

IAG270-03-2013
INFLUENCIA DEL CLIMA EN LA PREDICCIÓN DE LA
PERFORMANCE DE PAVIMENTOS FLEXIBLES REHABILITADOS
SEGÚN LA MEPDG 2002
INFLUÊNCIA DO CLIMA NA PREVISÃO DO DESEMPENHO DOS
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS REFORÇADOS SEGUNDO A MEPDG 2002

Dr. Ing. Alejandro Tanco
Universidad Nacional de Córdoba
Córdoba, Argentina
atanco@efn.uncor.edu

Mgter. Ing. Miguel Rico
Universidad Nacional de Córdoba
Córdoba, Argentina
mrigo@efn.uncor.edu

Ing. Denise Brufman
Universidad Nacional de Córdoba
Córdoba, Argentina
brufmandenise@gmail.com

Resumen

Con el objeto de definir su influencia en la predicción de la performance de pavimentos flexibles rehabilitados este trabajo se centra en el análisis del clima como uno de los condicionantes de diseño considerados por la Guía MEPDG 2002. Para esto, analizando tramos de la Red Vial Nacional situados en la provincia de Córdoba, Argentina, se trabajó con la MEPDG en dos direcciones. Por un lado, se compararon para climas diferentes las predicciones obtenidas con los archivos hcd (hourly climatic database) generados en base a distintos supuestos relacionados con las precipitaciones y su hora de ocurrencia, y con el nivel de desagregación necesario para la definición de los restantes parámetros climáticos utilizados. Por otro lado, y con el fin de analizar la sensibilidad de la respuesta estructural y funcional de los pavimentos ante distintas condiciones y combinaciones climáticas, se compararon para diferentes climas las performances predichas por la MEPDG con los archivos hcd generados tal como lo recomienda la metodología. Los resultados obtenidos en el trabajo reflejan no sólo la importancia de utilizar datos climáticos locales sino también permiten extraer importantes conclusiones respecto a la utilidad de la información disponible en las estaciones meteorológicas y al esfuerzo requerido para relevar y procesar la información que debe ser provista al software de la Guía.

Resumo

Com o fim de definir a sua influência na previsão do desempenho dos reforços de pavimentos flexíveis este trabalho centra-se na análise do clima como um dos condicionantes do dimensionamento para o Guia MEPDG 2002. Para isso, analisando seções da Rede Rodoviária

Nacional da província de Córdoba, Argentina, trabalhou-se com a MEPDG em duas direções. Por um lado, para climas diferentes, compararam-se as previsões obtidas com os arquivos hcd (hourly climatic database) gerados com base em diferentes suposições em quanto as chuvas e seu tempo de ocorrência e o nível de desagregação necessário para a definição dos outros parâmetros climáticos utilizados. Por outro lado, e par analisar a sensibilidade da resposta estrutural e funcional do pavimento a diferentes condições e combinações climáticas foram comparados para diferentes climas desempenhos preditos pela MEPDG com arquivos hcd gerados como recomenda a metodologia. Os resultados obtidos no estudo mostram não só a importância do uso dos dados climáticos locais, mas também permitem extrair conclusões importantes sobre a utilidade da informação disponível nas estações meteorológicas e o esforço necessário para examinar e processar as informações que devem ser fornecidas ao software da Guia.

INTRODUCCIÓN

A fin de considerar uno de los parámetros que más afectan el comportamiento estructural y funcional de un pavimento, la MEPDG utiliza una sofisticada herramienta de modelación de efectos climáticos, denominada EICM (Enhanced Integrated Climatic Model), que simula en forma unidimensional los flujos de calor y humedad. Para esto, procesa la información ingresada por el usuario, ejecuta los cálculos necesarios y alimenta los componentes “materiales”, “respuesta estructural” y “predicción de la performance”, involucrando los parámetros que aceleran la ocurrencia de fallas o modifican las características de los materiales empleados. De esta forma, por ejemplo, el EICM evalúa los cambios de humedad en las capas granulares no tratadas, los cambios de temperatura en las capas asfálticas, el potencial de congelamiento, etc.

Este trabajo busca reflejar la influencia que tiene el clima, según la MEPDG, en la predicción de la performance de pavimentos flexibles rehabilitados. Se estudia no sólo la respuesta del modelo a distintas condiciones y combinaciones climáticas sino también su sensibilidad a diferentes formas de generación de los archivos climáticos, analizando la importancia de mantener el nivel de detalle requerido, planteado muchas veces como una limitación para el uso actual y futuro de la metodología.

