



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstruccion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

Vera, I; Thenoux, G; Solminihac, H.D; Echaveguren, T
Modelo de evaluación técnica del desempeño del mantenimiento de pavimentos flexibles
Revista de la Construcción, vol. 9, núm. 2, diciembre, 2010, pp. 76-88
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127619215008>

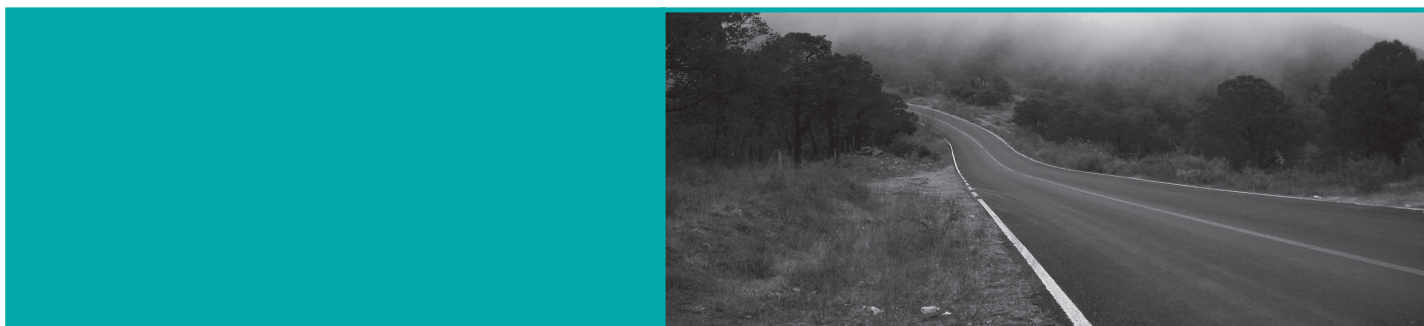
- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Technical assessment
model for the performance
of flexible pavement
maintenance*

Modelo de evaluación técnica del desempeño del mantenimiento de pavimentos flexibles



Autores

VERA, I. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile
iavera@uc.cl

THENOUX, G. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile
gthenoux@uc.cl

SOLMINIHAC, H. D. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile
Ministro de Obras Públicas
hsolmini@uc.cl

ECHAVEGUREN, T. Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción
echaveguren@ing.puc.cl

Fecha de recepción 12/10/2010

Fecha de aceptación 01/12/2010

Resumen

En la gestión de pavimentos es importante evaluar el desempeño de las estrategias de mantenimiento. Esta se realiza mediante modelos tales como HDM-4 a nivel de red. Sin embargo, no siempre se cuenta con calibraciones a nivel de proyecto que permitan precisar los planes de mantenimiento. En este trabajo se propone un modelo de evaluación técnica de pavimentos alternativo, que permite comparar planes de conservación (evaluación de tipo *ex ante*) y también evaluar el desempeño de los programas de mantenimiento ya ejecutados (evaluación de tipo *ex post*), a nivel de proyecto. El modelo considera modelos de predicción de solicitaciones de tráfico, de progresión

de rugosidad a través del IRI, y del efecto de acciones de mantenimiento sobre el IRI. Los modelos fueron calibrados a nivel de proyecto con datos de 2.000 tramos de 200 m de longitud de pavimentos asfálticos emplazados en la red vial de Chile, categorizados por nivel de tráfico, clima, tipo de vehículo y condición de carga. Asimismo, propone un indicador de desempeño agregado que mide la efectividad de planes de conservación respecto de una condición base. El modelo permite cuantificar el desempeño de los planes de mantenimiento según el tipo de pavimento y optimizar el plan de conservación de acuerdo a la historia de los pavimentos.

Palabras Clave: Optimización, mantenimiento, rugosidad, pavimentos.

Abstract

Assessment of maintenance strategies is a key aspect in pavement management. This is done through such models as HDM-4 at network level. Calibrations at project level however are not always available for maintenance plans to be accurately made. This paper proposes an alternative model for the technical assessment of pavements, allowing conservation plans (assessment of the ex-before type) to be compared and also the performance of already executed maintenance works (ex-after type assessment). The model considers forecasts of traffic stress, roughness progression through IRI and the effect of

maintenance activities on the IRI. Models were calibrated at the level of projects using data from 2,000 200-hundred meter sections of asphalt pavements of the Chilean road network. Each test section was grouped considering weather, traffic level, type of vehicles and load condition. An aggregated performance index is also proposed to measure the effectiveness of conservation plans compared to its base condition. This model allows measuring the performance of maintenance plans according to the type of pavement and optimizing the conservation plan according to the history of pavements.

Keywords: Optimization, maintenance, roughness, pavements.

1. Introducción

Desde el punto de vista de los usuarios, la gestión del mantenimiento de pavimentos tiene por objetivos: otorgar al usuario confort y seguridad; mantener la calidad funcional del pavimento (resistencia al deslizamiento, apariencia, etc.), mantener bajos los costos de operación del usuario

Estos objetivos se traducen, desde el punto de vista del administrador de la red vial, en la necesidad de mantener un exhaustivo seguimiento de la condición del pavimento y de diseñar estrategias para optimizar las acciones de mantenimiento, tanto desde un punto de vista de los flujos de caja (inversiones) como del impacto que genera al usuario las intervenciones en la red.

Por lo tanto, los administradores de las rutas requieren de programas o modelos precisos para reducir la incertidumbre en la planificación de las inversiones necesarias para alcanzar un cierto estándar de los pavimentos de la red.

