

EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS PAVIMENTOS CARRETEROS

Autores.

MC Juan Fernando Mendoza Sánchez

Instituto Mexicano del Transporte – Secretaría de Comunicaciones y Transportes

fernando.mendoza@imt.mx

Ing. Omar Alejandro Marcos Palomares

Instituto Mexicano del Transporte – Secretaría de Comunicaciones y Transportes

omarcos@imt.mx

Resumen

El presente artículo resume la experiencia internacional sobre los efectos que el cambio climático está teniendo sobre los pavimentos, donde los diferentes estresores climáticos exacerbados por el calentamiento global están afectando el desempeño de los materiales, la estructura del pavimento, los métodos de diseño y el mantenimiento.

Conocer el panorama sobre los efectos que el cambio climático presenta en los pavimentos, permite conocer los riesgos y dar inicio a un proceso de valoración para que bajo un esquema de adaptación se puedan implementar acciones que permitan asegurar la resiliencia de los pavimentos. Algunas acciones de adaptación son mostradas en éste artículo.

Aunque aún existe mucha incertidumbre sobre el clima futuro, los efectos actuales del clima no dejarán de afectar los pavimentos en el corto plazo, por lo que se deben tomar acciones inmediatas para garantizar la satisfacción de los usuarios de las carreteras, las cuales se presentan como conclusiones finales de este trabajo.

Palabras clave: pavimentos, cambio climático, adaptación al cambio climático.



1. Introducción

En años recientes las autoridades de carreteras han tenido que hacer frente a los efectos que el cambio climático está provocando a los pavimentos. Los eventos climáticos extremos que a nivel global se presentan son el aumento de las temperaturas y el incremento del nivel del mar, los cuales han modificado los patrones climáticos actuales, provocando un aumento de frecuencia e intensidad de diferentes fenómenos asociados al clima.

La infraestructura carretera ha sido impactada por diferentes eventos climáticos extremos, tales como: inundaciones, olas de calor, sequías, lluvias intensas, huracanes, granizadas, heladas, etc., y se prevé en el futuro inmediato que los efectos del cambio climático se seguirán presentado.

Existe evidencia que la presencia de diferentes fenómenos climáticos, y su aumento en frecuencia e intensidad, contribuyen significativamente al deterioro de los pavimentos carreteros. Es por ello que para minimizar los costos del mantenimiento y conservación de los pavimentos, será necesario identificar las variables climáticas que están acelerando su deterioro, para que analizando dicha información se puedan establecer estrategias de adaptación para los pavimentos

La presente investigación describe el impacto que el cambio climático está teniendo sobre los pavimentos, particularmente en los asfálticos, cuya vulnerabilidad depende de factores tales como la condición actual del pavimento, su localización, el tránsito y la proximidad a los cuerpos de agua.

2. Efecto del cambio climático en las carreteras

Existe evidencia que el clima extremo afecta la infraestructura carretera y el nivel de servicio que ofrece a sus usuarios, ya que las variaciones del clima y sus condiciones extremas se presentan más frecuentemente debido al cambio climático.

También existe evidencia que el diseño de las carreteras y su construcción, históricamente ha incluido variables climáticas, pues el clima siempre ha sido un factor que afecta el desempeño de las carreteras, sin embargo, los desafíos de un clima cambiante está forzando a mover los umbrales actuales de diseño e incluso generar nuevos métodos para construir infraestructura carretera resiliente.



En los últimos años se han realizado varios trabajos en relación a la identificación de los impactos potenciales del cambio climático en la infraestructura carretera, es común asociarlos a los principales efectos del calentamiento global, tal y como se muestra en la tabla 1 siguiente.

