrar en el Apéndice X3 de la norma ASTM D6433.

## **PREDICCIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS PAVIMENTOS**

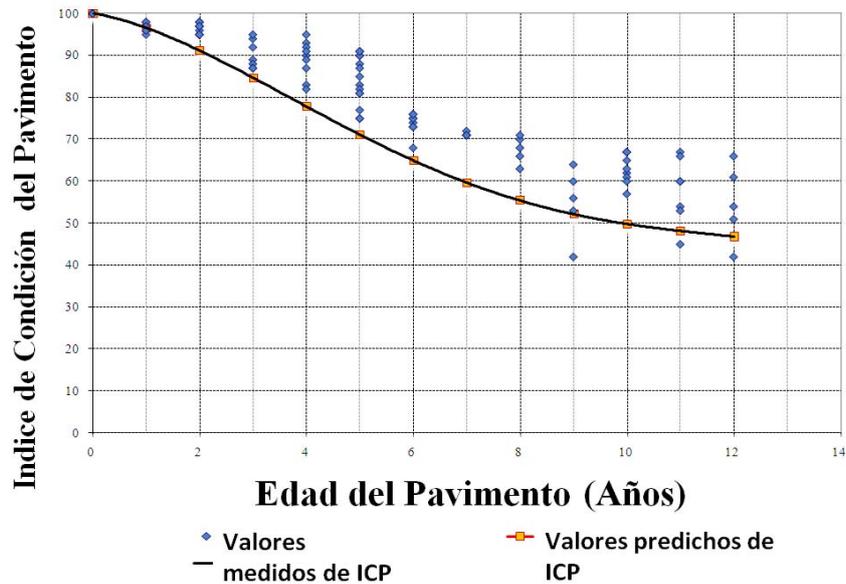
Como se indicó anteriormente, la CRTW usa los modelos de predicción del desempeño de pavimentos mostrados en la Tabla 1. Dichos modelos de deterioro corresponden a pavimentos flexibles recién construidos o reconstruidos.

### **Evaluación de los Modelos Actuales de Predicción del ICP**

Primeramente, los modelos de predicción del ICP deben ser verificados contra datos actuales de ICP de diversas secciones de pavimentos flexible que no han sido sujetos a ninguna labor de mantenimiento en el período de análisis. Como se indicó anteriormente, 872 secciones fueron incluidas en el análisis para las regiones de Truckee Meadows y de Incline Village.

#### *Truckee Meadows*

La Figura 1 muestra las mediciones de ICP para las secciones de pavimento residencial de la zona de Truckee Meadows (TM). La figura muestra que en el caso particular de las zonas residenciales, los modelos de predicción sobre-estiman la tasa de reducción en los valores de ICP. Figuras similares fueron desarrolladas para todas las secciones de pavimento estudiadas, sin embargo debido a las limitaciones de espacio solo se muestra el caso de pavimentos residenciales de la zona de Truckee Meadows.



**Figura 1 Valores medidos versus valores predichos por los modelos de ICP**

La capacidad de predicción de los modelos fue verificada usando los valores estadísticos residuales producto de la comparación entre los valores actuales de ICP y los valores predichos por el modelo de predicción actual. Entre menor sea la variación y tamaño relativo de los residuales, mejor es el modelo de predicción y viceversa. Un modelo perfecto tendría residuales iguales a cero. Cualquier tipo de tendencia en la distribución de los valores residuales indica una peor tendencia de predicción. La discrepancia entre los valores medidos de ICP y los valores predichos es medida por la suma de cuadrados de los residuales (SSR). Un valor de SSR cercano a cero indica que el modelo predice prácticamente toda la variabilidad de la muestra analizada en la variable respuesta estudiada, que en este caso es denominada “Age” o edad del pavimento. La ecuación 1 muestra el modelo matemático del SSR. Para tomar en cuenta el efecto de la variación en el número de unidades de muestreo de cada sección de pavimento se creó un parámetro adicional llamado SSRR que consiste en dividir el SSR por el número de secciones de pavimento. La ecuación 2 muestra el modelo matemático del parámetro SSRR.

$$SSR = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

$$SSRR = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (2)$$

En las ecuaciones 1 y 2,  
 $y_i$  es la respuesta observada;  
 $\hat{y}_i$  es la respuesta predicha,  $y$ ;  
 $n$  es el número de unidades de muestreo estudiadas.

De forma similar al SSRR, el Error Medio al Cuadrado (MSE) es otra forma de cuantificar cuan bueno es un modelo de desempeño. La expresión matemática del MSE se brinda en la Ecuación 3. Un buen modelo deberá tener valores relativamente bajos para el SSRR y el MSE.

$$MSE = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{DFE} \quad (3)$$

En la ecuación 3,

$y_i$  es la respuesta observada;

$\hat{y}_i$  es la respuesta predicha, y;

DFE es el error de los grados de libertad.