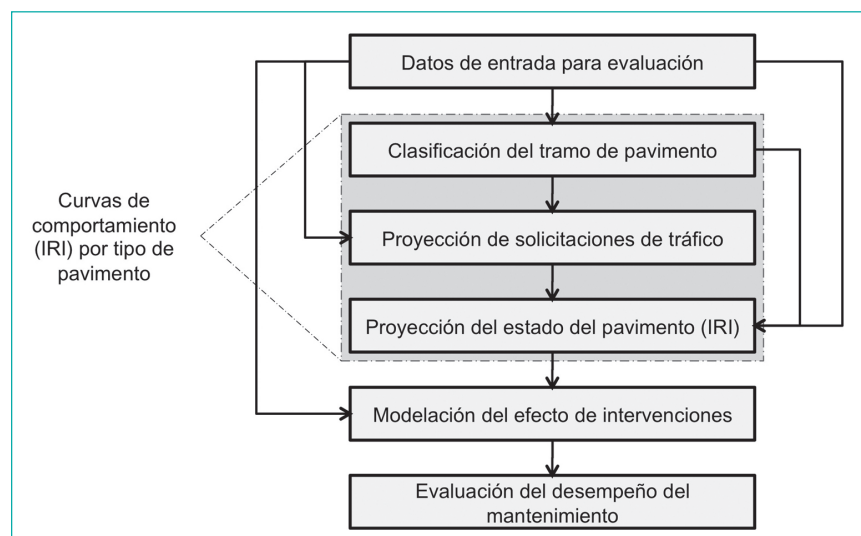
En este artículo se propone un modelo de evaluación del desempeño de las acciones de mantenimiento de pavimentos que permite comparar planes de mantenimiento (evaluación de tipo *ex ante*) y evaluar el desempeño de programas de mantenimiento ya ejecutados (evaluación de tipo *ex post*). El modelo propuesto se basa en el índice de rugosidad internacional (IRI) para evaluar el estado global del pavimento. Se optó por

este indicador debido a que representa de manera directa la condición funcional de un pavimento, y a su vez constituye un indicador complementario importante para sectorizar la red según su capacidad estructural. La metodología considera 6 etapas, como se muestra en la Figura 1.

Abarcando la revisión exhaustiva de diversas investigaciones, este estudio se aboca a la obtención de curvas de comportamiento (en función del IRI) específicas para distintos tipos de pavimentos mediante un análisis a nivel de red. A partir de estas curvas se busca cuantificar el desempeño de distintos planes de conservación, que incluyen un conjunto de acciones individuales de mantenimiento, a nivel de proyecto y en base a indicadores de desempeño y modelos que reflejen el efecto de distintas intervenciones.

En este artículo se revisa, en primer lugar, el estado del arte acerca de modelos de evaluación y optimización del mantenimiento. Luego se presenta la metodología propuesta, en donde se verán los procedimientos, fórmulas y parámetros utilizados para clasificar los distintos tramos de pavimentos flexibles incluidos en el estudio. Posteriormente se explican los conceptos considerados para el desarrollo de las curvas de comportamiento en función del IRI. En la última parte se incluyen las modelaciones e indicadores que permiten estimar la efectividad de distintos tipos de intervenciones. Finalmente se incluye un caso de aplicación del modelo y las conclusiones del trabajo.

Figura 1 Etapas del modelo de evaluación del desempeño del mantenimiento de pavimentos



2. Modelos de evaluación de desempeño

La mayoría de los modelos o métodos de evaluación de desempeño se fundamentan en la serviciabilidad del pavimento y en la estimación de las diferencias producidas al aplicar intervenciones. De la revisión de la literatura, los trabajos descritos en esta sección corresponden a los más atingentes al propósito de este estudio.

Investigaciones desarrolladas por Tsunokawa *et al.* (2006) se enfocaron en la búsqueda de intervenciones óptimas para distintos tipos de pavimentos en función de su nivel de deterioro medido en términos de IRI.

Al-Suleiman *et al.* (1991) plantearon que la efectividad del mantenimiento depende del tipo de pavimento y particularmente de la edad, la cual refleja de manera indirecta el efecto combinado del tráfico y el clima sobre los pavimentos. También reconoce que el tipo de autopista refleja indirectamente el diseño y la construcción del pavimento.

Irfan *et al.* (2009) estimaron la efectividad de intervenciones específicas sobre distintos tipos de pavimentos bajo diferentes condiciones de tráfico y clima. Utilizaron 3 métodos: uno de corto plazo en función de saltos en las curvas de comportamiento (IRI) y dos de largo plazo en función de la vida de servicio y el incremento en el comportamiento del pavimento luego de la aplicación de la intervención.

Abaza (2004), por su parte, propuso un indicador de comportamiento (RP: *relative performance*) en base al área bajo la curva de PSI (*present serviciability index*) específica para distintos tipos de pavimentos.

Similar es el estudio de Li *et al.* (2006) quienes utilizan el PSR (*present serviciability ranking*) en función del IRI para evaluar la serviciabilidad del pavimento. La complementan con un índice de deterioro compuesto que conjuga todos los deterioros existentes en el pavimento. Proponen árboles de decisión para el mantenimiento en función de parámetros tales como la edad o el nivel de deterioro del pavimento a partir de curvas de comportamiento específicas para distintos tipos de pavimentos. Luego calculan la efectividad del mantenimiento en función del área bajo estas curvas.

Prozzi y Hong (2008) proponen un modelo de predicción de estado genérico para todos los tipos de pavimentos cuya adaptación a cada caso particular se efectúa con las variables de entrada que requiere para la modelación.