Tabla 1. Impactos del cambio climático en las carreteras

Efecto del cambio climático	Efecto en las carreteras
Cambios en la temperatura	<ul style="list-style-type: none">• Rápido deterioro del pavimento asfáltico debido a un calentamiento prolongado.• Daños a la subestructura por la pérdida de la capa de permacongelamiento.• Incremento de los costos de mantenimiento y de construcción.
Cambios en la precipitación	<ul style="list-style-type: none">• Incremento de inundaciones en el camino.• Incremento de la erosión del suelo.• Incremento de la erosión en las alcantarillas.• Saturación de alcantarillas y obras de drenaje por precipitaciones excesivas.
Aumento del nivel del mar	<ul style="list-style-type: none">• Erosión de la base• Inundación permanente de la carretera
Marejadas de tormenta	<ul style="list-style-type: none">• Inundación temporal y pérdida de la conectividad a carreteras• Cierre parcial de las carreteras por daños, tales como obstrucción de los sistemas de drenaje o acumulación de desechos.

Fuente: USAID, 2012

En general, el transporte puede ser vulnerable a muchos tipos de condiciones climáticas, de las cuales, algunas podrían exacerbarse con el cambio climático. La mayoría de los impactos se deben a condiciones climáticas extremas (por ejemplo, tormentas severas, precipitaciones intensas, temperaturas extremas) que, a su vez, pueden tener graves consecuencias para el medio físico (por ejemplo, inundaciones, deslizamientos, avalanchas, etc.) y representan riesgos para las infraestructuras carreteras y su operación, impactando al transporte.

Para los tomadores de decisiones es importante conocer y evaluar los daños potenciales que estresan los sistemas viales debido al impacto del clima, de esta manera se puede conocer la vulnerabilidad del sistema y los factores inherentes a dicha vulnerabilidad, así como el grado de exposición que tendrá la



infraestructura al estar en contacto con las nuevas condiciones climáticas y el riesgo en términos de probabilidad que la infraestructura falle.

Los impactos del cambio climático son variados, y están asociados a diversos fenómenos climáticos que afectan la infraestructura carretera, por lo que se requieren análisis más focalizados en los diversos elementos de la infraestructura, atendiendo a ello el presente artículo se centró únicamente en los pavimentos.

3. El clima y los pavimentos

El clima siempre ha sido el principal factor que afecta el desempeño de un pavimento carretero, aunque el daño también puede deberse a otros factores, tales como las características del pavimento (materiales y estructura); tránsito, geología de la subyacente, geografía y topografía. Estos últimos factores son la causa común de la falla de un pavimento, pero si asociamos un evento climático extremo la falla es catastrófica.

Algunos efectos a los pavimentos están asociados entre sí, *Willway et al* (2008), describe los siguientes ejemplos: grandes volúmenes de tránsito provocan daños al pavimento cuando éste está mojado, o altas temperaturas y alta presencia de vehículos pesados provocan surcos en el pavimento.

El cambio climático no genera nuevos impactos en los pavimentos, sin embargo, si acelera su deterioro y aumenta la probabilidad de ocurrencia de los efectos bajo la presencia de fenómenos climáticos extremos.

Este apartado resume los principales impactos asociados al clima, ya sea a los materiales que integran los pavimentos, la superficie de rodadura y las capas estructurales del pavimento, particularmente los asfálticos.

La vulnerabilidad es el grado en que un sistema es susceptible o incapaz de afrontar los efectos adversos del cambio climático, incluyendo las variables climáticas y el clima extremo. Existen diferentes métodos para entender y evaluar la vulnerabilidad, sin embargo, en el presente artículo usaremos dicho término para referirnos al efecto que tendría el pavimento asfáltico bajo un fenómeno climático, y que de acuerdo al diseño estándar del mismo es incapaz de asegurar su integridad y mantener su grado desempeño a lo largo de su vida útil.

3.1 Vulnerabilidad de los materiales

Los fenómenos hidrometeorológicos incrementan la humedad en los materiales en los pavimentos, provocando desprendimiento de agregados en la superficie (pérdida de adhesión). Las piedras calizas son menos propensas a éste efecto que los agregados como el granito o la cuarcita, lo mismo ocurre para los asfaltos viscosos que son menos propensos a los desprendimientos, y los aditivos como las aminas y la cal hidratada pueden ayudar a reducir esta vulnerabilidad.

Una capa de asfalto vulnerable es aquella que retiene agua sobre ella, su acumulación promueve el surgimiento de desprendimientos en localizadas áreas que al paso del tiempo provocarán una desintegración de la capa asfáltica.