CREACIÓN DE NUEVAS ESTACIONES

Para la simulación del daño, la MEPDG exige al menos 24 meses de información horaria de temperatura, precipitación, velocidad del viento, porcentaje de tiempo con cielo descubierto y humedad relativa. El Servicio Meteorológico Nacional Argentino (SMN) cuenta con una base de datos que reúne, en medios magnéticos y luego de pasar por controles de consistencia formal, interna, estadística y temporal, gran parte de estos registros. Para el desarrollo del trabajo esta información fue solicitada al SMN para el período 2006 - 2010, procesándose más de 5.000.000 de datos para la creación de 23 estaciones representativas de las provincias argentinas (una por provincia). La caracterización de estas estaciones, en términos de temperatura y precipitación media anual (TMA y PMA), es mostrada en la Figura 1.

Para generar las nuevas estaciones, y agregarlas a las incluidas por defecto en la Guía, son necesarios los archivos hcd conteniendo los parámetros horarios mencionados, el archivo station.dat con la información que identifica cada una de las estaciones y los archivos icm, generados internamente por el software a partir de los dos anteriores, con el primer y último día

de información, latitud y longitud de la estación, profundidad media anual de la napa freática, humedad media mensual, mes, día, año, hora de salida y puesta del sol, radiación solar máxima diaria, hora, temperatura, precipitación, velocidad del viento y porcentaje de tiempo con cielo descubierto.

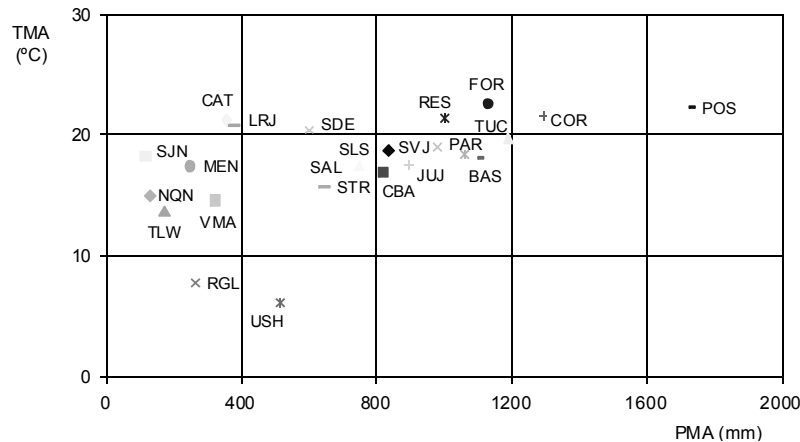


Figura 1: Caracterización de las estaciones meteorológicas creadas

CASOS ANALIZADOS

Debido a la dificultad que significa modelar cada uno de los tramos que conforman la vialidad de una provincia o país se recurrió al concepto de matriz de red como metodología para la elección de tramos representativos. El tránsito medio diario anual y el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) del año 2009 fueron los parámetros escogidos para la discretización de la Red Vial Nacional no concesionada de la Provincia de Córdoba.

De esta matriz, luego de analizar la cantidad y confiabilidad de información disponible, se seleccionaron tres tramos de las celdas representativas, denominados PC310, PC320 y PC420, sometidos en Noviembre de 2009 a la medición de deflexiones por impacto como parte de su evaluación estructural, hecho que permitió caracterizarlos estructuralmente en el nivel 1. Luego, a partir de las deflexiones D0' y D6 y de los trabajos de campo realizados, se definieron 5 secciones de comportamiento homogéneo para los tramos PC310 y PC420 y 4 para el tramo PC320 que consideraron, además de las variaciones del tránsito y la regularidad superficial, variaciones del paquete estructural y la subrasante. Para la tramificación se recurrió al método de las diferencias acumuladas descrito en el Apéndice J de AASHTO 93.