3. Método de evaluación de desempeño propuesto

3.1 Segmentación de la red

Para obtener curvas de comportamiento específicas de distintos tipos de pavimentos, los tramos de pavimentos con datos disponibles se agruparon en función de 3 parámetros: tipo de clima, nivel de tráfico y nivel estructural. La base de datos utilizada consideró 2.000 tramos de pavimentos de una longitud de 200 metros cada uno.

La clasificación de los tramos en función de estas 3 características se sintetizó en una matriz factorial que agrupó los distintos tipos de pavimentos. Cada celda de la matriz factorial tiene características estadísticamente equivalentes, lo cual permite estudiar el comportamiento de cada tipo de pavimentos de manera particular. Puesto que los tramos tienen edades distintas, para ajustar las curvas de comportamiento se utilizó un enfoque de red basado en el método de las ventanas (de Solminihaç *et al.*, 2003). El procedimiento utilizado para clasificar los tramos se resume en la Figura 2.

La clasificación por tipo de clima consideró la localización del tramo de pavimento según la región del país en la que está ubicado. Para ello se adoptó la zonificación propuesta por de Solminihaç *et al.* (2003). Así, se identificaron 3 tipos de climas según las siguientes 3 zonas de Chile: (1) norte (regiones I a IV); (2) centro (regiones V a VII); y (3) sur (regiones VIII a X).

El nivel de tráfico de un pavimento se basa en los ejes equivalentes promedio diarios para el tramo en evaluación. Para estimar las solicitaciones sobre el pavimento asociadas al tráfico de vehículos pesados, se definieron 4 tipos de vehículos pesados: (1) camiones de 2 ejes (C2E); (2) camiones de más de 2 ejes (C+2E); (3) buses de 2 ejes (B2E); y (4) buses de más de 2 ejes (B+2E).

Considerando que los límites inferiores y superiores de ejes equivalentes promedio diarios que permiten asignar un nivel de tráfico al pavimento, se obtuvieron con análisis estadísticos basados en tráficos del año 2008 factores de equivalencia de carga fijos. Previamente se ajustó el dato de tránsito medio diario anual (TMDA) al año 2008 para cada tipo de vehículo pesado, conforme a la ecuación 1.

$$TMDA_{2008} = \frac{TMDA_{AÑO\ DATO}}{(1+i)^{AÑO\ DATO-2008}} \quad (1)$$

La tasa de crecimiento utilizada para realizar el ajuste del tráfico es la tasa histórica obtenida como promedio en los tramos considerados en el estudio. Los valores promedio calculados para todas las regiones de Chile fueron de: 5,8% para vehículos C2E, 12% para vehículos C+2E, 4% para vehículos B2E y 5,3% para vehículos B+2E.

La expresión para calcular los ejes equivalentes promedio es:

$$EE_{dia} = 1,424 \cdot TMDA_{C2E} + 4,056 \cdot TMDA_{C+2E} + 1,375 \cdot (TMDA_{B2E} + TMDA_{B+2E}) \quad (2)$$

En cuanto al tráfico se definieron 3 niveles de tráfico (medio, alto y muy alto) previo estudio y procesamiento de la información disponible en la base de datos. Los 3 niveles planteados se definieron mediante un análisis de conglomerados (*cluster*), el cual permitió agrupar tramos con valores estadísticamente homogéneos. A partir de este análisis se obtuvieron las cotas mínimas y máximas para los 3 niveles de tráfico.

Para definir el nivel estructural de un tramo de pavimento se unificó la capacidad estructural del pavimento en función de la deflexión simulada, la cual tiene relación

con los espesores y tipos de capas que componen el pavimento y con las características del suelo de fundación. Se modelaron 2 ecuaciones de deflexión (DEF), cuya aplicación depende de la disponibilidad de datos de la estructura del pavimento para poder estimar el número estructural (NE).

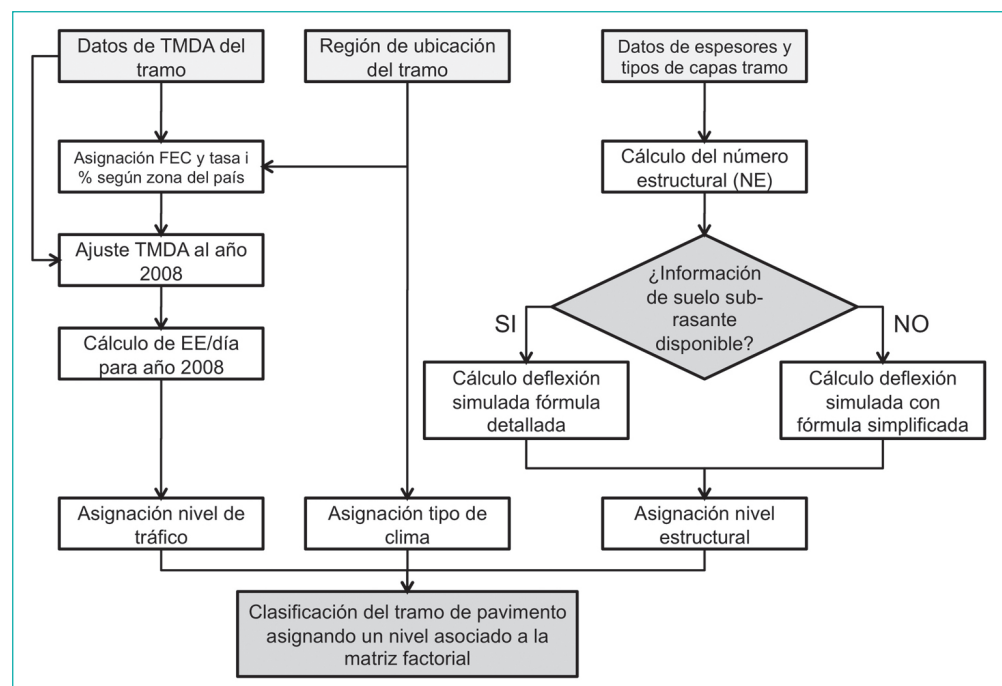
$$DEF(mm) = 12,4072 \cdot NE^{-1,6068} \quad (3)$$