El endurecimiento por edad del asfalto es un proceso normal, el cual depende de la temperatura, el tiempo y el espesor de la capa. Un excesivo endurecimiento puede provocar una capa quebradiza, incrementado los agrietamientos y desgaste. La temperatura provoca el endurecimiento de la carpeta asfáltica, perjudicando su desempeño siendo menos flexible. La oxidación y un índice excesivo de rayos UV generan un excesivo endurecimiento del asfalto.

3.2 Vulnerabilidad de la estructura de los pavimentos

Una causa de daño a la estructura del pavimento es el congelamiento, fenómeno que aumenta la rigidez de la estructura y provoca agrietamiento, así como una disminución de la resistencia al deslizamiento de los vehículos. Temperaturas frías matutinas generan tensión térmica y pueden iniciar la propagación de grietas.

Cuando el agua entra al pavimento, el proceso de congelamiento en invierno o descongelamiento en primavera, produce expansión y contracción del pavimento, generando tensión y estrés a la estructura, y puede generar grietas que se propagan en toda la estructura. La vulnerabilidad depende de las características de los materiales que conforman el pavimento.

La resistencia al deslizamiento está en la textura de la superficie del pavimento, la cual es alterada por la temperatura y las precipitaciones intensas. La tasa de pulido de la superficie depende del tránsito y del tipo de agregado, sin embargo, las altas temperaturas expanden la carpeta asfáltica disminuyendo la



resistencia al deslizamiento (exudado de asfalto). Las altas temperaturas reducen la resistencia de la mezcla asfáltica haciéndola más deformable.

Las altas temperaturas (mayores a 45°C) aceleran la deformación de la carpeta asfáltica, por lo que la aparición de roderas, canalizaciones (blandones) y ondulaciones aumenta. Estas deformaciones de la sección transversal y longitudinal afectan la operación del tránsito. La susceptibilidad a las deformaciones por temperatura se debe principalmente al tipo de mezcla. Si las deformaciones no son reparadas inmediatamente estas acumulan agua generando hidroplaneo en los vehículos comprometiendo su seguridad, y adicionalmente el agua puede filtrarse a las capas de base y sub-base, que al aumentar su humedad pierdan su capacidad de soporte.

Otro efecto de la temperatura es la alteración del módulo de rigidez del pavimento, volviéndose más sensible. Esta sensibilidad a la temperatura puede provocar agrietamientos por fatiga y una posterior deformación estructural.

Los agrietamientos de la carpeta asfáltica también se deben a un excesivo endurecimiento provocado por un alto índice de rayos UV y una alta oxidación, bajo la influencia de uno o varios factores ambientales como las olas de calor.

En altas temperaturas las mezclas asfálticas pueden acelerar el proceso de relajación de los componentes viscoelásticos de la mezcla, provocando exudación, mientras que a bajas temperatura el proceso de relajación puede tomar más tiempo, por lo que la tensión provocada a la carpeta puede inducir su agrietamiento.

Cuando en un pavimento asfáltico, su capa de base es estabilizada con cemento, éste puede presentar problemas de contracción en periodos de sequía o periodos largos de humedad, particularmente en suelos arcillosos, generando la formación de grietas en la base estabilizada que al peso del tiempo se reflejaran en la superficie del pavimento. Sin tratamiento, las precipitaciones intensas pueden saturarlas y propiciar la generación de más agrietamientos.

Las precipitaciones intensas dañan la película asfáltica que recubre el pavimento, por lo que se vuelve más susceptible la carpeta asfáltica permitiendo que el agua penetre a las diferentes capas del pavimento como consecuencia de la presión hidráulica, así como comenzar a generar desprendimientos. La falta de mantenimiento promueve más activamente éste tipo de daño a través de las grietas. Las zonas más vulnerables son las juntas de construcción.