La Tabla 2 resume los valores de SSR, SSRR y de MSE. Dicha tabla indica que los modelos para vías del tipo colector son más precisos que los utilizados para calles del tipo arterias y residenciales. El peor modelo encontrado fue el de vías residenciales.

**Tabla 2. Estadísticas para los Modelos de Predicción Nuevos y Actuales para las Zonas de Truckee Meadows y de Incline Village**

Zona **	Tipo de Ruta	ID *	Número de Secciones	Ajuste del Modelo (R <sup>2</sup> )	Suma de Residuales al Cuadrado (SSR)	Número de Unidades de Muestreo (N)	Error Medio al Cuadrado (MSE)	SSRR <sup>(1)</sup>
<b>Modelos de Predicción Actuales</b>								
TM	Arteria	TM-A	18	--	12892	115	3223	112
	Colector	TM-B	17	--	3262	48	3262	68
	Residencial	TM-C	555	--	17964131	2933	204138	6125
IV	Colector	INV-B	24	--	9534	71	4767	134
	Residencial	INV-C	258	--	200636	1140	2389	176
<b>Nuevos Modelos de Predicción</b>								
TM	Arteria	TM-A	18	0.928	2357	112	589	21
	Colector	TM-B	17	0.942	754	45	503	17
	Residencial	TM-C	555	0.867	118303	2933	1344	40
IV	Colector	INV-B	24	0.902	1016	71	508	14
	Residencial	INV-C	258	0.780	50923	1140	606	45

\* ID=Identificación de la zona y el tipo de tráfico correspondiente, A:Arterias, B:colectores y, C: Residencial.

<sup>(1)</sup> SSRR = Suma de residuales al cuadrado par al as secciones analizadas.

\*\*TM=Truckee Meadows, IV=Incline village.

### *Incline Village*

No se presentan figuras para el caso de Incline Village dadas las restricciones de espacio, sin embargo, el análisis fue similar al explicado para el caso de Truckee Meadows. La Tabla 2 presenta los resultados de SSR, MSE y SSRR para Incline Village. Al igual que para el área de Truckee Meadows, los modelos de predicción sobre-estiman la tasa de reducción en los valores de ICP particularmente para los colectores de acuerdo con el parámetro SSRR.

## Desarrollo de Nuevos Modelos de Predicción del ICP

En este análisis, los valores medidos de PCI fueron usados para generar nuevos modelos de predicción del desempeño de pavimento para las secciones de pavimento de la CRTW usando un modelo de mejor ajuste polinomial. Adicionalmente, los modelos desarrollados fueron comparados con los modelos actuales utilizados por CRTW. Todas las unidades de muestreo utilizadas en esta sección corresponden a pavimentos rehabilitados o reconstruidos sin ninguna labor de mantenimiento aplicada durante el periodo de análisis.

### *Truckee Meadows*

Las ecuaciones 4 a 6 muestran los nuevos modelos polinomiales de predicción para el área de TM. Dichos modelos relacionan el ICP con la edad del pavimento en años. La precisión de los modelos actuales en relación con los datos utilizados es descrita a través del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y por los parámetros definidos anteriormente: MSE, SSR y el SSRR. Los resultados de este análisis están resumidos en la Tabla 2. Un valor de  $R^2$  cercano a 1.0 indica un modelo de predicción que considera toda la variabilidad de la muestra analizada y que predice perfectamente el desempeño del pavimento. Los modelos de predicción desarrollados generaron valores de  $R^2$  entre 0.867 y 0.942, lo cual es bastante alentador dadas las conocidas variaciones de desempeño de pavimento de acuerdo con la zona climática y tráfico particular. Adicionalmente, los modelos desarrollados tiene valores de SSRR inferiores a 40, valor mucho menor que el de los modelos actuales usados por CRTW.

Las ecuaciones de predicción del desempeño encontrada para la zona de Truckee Meadows se detallan a continuación:

$$\text{Arterias: } PCI = 100 - 0.0089Age^4 + 0.2163Age^3 - 1.8488Age^2 + 1.227Age \quad (4)$$

$$\text{Colectores: } PCI = 100 - 0.0031Age^4 + 0.0823Age^3 - 0.912Age^2 - 0.406Age \quad (5)$$

$$\text{Residencial: } PCI = 100 - 0.0101Age^4 + 0.2572Age^3 - 1.9537Age^2 + 0.1584Age \quad (6)$$

La Tabla 3 muestra el porcentaje de reducción del valor SSRR de los modelos actuales de predicción que aplica la CRTW al compararlos con los valores de SSRR de los nuevos modelos desarrollados en esta investigación. Los resultados indican un incremento significativo en la calidad de la predicción del ICP por parte de los nuevos modelos desarrollados.