RESPUESTA A DISTINTAS CONDICIONES CLIMÁTICAS

Para analizar la respuesta de la MEPDG se consideraron los 14 tramos homogéneos (TH) recién descriptos, simulando en todos los casos la performance de un refuerzo de 5 cm de espesor sometido a distintas condiciones o combinaciones climáticas; el período de análisis fue de 5 años, compatible con la duración de los Contratos de Recuperación y Mantenimiento gestionados por la Dirección Nacional de Vialidad, estableciendo un caso base (Córdoba) con el que se compararon las fallas predichas en cada corrida. Los climas considerados, además de Córdoba (CBA), fueron Corrientes (COR, con altas temperaturas y precipitaciones medias, ver Figura 1),

Posadas (POS, con las temperaturas y precipitaciones medias más altas del país), Trelew (TLW, con bajas temperaturas y precipitaciones medias), Ushuaia (USH, con bajas precipitaciones y la temperatura media más baja del país), Buenos Aires (BAS, temperaturas medias similares a las del caso base pero con mayores precipitaciones medias) y Mendoza (MEN, temperaturas medias similares a las del caso base pero con menores precipitaciones medias).

El EICM define el perfil de temperatura del pavimento cada 6 minutos, representándola mensualmente mediante una distribución normal de media μ y desvío estándar σ con el fin de incluir el daño causado por las temperaturas extremas no considerado con el uso de valores medios. Para tener en cuenta estas condiciones, el mes es dividido en cinco períodos adoptando para cada uno de ellos las temperaturas correspondientes a las frecuencias acumuladas de 10, 30, 50, 70 y 90% (quintiles) a las que se supone circulará el 20% del tránsito mensual esperado.

La Figura 2 muestra la variación, respecto a Córdoba, del ahuellamiento predicho al final del período para el TH3 del tramo PAC420. Cabe destacar que las máximas variaciones fueron de 53,0% en el TH2 del tramo PC420 y de -54,7% en el TH5 del tramo PC420 para los climas de POS y USH respectivamente, con temperaturas y precipitaciones extremas. Como era de esperar las predicciones fueron respecto al caso base mayores para los climas con temperaturas medias mayores (Posadas y Corrientes) y menores para Trelew y Ushuaia con temperaturas medias menores.

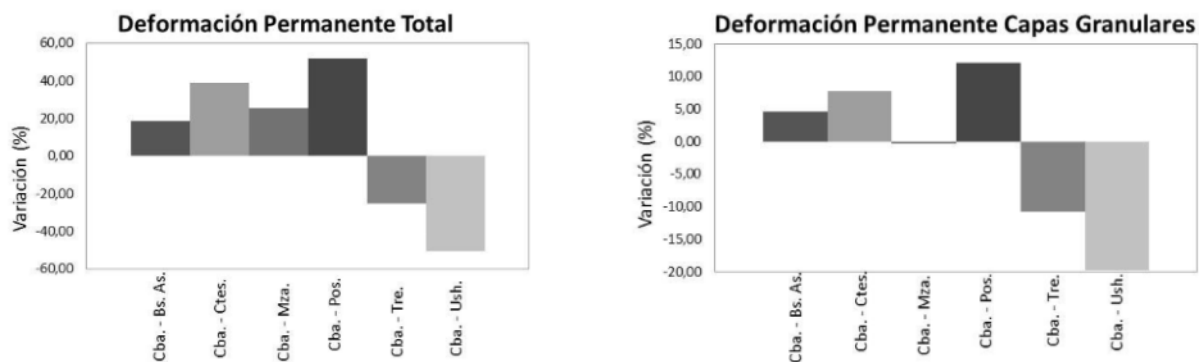


Figura 2: Variación del ahuellamiento respecto a CBA (TH3 PC420)

En el caso de los climas BAS, MEN y CBA, con temperaturas medias similares, las predicciones no reflejaron las diferencias que existen en cuanto al nivel de precipitaciones ya que, como se observa, MEN presenta mayores deformaciones totales que CBA a pesar de tener una precipitación media menor; el comportamiento fue no obstante el esperado para la componente de deformación de las capas granulares, afectada por el contenido volumétrico de humedad.

En cuanto a las capas asfálticas, los módulos predichos por la Guía son más altos para CBA, siguiéndole BAS y MEN para el que se obtuvieron las mayores deformaciones. Esto se debe a que, a pesar tener temperaturas medias similares, el clima de Mendoza muestra mayores rangos de temperaturas con registros más elevados durante los días calurosos y más bajos durante los días fríos. La Figura 3 presenta para el TH3 los quintiles simulados por el modelo en cada caso, en la superficie del pavimento y durante Enero y Julio.