En zonas inundables se recomienda el uso de pavimentos permeables, sin embargo, las llantas de los vehículos, particularmente los de carga, puede forzar que el agua se introduzca a la carpeta, esta presión hidráulica aumenta el deterioro del pavimento, con mayor impacto en capas delgadas. Dicha presión en pavimentos normales promueve la exposición de los agregados de la carpeta asfáltica.

3.3 Influencia del clima en los métodos de diseño

Las temperaturas del pavimento son mayores a las del aire por lo que promueven la fatiga del asfalto y deformaciones estructurales inducidas por el tránsito, las cuales provocan tensión en el pavimento. El módulo de rigidez disminuye si la temperatura del pavimento incrementa, por lo que el pavimento se deformaría aun y que los esfuerzos inducidos por el tránsito continúen siendo los mismos. Por lo que se debe considerar un análisis en el método de diseño para evaluar la sensibilidad del parámetro “temperatura del pavimento”. Un ejemplo de éste impacto fue realizado por el *Transportation Research Laboratory*, y cuyos resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Evaluación de la sensibilidad de la temperatura en el desempeño del pavimento

Capa	Espesor (mm)	Módulo de rigidez para condiciones estándar (GPa)	Incremento de la temperatura del pavimento (GPa)	
			1°C	2°C
Carpeta	35	2.0	1.84	1.69
Base	315	5.4	4.97	4.57
Sub-base granular	225	0.15	0.15	0.15
Sub-rasante	Variable	0.05	0.05	0.05
Vida útil del Pavimento	-	36 msa	30 msa	24 msa

*msa (million standard axles)

Fuente: TRL, 2008.

Cuando se trata de pavimentos compuestos, cuya base es estabilizada con cemento por ejemplo, el efecto de la temperatura puede comportarse de



manera diferente, ya que la temperatura del pavimento se reduce conforme la profundidad. Pero debido a la rigidez de la capa de base, se incrementa el riesgo de agrietamiento prematuro. Sin embargo, no se identificaron métodos que aborden como este efecto modifica el resultado del diseño del pavimento.

El Método de Diseño Mecanicista para Pavimentos (MEPDG, por sus siglas en inglés) puede considerar algunas variables climáticas, tales como la temperatura, precipitación y ciclos de congelamiento/descongelamiento.

La modificación de los perfiles de temperatura y humedad en la estructura del pavimento y suelos sobre la vida de diseño de un pavimento se consideran en MEPDG a través del Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM, por sus siglas en inglés). El EICM es un programa unidimensional de flujo de calor y humedad acoplado que simula los cambios en el comportamiento y las características de los materiales de pavimento y base, junto con las condiciones climáticas durante varios años de operación.

De acuerdo a *Li et al* (2011, algunas de las variables climáticas que pueden ser adaptadas para que consideren los efectos del cambio climático en los pavimentos son las siguientes:

- Temperaturas en la superficie y en el punto medio de cada subcapa unida al asfalto. Estos valores se someten a un análisis estadístico para cada período. La media, la desviación estándar se utilizan en los modelos de predicción de fatiga y de deformación permanente.
- Valores de la temperatura horaria en la superficie y su incremento a una profundidad determinada (cada pulgada) dentro de las capas se utilizan en el modelo de grietas térmicas.
- Contenido volumétrico de humedad. Se indica un valor promedio en cada subcapa para su uso en el modelo de deformación permanente de los materiales no unidos (granulares).
- Se genera un perfil de temperatura por hora en los valores del PCC para ser usados en los modelos de agrietamiento y falla para pavimentos JPCP y CRCP.
- El número de ciclos de congelación-descongelación y el índice de congelación se calculan para su utilizarse en el modelo de predicción del rendimiento del pavimento JPCP.
- Los valores de humedad relativa para cada mes se generan para su uso en el modelado de los gradientes de humedad de JPCP y CRCP a través de la losa.



Otro de los métodos más utilizados en México, como el AASHTO (1993), el cual para el diseño de pavimentos flexibles proporciona un sistema para ajustar los coeficientes estructurales en forma tal que tomen en consideración los niveles de drenaje sobre el comportamiento futuro del pavimento. El efecto de la calidad del drenaje sobre la estructura del pavimento se toma en cuenta a través de un "factor de ajuste (m)", y por el cual se multiplican los coeficientes estructurales de la base o de la sub-base. El factor de ajuste (m) es función de las características de drenaje del suelo de cimentación y del tiempo durante el cual la sub-rasante podrá estar en condiciones de saturación. Estos valores no han sido revisados bajo las condiciones climáticas actuales.