### *Incline Village*

Las ecuaciones 7 y 8 muestran los modelos de desempeño desarrollados para la zona de Incline Village. Ambos modelos muestran valores de ajuste aceptables dentro de un rango de 0.780 a 0.902, así como valores de SSRR menores a 45.

$$\text{Colectores: } PCI = 100 + 0.0116Age^3 - 0.03314Age^2 - 2.3432Age \quad (7)$$

$$\text{Residencial: } PCI = 100 - 0.0042Age^4 + 0.1101Age^3 - 0.8329Age^2 - 2.0416Age \quad (8)$$

La Tabla 3 muestra el porcentaje de reducción del valor SSRR de los modelos actuales de predicción que aplica la CRTW para la zona de Incline Village al compararlos con los valores

de SSRR de los nuevos modelos desarrollados en esta investigación. Los resultados indican un incremento significativo en la calidad de la predicción del ICP por parte de los nuevos modelos desarrollados.

**Tabla 3 Valores de SSRR para las Areas de Truckee Meadows e Incline Village**

Area	Tratamiento	Tipo de rutas	Número de Secciones	SSRR		Porcentaje de Reducción en SSRR
				RTC	Nuevo	
Truckee Meadows	Reconstruction or HMA Overlay	Arterial	18	112	21	- 81%
		Collector	17	68	17	- 75%
		Residential	555	6125	40	- 99%
Incline Village	Reconstruction or HMA Overlay	Collector	24	134	14	- 90%
		Residential	258	176	45	- 74%

## CONCLUSIONES

La Comisión Regional de Transporte (CRTW) del Condado del Washoe en Nevada, usa la información aportada por su Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP) para tomar decisiones oportunas acerca del mantenimiento y rehabilitación de su red de pavimentos. Dado que la CRTW reconoce la importancia de mantener actualizados sus modelos de predicción del desempeño de pavimentos flexibles, esta investigación determinó nuevos modelos basados en datos actuales de la base de datos del sistema de Gestión de Pavimentos (SGP) de la CRTW.

Por lo tanto, las siguientes conclusiones fueron hechas:

- El método estadístico de residuales ha mostrado ser una herramienta muy útil para determinar la capacidad de predicción de los modelos usados actualmente por la CRTW.
- En general, los modelos actuales de predicción del desempeño de pavimentos flexibles de la CRTW estiman incorrectamente la tasa de reducción del Índice de Condición del Pavimento (ICP). Dicha conclusión fue verificada con el análisis estadístico desarrollado.
- Los nuevos modelos de predicción desarrollados presentan mucho mejores valores de ajuste por lo que serán utilizados por la CRTW.
- El método de análisis estadístico desarrollado en este estudio es una herramienta adecuada para ser utilizada en la determinación de modelos de predicción de desempeño de pavimentos así como en la determinación de su precisión.

## REFERENCIAS

- AASHO Road Test Report 5, Pavement Research. (1962). Special Report 61 E. HRB, National Research Council, Washington, D.C.
- American Standards of Testing and Materials, ASTM, (2007). ASTM D6433 – 07: Práctica Standard para Determinar el Índice de Condition de Pavimento de Carreteras y Lotes de Estacionamiento.
- Comisión Regional de Transporte del Valle del Washoe (CRTW), (2007). Manual de Deterioros de Pavimentos Flexibles y Rígidos.

- Gramajo, C., Flintsch, G., Loulizi, A., De Leon, E. (2007). Verificación de los Modelos Mecánico-Empíricos de Pavimentos en Servicio. En el CD-ROM del of In-Service High Priority Pavements. In Pavement Management. CD-ROM. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Gulen, S., et al. (2001). Desarrollo de Modelos de Desempeño de Pavimentos para el Sistema de Gestión de Pavimentos de Indiana. Reporte Final FHWA/IN/JTRP-2001/17. Departamento de Transporte de Indiana.
- Li. Z., y Zhang, Z. (2004). Utilización del Modelo Probit para Predecir el Desempeño de Pavimentos. En Pavement Management, Design, & Testing. CD-ROM. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Shahin, M.Y. et al. (2005). Gestion de Pavimentos de Aeropuertos, Carreteras y Parques. Springer Science+Business Media, LLC, New York.
- Shahin, M.Y. et al. (2007). Micro PAVER Website. US Army Engineer Research and Development Center – Construction Engineering Research Laboratories - Department of Defense. Accessed March 19, 2007. <http://www.cecer.army.mil/paver/Paver.htm>  
PAVER