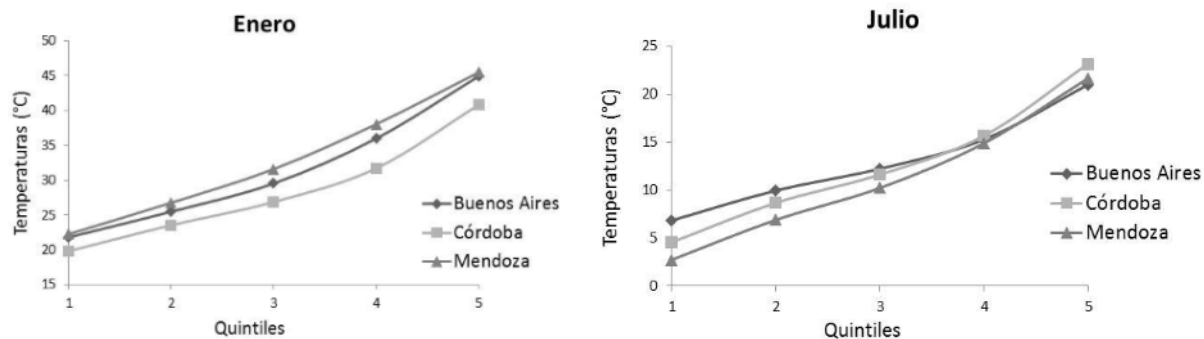


Figura 3: Quintiles adoptados para Enero y Julio TH3 PC420

El peso que tienen sobre la deformación permanente total las componentes asfáltica y granular depende de los módulos y espesores relativos de cada capa. Así, por ejemplo, para los tramos PC310 y PC320 las predicciones “asfálticas” y “granulares” siguen el comportamiento descripto pero el ahuellamiento total es para BAS mayor que para MEN.

En cuanto a la fisuración por fatiga clásica las simulaciones registraron diferencias de hasta el 594,8% (aunque con valores absolutos bajos) para el TH5 del PC420 para POS y de -74,8% para el TH1 del PC420 para USH.

En la fisuración longitudinal, por su parte, se obtuvieron diferencias que alcanzaron el 145,8% para el TH4 del PC420 para POS y -82,9% para el TH2 del PC420 para USH. Como puede apreciarse, en ambos tipos de fisuración las máximas diferencias correspondieron a los climas con temperaturas medias extremas, reflejándose nuevamente la influencia de este parámetro.

Finalmente, respecto a la rugosidad, las predicciones siguieron el mismo patrón que las deformaciones permanentes, dada la influenciada de la temperatura y el peso que tiene el ahuellamiento en el cálculo de la rugosidad; se obtuvieron variaciones de hasta 9,8% para el TH5 del PC420 para POS y de -10,4% para el TH4 del PC320 para USH. A modo de ejemplo, la Figura 4 muestra la variación respecto a CBA del TH3 del PC420.

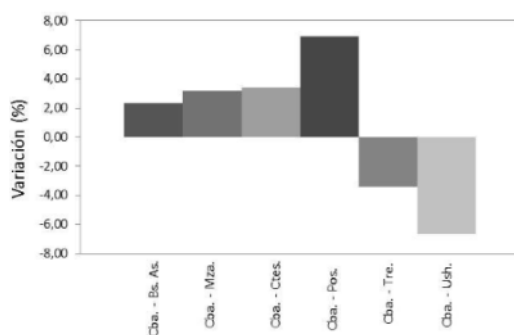


Figura 4: Variación de IRI respecto a CBA (TH3 PC420)

SENSIBILIDAD A LA GENERACION DE ARCHIVOS

Con el fin de analizar la sensibilidad de la MEPDG a diferentes formas de generación de los archivos climáticos, se consideraron los tramos PC310, PC320 y PC420 pero caracterizados a través de sus valores medios de deflexión, espesor, etc.; se simuló durante 10 años la performance de un refuerzo de 5 cm de espesor considerando, además del de Córdoba, los climas de Corrientes (COR), Trelew (TLW) y Buenos Aires (BAS).