$$DEF(mm) = 14,4683 \cdot NE^{-1,2752} \cdot CBR^{-0,2379} \quad (4)$$

La ecuación 3 se utiliza para calcular la deflexión simulada cuando se cuenta solo con los espesores y tipos de capas que constituyen la estructura del pavimento. La ecuación 4, en tanto, se utiliza cuando se cuenta también con datos de CBR bajo la subrasante.

Al igual que para la clasificación por el nivel de tráfico, en el caso de la capacidad estructural se realizó un análisis de conglomerados en función de la deflexión simulada para cada uno de los tramos de pavimentos disponibles en la base de datos. A partir de este análisis se generaron 3 niveles (fuerte, intermedia y débil) según la capacidad estructural del pavimento basándonos en el valor de la deflexión.

Figura 2 Procedimiento para la clasificación de los tramos de pavimentos asignando un nivel de la matriz factorial



La Tabla 1 resume los resultados del análisis de *cluster* para nivel de tráfico y estructura.

A partir de los rangos obtenidos del análisis de *cluster*, se establecen los valores límites que permiten la clasificación de los tramos de pavimentos. Esa se muestra en la Tabla 2.

Por cada tipo de pavimento de la matriz factorial se obtienen modelos de predicción de tráfico (para los 4 tipos de vehículos) y del estado del pavimento. Se estableció un máximo de 80 tramos (unidades muestrales, UM) y un mínimo de 15 UM por celda de la matriz factorial. El mínimo para que los modelos que se obtengan sean repre-

sentativos y el máximo para no distorsionar la estimación. Cada UM corresponde a un tramo de pavimento con una extensión promedio aproximada de 200 metros.

3.2 Modelación de solicitudes de tráfico

3.2.1 Proyección de tráfico

Las proyecciones de tráfico se realizaron de manera de poder asignar factores de estratigrafía de carga (FEC) por tipo de vehículo pesado, para luego obtener los ejes equivalentes anuales.

Tabla 1 Límites superior e inferior de niveles de tráfico y estructura						
Parámetro	Nivel	Número de Tramos	Valor <i>Cluster</i>		Clasificación de Tramos	
			inferior	superior	límite inferior	límite superior
Tráfico (EE/día)	Medio	758	2.654	5.828	-	5.830
	Alto	1.179	6.197	11.877	5.830	12.200
	Muy Alto	284	12.507	13.842	12.200	-
Estructura (deflexión en mm)	Fuerte	991	0,114	0,254	-	0,255
	Intermedia	1.170	0,262	0,377	0,255	0,385
	Débil	60	0,399	0,464	0,385	-

Tabla 2 Asignación de tramos de modelación en la matriz factorial final del estudio							
Tráfico		Muy Alto		Alto		Medio	
Clima	Estructura	Cod	Tramos	Cod	U.M.	Cod	Tramos
Húmedo	Fuerte	1	0	10	70	19	80
	Intermedia	2	0	11	80	20	72
	Débil	3	0	12	0	21	0
Intermedio	Fuerte	4	48	13	80	22	80
	Intermedia	5	0	14	80	23	80
	Débil	6	0	15	0	24	0
Seco	Fuerte	7	0	16	0	25	0
	Intermedia	8	0	17	0	26	75
	Débil	9	0	18	0	27	0

Para predecir el tráfico se utilizaron los modelos propuestos, entre otros autores, por Papagiannakis *et al.* (2006) y Lu *et al.* (2008). Las formas funcionales consideran un crecimiento compuesto (ecuación 5) y lineal (ecuación 6) en donde $TMDA_t$ es el tránsito medio diario anual correspondiente al año t ; $TMDA_0$ es el tránsito medio diario anual correspondiente al año base; i es la tasa de crecimiento anual de tráfico y es el tiempo (en años) a partir del año base de evaluación. El ajuste de las curvas se realizó mediante regresión lineal simple.

$$TMDA_t = TMDA_0 \cdot (1 + i)^t \quad (5)$$

$$TMDA_t = TMDA_0 \cdot (1 + i \cdot t) \quad (6)$$

Para incorporar la variabilidad en la predicción de tráfico, se estimaron 3 tasas de crecimiento que representan el crecimiento más probable, pesimista y optimista. Se calcularon a partir de los valores estadísticos (promedio y desviación estándar) del TMDA asociado a los tramos que pertenecían a una misma clasificación de tipo de pavimento.