Por último, el método UNAM no considera directamente variables climáticas para el diseño, pero parámetros como el Valor Relativo de Soporte (VRS) establece la baja capacidad de carga de los suelos, cuando estos se encuentran con alta acumulación de agua, así como el módulo de rigidez de la carpeta considera que la temperatura influye significativamente en los resultados, por lo que se debe tener cuidado al seleccionar dicho valor (Modulo 5 del Programa DISPAV).

3.4 Influencia del clima en el mantenimiento

Los cambios en el clima también afectan las prácticas actuales para el mantenimiento de los pavimentos.

Las altas temperaturas y periodos prolongados de calor afectarán significativamente las horas de trabajo bajo el sol, por lo que se reducirán las jornadas laborables, y puede modificar los programas de mantenimiento, para modificar los meses de trabajo y las horas de trabajo.

Durante las acciones de conservación en el bacheo o colocación de sobrecarpetas, las temperaturas de colocación de estas pueden no disiparse rápidamente para que la carretera sea abierta al tránsito rápidamente, particularmente bajo ondas de calor prolongadas. En el caso de abrirse al tránsito la carretera, la capa recién colocada será susceptible a las deformaciones por el paso de los vehículos.

La tasa de enfriamiento de los materiales asfálticos también se verá afectada, por los cambios en los factores ambientales, tales como cambios en las temperaturas y la intensidad de los vientos. Las bajas temperaturas limitaran el



tiempo de trabajo para conformar la carpeta asfáltica, por lo que la compactación no será la adecuada. Estas temperaturas bajas también promueven un rápido enfriamiento/congelamiento del asfalto.

En las zonas donde la temperatura es rebasada por encima de 50°C, la temperatura de la superficie de rodadura es 35% más alta y si la radiación solar es intensa, puede alcanzar hasta 75% más que la temperatura ambiental. Esto tiene implicaciones importantes para la operación de los vehículos, pero este tipo de pavimentos deben identificarse en la región, pues demandaran mayores inversiones en la conservación, dado que son más susceptibles a la deformación.

Los cambios en los patrones de precipitación exigen un aumento en los trabajos de mantenimiento de las obras de drenaje, por lo que una falta de éste, repercutirá en efectos negativos a las capas del pavimento, provocando filtraciones que deterioran la estructura.

4. La adaptación de los pavimentos al cambio climático

Los pavimentos en el futuro deben considerar cambios en las variables que influyen su diseño, tales como la temperatura y la precipitación, incluir adicionalmente variables como el viento, la presión atmosférica, humedad y la evapotranspiración.

Las acciones preventivas para reducir el riesgo en los pavimentos incluye:

- Actualización de los estándares de diseño de acuerdo a los nuevos umbrales climáticos que permitan adaptar los pavimentos a los cambios del clima.
- Un incremento de la frecuencia del mantenimiento de las obras de drenaje para asegurar su suficiencia a pesar de los cambios en la intensidad de las lluvias.
- Asegurar una buena condición de la superficie de rodadura para evitar que el agua penetre a las diferentes capas del pavimento.
- Eliminar el agua del pavimento eficientemente modificado el bombeo en la calzada.
- Para evitar humedad en las capas se debe garantizar el grado de compactación adecuado en cada capa.
- Incluir todo el drenaje subterráneo necesario en el pavimento para evitar que el agua se introduzca en las capas del pavimento.