Precipitaciones

Debido a que el SMN recolecta y almacena el parámetro precipitación sobre una base diaria, se asumió como hipótesis inicial que ésta se produjo siempre a las 12:00 hs. Luego, para comprobar la variación producida al asignarla a otro momento del día, se crearon archivos climáticos con las precipitaciones ocurriendo a las 7.00 hs. y 15.00 hs., horarios en los que aproximadamente se registran las temperaturas mínimas y máximas diarias. Los resultados del análisis mostraron a la MEPDG insensible a estos cambios, no observándose para ningún clima y tipo de falla diferencias entre los valores obtenidos en cada caso.

Temperaturas medias diarias

Con la idea de evaluar la incidencia en las predicciones del nivel de detalle utilizado, se compararon los resultados obtenidos con temperaturas horarias, tal como lo requiere la MEPDG, con los resultados obtenidos con temperaturas diarias promedio; para esto, se crearon los archivos climáticos necesarios repitiendo durante las 24 hs. del día los valores medios de los 5 parámetros a definir. Trabajar de esta forma supone no sólo un ahorro de tiempo en el procesamiento de datos sino también la posibilidad utilizar la metodología a partir de estaciones meteorológicas con menor detalle de registro.

Temperaturas medias calculadas

Para obtener las temperaturas medias diarias se promediaron las temperaturas horarias suministradas por el SMN. En la Tabla 1 se muestran, para el tramo PC420 y el clima de TRE, los quintiles, medias y desvíos estándares de la temperatura simulados para el mes de enero en el punto medio de la subcapa 1 (refuerzo). En cada simulación, la MEPDG resume esta información para cada mes del año y para cada subcapa en la que divide la estructura.

Tabla 1: Quintiles, medias y desvíos de temperatura (PC420)

Temperaturas	1° Quintil (°C)	2° Quintil (°C)	3° Quintil (°C)	4° Quintil (°C)	5° Quintil (°C)	Temp. media (°C)	Desvío estándar (°C)
Horarias	15,8	20,8	25,4	30,9	37,4	26,0	7,8
Promedio	18,8	22,5	25,5	29,7	34,7	26,3	5,7

Aunque en todos los meses del año existieron diferencias entre una u otra forma de definir las temperaturas, los resultados son más importantes para los meses más cálidos dada la sensibilidad de las deformaciones permanentes. La Figura 5 presenta, a modo de ejemplo, las curvas de distribución de las temperaturas y los quintiles simulados para la subcapa 1 del tramo PC420 durante el mes de Enero. Como puede verse, al trabajar con valores medios se tienen por un lado

distribuciones más achatadas y con mayor desvío, y por el otro, temperaturas mayores para los primeros quintiles y menores para los últimos. Dadas estas diferencias en los quintiles y el efecto de las altas temperaturas en las deformaciones permanentes, los valores de ahuellamiento son mayores para el caso horario. En la Tabla 2 se resumen los porcentajes de diferencia obtenidos.

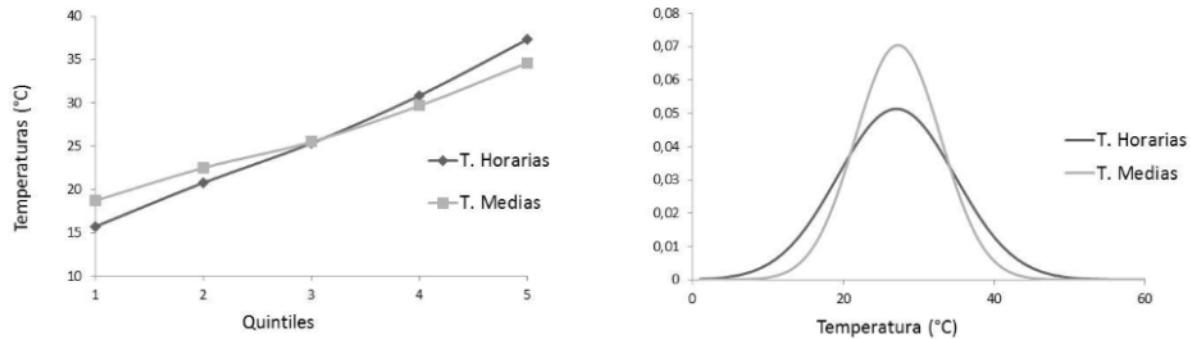


Figura 5: Distribución y quintiles de temperaturas (PC420, TRE, Enero)

Tabla 2: Diferencia en predicción de ahuellamiento (PC420, TRE)

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diferencia medio - horario (%)	-2,0	-3,0	-2,9	-3,4	-3,5	-3,8	-3,9	-4,2	-4,2	-4,4

Para el mismo tramo, mes y subcapa pero simulado con el clima de CBA, se obtuvieron los quintiles, medias y desvíos estándares mostrados en la Tabla 3; la Figura 6, por su parte, muestra las curvas de distribución de frecuencias y los quintiles simulados.