Las ecuaciones de progresión del tráfico consideran un crecimiento constante. Sin embargo, este crecimiento está acotado por la capacidad de las rutas. La capacidad depende del nivel de servicio de la ruta y de la cantidad de pistas por sentido. Por este motivo, en la modelación de tráfico se limitó el crecimiento anual del tráfico según la capacidad de la vía. Una forma aproximada de

estimarla es a partir de las ecuaciones 7 y 8. Donde V_H es el volumen horario equivalente en veq/h , $V_{H/P}$ es el volumen horario equivalente por pista en $veq/h-pista$, y $TMDA_{CAM}$, $TMDA_{BUS}$ y $TMDA_{LIV}$ corresponden al tránsito medio diario anual de vehículos clasificados como camiones, buses y livianos, respectivamente.

$$V_H = 0,12 \cdot (2,5 \cdot TMDA_{CAM} + 2,0 \cdot TMDA_{BUS} + 1,0 \cdot TMDA_{LIV}) \quad (7)$$

$$V_{H/P} = \frac{V_H}{N^{pista}} \leq 2000 \quad (8)$$

3.2.2 Estimación de factores de equivalencia de carga

A partir de los valores de media y desviación estándar se obtienen los valores de FEC para distintas configuraciones de carga (liviana, mediana y pesada). De esta forma se presentan FEC por zona del país y para distintas configuraciones de carga. De acuerdo a los datos históricos revisados en la base de datos, se determinó de la Tabla 3 que permanecían aproximadamente constantes entre los años 2001 y 2008.

Una vez definidos las ecuaciones de progresión de tráfico por tipo de vehículo y los FEC, se logran obtener los ejes equivalentes anuales a partir de la ecuación 9.

$$EE_{anual} = 365 \cdot \sum_i (TMDA_{vehículo\ i} \cdot FEC_{vehículo\ i}) \quad (9)$$

Los ejes equivalentes anuales (EE_{anual}) incluyen distintas proyecciones según las condiciones que se impongan al

Tabla 3 Valores de FEC obtenidos por zona del país y para distintas configuraciones de carga (liviano – mediano – pesado)

Zona del País	Configuración de Carga	Tipo de Vehículo			
		C2E	C+2E	B2E	B+2E
Norte	Liviano	0,550	2,494	1,802	0,607
	Medio	0,646	2,512	1,846	0,877
	Pesado	0,742	2,529	1,890	1,148
Centro	Liviano	0,541	1,580	1,111	0,633
	Medio	0,736	2,280	1,579	0,871
	Pesado	0,931	2,980	2,047	1,108
Sur	Liviano	0,534	2,247	1,557	0,573
	Medio	0,785	2,588	1,690	0,888
	Pesado	1,036	2,928	1,823	1,203

momento de analizar un tramo de pavimento, en cuanto a tipo de crecimiento del tráfico, distribución por pista, porcentajes de tráfico pesado y configuración de carga.

3.3 Modelación del comportamiento de los pavimentos

A partir de los modelos de Kerali y Odoki (2000), NCHRP (2004) e Irfan *et al.* (2009). Se calibraron las formas funcionales de progresión del IRI. La ecuación 10 es una adaptación directa del modelo de Kerali y Odoki (2000). La ecuación 11, en tanto, se especificó en base a los resultados de Irfan *et al.* (2009).

$$IRI_t = a \cdot \left(\frac{EE}{NE}\right)^b \cdot e^{c \cdot EDAD} \tag{10}$$

$$IRI_t = a \cdot e^{\left\{b \cdot \left(\frac{EE}{NE}\right) + c \cdot EDAD\right\}} \tag{11}$$

Donde IRI_t es la rugosidad en el tiempo t (m/km), EE son los ejes equivalentes promedio diarios, NE es el número estructural del pavimento (cm), EDAD es la edad del pavimento en años y a, b, c corresponden a los parámetros de la regresión.

La calibración se realizó para todos los tipos de pavimentos incluidos en la matriz factorial (Tabla 2). La Tabla 4 resume los resultados de la calibración.

Los modelos se diferenciaron además por pista, según pista lenta y rápida, ya que la tasa de deterioro de ambas pistas es distinta. Esto se debe a que en la pista lenta se concentra el flujo de vehículos pesados. En tanto que la pista rápida es utilizada para adelantar, y por tanto circulan por ella principalmente vehículos livianos.

3.4 Modelación del efecto de intervenciones sobre los pavimentos

El modelo calibrado en la sección anterior explica el comportamiento del IRI en ausencia de mantenimiento. Sin embargo, para evaluar el desempeño de diversas estrategias de mantenimiento, es necesario cuantificar el efecto de las intervenciones sobre el IRI. Aun cuando en términos funcionales el IRI no discrimina explícitamente la influencia de un mejoramiento de condición funcional de la influencia de una de rehabilitación (mejoramiento de condición funcional y estructural), si es posible incluir dicha diferencia modelando la magnitud de la reducción de IRI, según lo muestra la Figura 3.

En ella se ilustra la disminución del valor de IRI (ΔIRI) al realizar una conservación o una rehabilitación en el pavimento. Esta diferencia se calculó como la diferencia entre el IRI del año de ejecución de la intervención (IRI_n) y el IRI del año previo a la intervención (IRI_{n-1}), según la ecuación 13, en donde n el año de ejecución de la intervención respectiva.

Tabla 4 Resultado de la calibración de modelo de progresión del IRI en pistas lenta y rápida

Nivel Matriz	Pista Lenta					Pista Rápida				
	Tipo de Ecuación	Coeficientes			R ² ajustado	Tipo de Ecuación	Coeficientes			R ² Ajustado
		a	b	c			a	b	c	
4	11	1,4183	0,0000	0,0137	0,628	11	1,2691	0,0000	0,0140	0,762
10	11	1,2400	0,0006	0,0234	0,797	11	1,2350	0,0002	0,0218	0,361
11	11	0,7165	0,0024	-0,0105	0,433	10	0,0487	0,6668	-0,0148	0,223
13	10	0,2120	0,3191	0,0113	0,127	10	0,1219	0,4156	0,0014	0,152
14	11	0,9613	0,0006	0,0528	0,754	11	0,9414	0,0032	-0,0056	0,332
19	11	0,7026	0,0014	0,0445	0,512	11	0,7892	0,0009	0,0446	0,712
20	11	1,9686	-0,0027	0,0508	0,279	11	1,5289	-0,0027	0,0562	0,323
22	10	1,8646	-0,0889	0,0506	0,175	10	1,8983	-0,0717	0,0169	0,016
23	10	0,5311	0,1988	0,0175	0,635	11	0,8820	0,0053	-0,0049	0,620
26	10	0,0078	1,0899	-0,0268	0,875	10	1,0718	0,0222	0,0172	0,769

$$\Delta IRI = IRI_{n-1} - IRI_n \quad (13)$$

Con datos históricos anuales de IRI en tramos donde se han ejecutado intervenciones de distinto tipo, se calcularon los valores de ΔIRI aplicando la ecuación 13.