- Mantener estricto apego al control de calidad de la mezcla asfáltica, para garantizar la calidad de los agregados y el asfalto, y con ello lograr pavimentos de alto desempeño.
- Un diseño adecuado y materiales acordes a la zona climática, podrán ayudar a un buen desempeño a pesar de los cambios de temperatura.
- El uso de aditivos como cal hidratada mejora la unión entre el asfalto y el agregado, evitando el desprendimiento y por lo tanto la pérdida de la calidad de la capa de rodadura.
- En los pavimentos asfálticos, las mezclas de alto módulo (EME, por sus siglas en francés) son un enfoque eficaz para mitigar el deterioro por el tránsito, disminuyendo las deformaciones y la fatiga, y aumenta la permeabilidad.
- Se deben utilizar materiales con un mejor desempeño hidráulico en la base o en las capas de cimentación.
- Los riesgos por temperatura pueden ser evitados al incorporar mejor tecnología que mejore el desempeño del asfalto, actualmente existen muchos modificadores que ayudan contra los problemas del cambio climático.
- Modificar las horas de trabajo en veranos que serán más cálidos para garantizar buena salud a los trabajadores.
- Existen tecnologías para extraer el calor del pavimento y con ello evitar deformaciones, pero aun resultan costosas, por lo que se recomienda aplicarla solo en casos especiales.
- La colocación de capas de revestimiento al pavimento que permitan refractar los rayos solares, evitando el sobrecalentamiento del pavimento.

Conclusiones

La incertidumbre de las proyecciones climáticas es una barrera que ha limitado el avance en la adaptación al cambio climático, así como en la identificación de los efectos futuros en todos los sectores. Sin embargo, existe evidencia de los daños actuales y riesgos potenciales que los diversos componentes de la infraestructura del transporte tienen y seguirán manifestándose en el futuro, tales como los pavimentos.



Los pavimentos son la cara de presentación para los usuarios de las redes carreteras, un buen estado del mismo refleja una alta satisfacción de los usuarios. En muchos de los casos la sensación de bienestar es positiva para los automovilistas, pero cuando no se realiza una buena ingeniería el resultado es opuesto.

En el contexto del cambio climático, ya no es posible diseñar inadecuadamente los pavimentos, ni construirlos ineficientemente, pues los diversos estresores climáticos en plazos muy cortos refleja los daños en el pavimento. Por ello, los diseños actuales deben considerar las variaciones climáticas para asegurar un buen desempeño del pavimento en el largo plazo. La construcción debe elevar sus estándares de calidad para aumentar la duración del pavimento, evitando que éste falle. El mantenimiento debe ser más frecuente y profundo para preservar la vida de los pavimentos existentes.

La experiencia internacional puede ayudar a que en México se inicie un camino más apropiado para la adaptación de los pavimentos ante el cambio climático, y poder asegurar su resiliencia ante los diferentes estresores climáticos.

Existen más efectos al cambio climático en los pavimentos asfálticos que están asociados a la cimentación, al terreno natural y sus propiedades, el clima y sus cambios generan múltiples efectos que aceleran el deterioro y daño de los pavimentos, los cuales deben abordarse con más detalle en artículos futuros.

Se espera que el presente artículo contribuya al conocimiento en habla hispana sobre los riesgos e impactos del cambio climático en los pavimentos asfálticos y como se puede comenzar a realizar acciones sobre adaptación.

Bibliografía

Corredor M.; Gustavo. (2008). Experimento Vial de la AASHO y las guías de diseño AASHTO. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

Corro, Santiago; Prado, Guillermo. (1999). Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo Carreteras de altas especificaciones. DISPAV-5, Versión 2.0. Instituto de Ingeniería de la UNAM. México, DF.

Li, Quiang; Mills, Lesli; McNeil, Sue. (2011), The implications of climate change on pavements performance and design. University of Delaware, University Transportation Center (UD-UTC). United States.

Nemry, Fracoise; Demirel, Hande. (2012). Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures. Scientific and policy reports. European Commission, Joint Research Centre. Sevilla, Spain.

United States Agency for International Development. (2012). Transportation, Addressing climate change impacts on infrastructure: preparing for change. Washington, DC

Willway, T.; Baldachin, L.; Reeves, S.; Harding, M.; McHale, M. Nunn, M. (2008). The effect of climate change on highway pavements and how to minimize them. Transportation Research Laboratory. Technical Report No. 184. United Kingdom.