Tabla 3: Quintiles, medias y desvíos de temperatura (PC420, CBA)

Temperaturas	1° Quintil (°C)	2° Quintil (°C)	3° Quintil (°C)	4° Quintil (°C)	5° Quintil (°C)	Temp. media (°C)	Desvío estándar (°C)
Horarias	20,3	24,0	27,2	31,9	40,4	28,8	7,4
Promedio	22,2	24,7	28,0	32,6	39,2	29,3	6,3

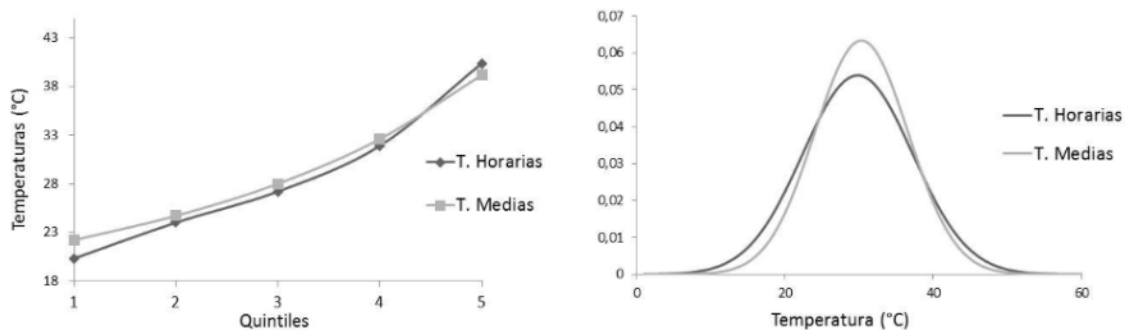


Figura 6: Distribución y quintiles de temperaturas (PC420, CBA, Enero)

La curva de distribución muestra en el caso de las temperaturas medias un pico corrido levemente hacia la derecha debido a la menor variación de temperaturas y a la menor cantidad de ciclos de enfriamiento y calentamiento de la mezcla lo que le permite mantener una temperatura algo superior. Lo mismo ocurre para los restantes climas, acentuándose el desplazamiento y la diferencia entre los quintiles respecto al caso horario, a medida que la temperatura media aumenta. La Tabla 4 resume las diferencias predichas de ahuellamiento entre el caso medio y el caso horario. En general, las variaciones fueron pequeñas alcanzándose valores de -4,4% para el tramo PC420 con el clima TRE y de 3,4% para el mismo tramo con el clima COR.

Tabla 4: Diferencia en las predicciones de ahuellamiento (PC420, CBA)

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diferencia medio - horario (%)	0,8	0,6	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1

En el caso de la fisuración por fatiga, tanto descendente como ascendente, las diferencias fueron pequeñas en la mayoría de los casos. Por ejemplo, para el tramo PC420 y el clima TRE, la variación de fisuración descendente llega a un 25,4% al final del período de análisis pero con valores absolutos de área fisurada del orden del 0,025%. Para el mismo tramo, la fisuración ascendente mostró una variación del 36,6% para el clima COR pero con un área fisurada de 1,66%. En esta falla no se distingue una tendencia clara de las diferencias debido a que las tensiones críticas consideradas, en la parte superior e inferior de la capa asfáltica, dependen de su espesor.

Finalmente, y como consecuencia de todo lo anterior, la rugosidad (medida a través del IRI) se ve afectada mostrando un patrón de comportamiento similar al del ahuellamiento; las variaciones, no obstante, fueron en todos los casos menores al 2,0%. Cabe destacar que en la determinación del IRI interviene un factor de lugar (SF), calculado por la MEPDG según la Ecuación 1, que depende de la edad del pavimento o refuerzo (Age), del índice de plasticidad del suelo de subrasante (PI), del nivel de precipitaciones (Precip) y del índice de congelamiento (FI).

$$SF = Age \times [0,02003 \times (PI + 1) + 0,007947 \times (Precip + 1) + 0,000636 \times (FI + 1)] \quad (1)$$