El valor de ΔIRI tiene relación directa con el IRI previo a la aplicación de cada intervención, por lo cual se puede formular la ecuación 14 para cada tipo de intervención, siguiendo a Irfan *et al.* (2009).

$$\Delta IRI = f(IRI_{inicial}) \quad (14)$$

Para modelar ΔIRI se consideraron 3 formas funcionales: logarítmica, lineal y polinómica. En cada tipo de acción de mantenimiento modelada se seleccionó la forma funcional que arrojó un mayor coeficiente de correlación.

La Figura 4 muestra un ejemplo del ajuste de una de las curvas para la aplicación de un microaglomerado con bacheo y sello asfáltico (MIC+BACH+SE). En ella se aprecia que efectivamente la respuesta del modelo (ΔIRI) es dependiente del IRI inicial, siendo más efectiva cuando los valores de IRI son más altos. La Tabla 5 resume las ecuaciones obtenidas para cada una de las intervenciones modeladas.

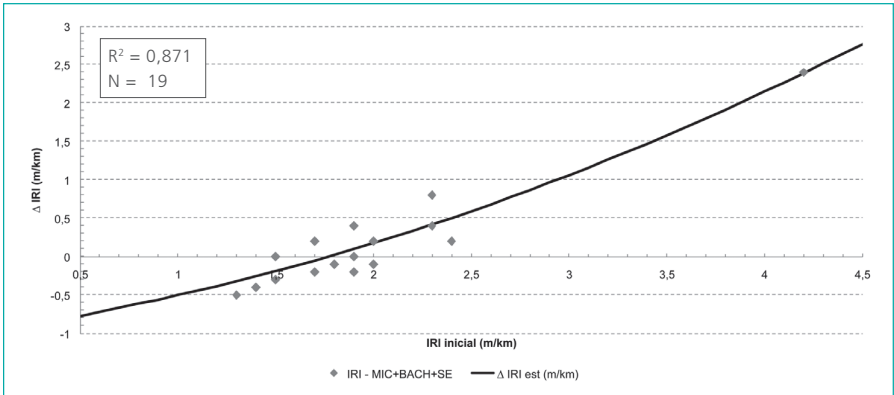
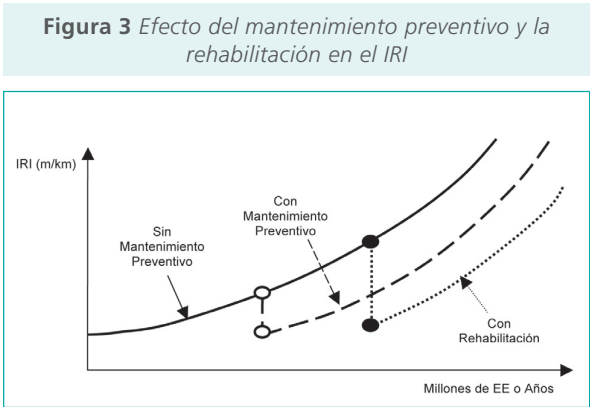


Figura 4 Gráfica de dispersión y regresión polinómica de ΔIRI vs IRI inicial para la aplicación de microaglomerado con bacheo y sello asfáltico (MIC+BACH+SE)

Tabla 5 Ecuaciones de estimación de caída de IRI y rango de efectividad

Tipo de intervención	Nomenclatura	Ecuación (m/km)	IRI inicial mínimo (m/km)
Bacheo	BACH	$\Delta IRI = 0,0590$	Sin restricción
Fresado + Recapado	FRE+REC	$\Delta IRI = 0,0157 \cdot (IRI_{inicial})^2 + 0,9066 \cdot IRI_{inicial} - 2,0501$	$IRI_{inicial} \geq 2,00$
Microaglomerado	MAF	$\Delta IRI = 0,5066 \cdot \ln (IRI_{inicial}) - 0,2206$	$IRI_{inicial} \geq 1,10$
Microaglomerado + Bacheo + Sello Asfáltico	MIC+BACH+SE	$\Delta IRI = 0,1025 \cdot (IRI_{inicial})^2 + 0,3725 \cdot IRI_{inicial} - 0,9840$	$IRI_{inicial} \geq 1,55$
Recapado	OVEA	$\Delta IRI = 0,1331 \cdot (IRI_{inicial})^2 - 0,0354 \cdot IRI_{inicial} - 0,2329$	$IRI_{inicial} \geq 0,90$
Sello Asfáltico + Bacheo	SE+BACH	$\Delta IRI = 0,0,175$	Sin restricción

3.5 Indicador de desempeño de estrategias de mantenimiento

Un aspecto central para la evaluación de distintas estrategias de mantenimiento es el contar con un indicador cuantitativo que permita compararlas. Este indicador constituye un complemento a los indicadores que usualmente se utilizan para evaluar programas de mantenimiento, como por ejemplo aquellos utilizados por el programa computacional HDM – 4.

Para estimar el indicador se requiere de los datos y modelos que se describieron en las secciones anteriores de este trabajo: modelos de tráfico, solicitudes, estado del pavimento y efecto de las intervenciones en el IRI.

El indicador de desempeño es de tipo agregado y cuantifica la efectividad de distintos planes de conservación en base al área encerrada bajo la curva de IRI que incluye los distintos tipos de intervenciones y la curva de progresión de IRI para la situación base.

Puesto que existe una relación inversa entre el IRI y la serviciabilidad que otorga el pavimento al usuario, mientras menor sea el área encerrada por ambas curvas de IRI, mejor será el desempeño de la estrategia de mantenimiento en términos de la serviciabilidad prestada al usuario. Por tanto, el indicador de desempeño del mantenimiento (I.D) relaciona el área bajo la curva mediante la ecuación 15.

I.D = 1 - (Area bajo curva IRIj / Area bajo curva IRI Caso Base) (15)

El indicador tiene como valor máximo 1 (situación ideal de IRI prácticamente nulo durante el período de eva-

luación) y un valor mínimo 0, correspondiente al indicador de desempeño del caso base, sin la aplicación de intervenciones.

4. Estudio de casos

El método desarrollado se aplicó a 3 tipos de pavimento con diversas edades. A estos se les aplicaron 3 estrategias de mantenimiento. Se compararon y se identificó el plan de mantenimiento de mejor desempeño. En la Tabla 6 se muestran variables de entrada requeridos para la evaluación de algunos tramos ejemplos. El año base de cálculo de TMDA fue el 2008.

Los planes de mantenimiento analizados se muestran en la Tabla 7. La denominación de las intervenciones sigue la convención de la Tabla 5.

El período de evaluación de los planes de conservación fue de 20 años, entre los años 2010 y 2030. En la Figura 5 se muestra la progresión de las curvas de IRI para 3 tipos de pavimentos flexibles considerados, bajo un mismo plan de conservación. En la Tabla 8 se muestran los indicadores de desempeño calculados con la ecuación 15.

Los resultados de la Tabla 8 muestran que en los pavimentos de nivel 10, el plan más eficiente es el N°2; en los pavimentos de nivel 19 y 22 es el Plan 1. En la Figura 5 se puede apreciar que los pavimentos de nivel 19 y 22 tienen un patrón de progresión de IRI similar, por lo cual es consistente que el mismo plan sea el más eficiente en ambos casos. En el caso del pavimento de nivel 10, en donde el valor de IRI inicial es casi el doble respecto de los otros niveles, el plan más eficiente es el que

Tabla 6 Valores de entrada requeridos para la evaluación de tramos de pavimentos

Variables de Entrada	Nivel en la Matriz		
	10	19	22
Región de Ubicación (Chile)	Biobío	Araucanía	Valparaíso
Año de Construcción	1990	1998	2003
Número Estructura (NE) (cm)	12,52	11,41	11,61
TMDA de camiones de 2 Ejes (C2E)	755	151	708
TMDA de camiones de más de 2 Ejes (C+2E)	1.853	595	805
TMDA de buses de 2 Ejes (B2E)	1.231	240	801
TMDA de buses de más de 2 Ejes (B+2E)	90	18	12

aplica una combinación de intervenciones funcionales más una rehabilitación. El resultado obtenido para los pavimentos de nivel 10 es consistente con los conceptos planteados en la sección 3.4 acerca de la dependencia del resultado de las intervenciones respecto del estado inicial del pavimento.

Tipo de Intervenciones y año de aplicación	Plan N° 1	Plan N° 2	Plan N° 3
	3	4	3
Tipo de Intervención 1	BACH	BACH	BACH
Año de Intervención 1	2012	2012	2015
Tipo de Intervención 2	MAF	BACH	FRE+REC
Año de Intervención 2	2015	2014	2018
Tipo de Intervención 3	OVEA	MIC+BACH+SE	MAF
Año de Intervención 3	2023	2018	2023
Tipo de Intervención 4		SE+BACH	
Año de Intervención 4		2022	

Tabla 7 Planes de conservación para comparación del desempeño en distintos pavimentos

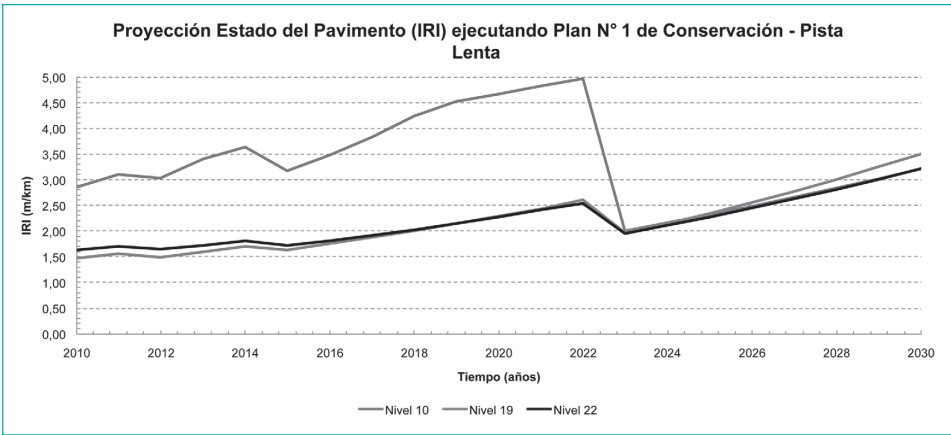


Figura 5 Ejemplo de curvas de IRI para distintos tipos de pavimentos flexibles bajo un mismo plan de conservación

Indicadores de desempeño (I.D)			
Nivel en la Matriz	Plan N° 1	Plan N° 2	Plan N° 3
10	0,34	0,45	0,40
19	0,17	0,14	0,09
22	0,18	0,15	0,11

Tabla 8 Valores de los indicadores de desempeño correspondientes a cada plan de conservación para los 3 tipos de pavimentos flexibles analizados

5. Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo propuso un modelo de evaluación técnica de desempeño de la mantención basada en datos de estado, inventario y seguimiento de pavimentos en Chile. En él se calibraron modelos específicos para describir las condiciones nacionales de tráfico, estado del pavimento, comportamiento en el tiempo y el efecto la conservación en el pavimento.