Debido a que el índice de congelamiento se calcula sumando todas las temperaturas del año por debajo de los 0°C, los FI serán diferentes si se trabaja con temperaturas horarias o con temperaturas medias ya que considerando los promedios no se registrarán las horas del día que pueden tenerse con temperaturas bajo cero. Estas variaciones en el FI son sólo considerables cuando los climas son fríos; por ejemplo, dentro de los climas analizados, la mayor diferencia se obtuvo para TRE donde se registró un FI = 54,5 para temperaturas horarias y un FI = 7,6 para temperaturas medias. Además, en climas fríos, la influencia del ahuellamiento será menor que en climas templados por lo que la incidencia factor de lugar aumenta. A pesar de estas observaciones, las variaciones finales obtenidas por estas circunstancias no son significativas.

Temperaturas medias del SMN

Por último, y ya que el cálculo de promedios a partir de valores horarios no significaría ningún tipo de ahorro ni simplificación, se repitió el mismo análisis pero creando los archivos climáticos

con los valores medios diarios recibidos directamente del SMN. Los resultados obtenidos con ambos promedios fueron similares, tal como lo muestra la Tabla 5 para el tramo PC420 y el clima TRE. Las diferencias encontradas, debidas a errores cometidos durante el procesamiento de datos en uno u otro caso, son pequeñas y reflejan que, aún trabajando con valores medios con algún error de procesamiento, las predicciones continúan siendo aceptables.

Tabla 5: Diferencia en las predicciones de fallas (PC420, TRE)

Año	IRI		Def. permanente		Fis. descendente		Fis. ascendente		Fis. refleja	
	Medio - Horario	Medio SMN - Horario	Medio - Horario	Medio SMN - Base	Medio - Horario	Medio SMN - Base	Medio - Horario	Medio SMN - Base	Medio - Horario	Medio SMN - Base
1	-0,1	-0,1	-2,0	-1,8	-17,1	-16,3	-0,2	-0,1	0,0	-0,05
2	-0,3	-0,3	-3,0	-3,3	-24,0	-24,2	-0,7	-0,7	0,0	-0,04
3	-0,4	-0,3	-2,9	-2,8	-24,6	-23,7	-0,6	-0,6	0,0	-0,04
4	-0,5	-0,5	-3,4	-3,6	-25,9	-25,8	-0,7	-1,0	0,0	-0,05
5	-0,6	-0,5	-3,5	-3,5	-26,3	-25,6	-0,8	-0,9	0,0	-0,05
6	-0,7	-0,7	-3,8	-4,0	-26,5	-26,4	-1,3	-1,4	0,0	-0,05
7	-0,8	-0,8	-3,9	-3,9	-26,4	-25,7	-1,5	-1,6	0,0	-0,05
8	-1,0	-0,9	-4,2	-4,3	-26,2	-25,9	-1,7	-1,9	0,0	-0,05
9	-1,1	-1,0	-4,2	-4,2	-25,6	-24,9	-1,8	-1,9	0,0	-0,05
10	-1,2	-1,1	-4,4	-4,5	-25,4	-25,1	-2,2	-2,4	0,0	-0,05

CONCLUSIONES

Queda demostrado que la performance predicha por la MEPDG 2002 es influenciada significativamente por el clima considerado, haciéndose sumamente necesaria la creación de estaciones meteorológicas que se correspondan con las condiciones reinantes en la zona de emplazamiento del proyecto.

Con el uso de parámetros horarios, las performances predichas no registraron diferencias importantes respecto a las obtenidas con valores medios diarios. De esta forma, además de delimitar el volumen y esfuerzo requerido para relevar y procesar la información necesaria, podrán incluirse dentro de las estaciones meteorológicas disponibles aquellas que sólo registren parámetros climáticos sobre una base diaria.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C., USA.
- National Cooperative Highway Research Program (2004) *Guide for Mechanistic - Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures*. Final Report. Illinois, USA.
- Odoki J., Keralih. (2000). *The Highway Development and Management Series - Volume 4: Analytical Framework and Model Descriptions*. World Bank Publications, Washington, D.C., USA.

Rico M., Tanco A. y Haisama M. (2012). *Comparando MEPDG 2002, AASHTO 93 y HDM-4*, XXXVII Reunión del Asfalto, XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Córdoba, Argentina.