La incorporación de variabilidad en la proyección de tráfico en base a tasas de crecimiento, representa una mejora en la modelación global puesto que otorga una mayor cantidad de escenarios de evaluación del tramo de pavimento. Lo mismo ocurre con los factores de equivalencia de carga, lo que permiten configurar distintos escenarios de estimación de carga de vehículos pesados.

Las curvas de IRI obtenidas son específicas para los distintos tipos de pavimentos analizados y para las pistas lenta y rápida. Esto se debe por un lado a los diferentes niveles de solicitaciones, capacidad estructural y contexto climático en que se encontraban los grupos de tramos testigo. Además, los modelos calibrados para pista lenta y rápida resultaron estadísticamente diferentes debido esencialmente a la diferencia existente en las aplicaciones de carga en cada una de las pistas.

Los modelos que describen el efecto de las intervenciones sobre los pavimentos pueden aplicarse a todo tipo de pavimentos flexibles, considerando que para la estimación del efecto solo dependen del nivel de IRI en el que se encuentre el tramo de pavimento en evaluación. Asimismo, es importante mencionar que las intervenciones modeladas representan tanto el efecto de aplicaciones individuales como también conjuntos de aplicaciones sobre las curvas de comportamiento.

Los indicadores de desempeño obtenidos permiten, por un lado, comparar distintos planes de conservación (análisis *ex ante*), y por otro, evaluar la efectividad que tuvieron los planes de mantenimiento ya ejecutados (análisis *ex post*) con lo cual el modelo propuesto sirve no solo para planificar, sino que además para evaluar la eficiencia de planes ya aplicados.

Los resultados obtenidos en el caso de estudio ratificaron que la eficiencia de las estrategias depende en gran medida del estado inicial del pavimento y del impacto individual de las reducciones de IRI. Pavimentos con IRI más elevados requerirán estrategias de mayor impacto y, a la inversa, pavimentos con IRI más bajos requerirán técnica de menor impacto. Asimismo, se concluyó que no siempre el plan que tenga una mayor cantidad de intervenciones es el más eficiente, por lo cual es importante definir adecuadamente, además del tipo de intervención, la oportunidad de intervención.

Con el fin de mejorar la precisión de los modelos, es posible agregar variabilidad temporal a los parámetros estructurales (la deflexión por ejemplo), con lo cual es posible evaluar en forma directa los cambios de estado de la condición estructural año a año. Asimismo, los modelos de efectividad de las intervenciones en los pavimentos pueden perfeccionarse si se incorporan variables tales como espesores de las técnicas de rehabilitación o calidad de ejecución de la intervención, entre otras.

Otro aspecto importante de considerar es la integración de los resultados de este trabajo con las restricciones económicas, con el fin de generar una función de optimización de desempeño técnico y económico.

Referencias

1. Abaza, K. (2004). Deterministic performance prediction model for rehabilitation and management of flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 5(2), 111-121.
2. Al-Suleiman, T., Sinha, K. y Riverson, J. (1991). Effects of pavement age and traffic on maintenance effectiveness. *Journal of Transportation Engineering*, 117(6), 644-659.
3. De Solminiñac, H., Hidalgo, P., Salgado, M. y Valdés, M. (2003). Calibración de modelos de comportamiento HDM de pavimentos asfálticos a condiciones de Chile. Estudio de Seguimiento de Pavimentos Asfálticos. Ministerio de Obras Públicas, Chile.
4. Irfan, M., Khurshid, M.B., Labi, S. y Flora, W. (2009). Evaluating the cost-effectiveness of flexible rehabilitation treatments using different performance criteria. *Journal of Transportation Engineering*, 135(10), 753-763.
5. Kerali, H. y Odoki, J.B. (2000). *Volume 4 – Analytical framework and model descriptions*. The Highway Development and Management Series.
6. Li, Y., Cheetham, Al., Zaghoul, S., Helali, K. y Bakheet, W. (2006). Enhancement of Arizona pavement management system for construction and maintenance activities. *Transportation Research Record*, 1974, 26-36.
7. Lu, Q., Zhang, Y. y Harvey, J.T. (2008). Growth of truck traffic volume for mechanistic-empirical pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(3), 161-172.
8. NCHRP (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. NCHRP Report 1-37A, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, United States.
9. Papagiannakis, A.T., Bracher, M. y Jackson, N.C. (2006). Utilizing clustering techniques in estimating traffic data input for pavement design. *Journal of Transportation Engineering*, 132(11), 872-879.
10. Prozzi, A. y Hong, F. (2008). Transportation infrastructure performance modeling through seemingly unrelated regression systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 14(2), 129-137.
11. Tsunokawa, K., Van Hiep, D. y Ul-Islam, R. (2006). True optimization of pavement maintenance options with what-if models. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21, 193-204.