



## LA VARIABLE AMBIENTAL “EMISIONES” EN LA TOMA DE DECISIONES PARA LA GESTIÓN DE LA CONSERVACIÓN VIAL

Juan Fernando Mendoza Sánchez<sup>1</sup>, Ricardo Solorio Murillo<sup>2</sup>, Elia Mercedes Alonso Guzmán<sup>3</sup>; Wilfrido Martínez Molina<sup>4</sup>; Rafael Soto Espitia<sup>5</sup>; Hugo Luis Chavez García<sup>6</sup>, José Belisario Aburto Barrera<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, fernando.mendoza@imt.mx

<sup>2</sup> Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, ricardo.solorio@imt.mx

<sup>3</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, elia.alonso@umich.mx

<sup>4</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, wilfrido.martinez@umich.mx

<sup>5</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, rsoto@umich.mx

<sup>6</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, luis.chavez@umich.mx

<sup>7</sup> Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, belisario.aburto@imt.mx

### Resumen

La presente investigación analiza el impacto al medio ambiente de las emisiones contaminantes generadas por la operación de los vehículos bajo diferentes estrategias de conservación vial que se utilizan para mejorar la condición superficial de los pavimentos. Los análisis se realizaron con el submodelo de efectos ambientales que se encuentra incluido en el HDM-4 el cual permita calcular las emisiones vehiculares. Los resultados muestran el nivel de impacto de las emisiones generadas para cada estrategia de conservación, por lo que este tipo de análisis puede ser útil para la toma de decisiones para la selección de estrategias de conservación que permitan alcanzar cierto nivel de calidad superficial, y que consideren el impacto ambiental de la variable “emisiones”. Adicionalmente se presentan los resultados de un análisis de sensibilidad del índice de rugosidad internacional (IRI) en la generación de emisiones realizado con el HDM-4, el cual refleja que existe un ahorro de estos contaminantes atmosféricos por la mejora del estado del camino. Se concluye que el estado superficial de una carretera o vialidad, medido en términos del IRI, ya sea para la selección de estrategias de conservación o durante la etapa de operación de un camino, contribuye a la generación de emisiones contaminantes emitidas a la atmósfera.

**Palabras Clave:** Conservación, Emisiones, Gestión de Activos

### 1 Introducción

La calidad superficial de un pavimento tiene especial importancia como un elemento clave para describir el estado en que se encuentra una carretera, en términos de las irregularidades presentes.

Actualmente se tienen diferentes variables que miden las características superficiales de los pavimentos como la profundidad de rodera, el índice de perfil o el índice de rugosidad internacional (IRI).

En México la condición del camino se evalúa según se muestra en la tabla 1 y se correlaciona conforme al IRI, el cual refleja principalmente aspectos de confort y seguridad para los usuarios de una carretera [1].



Tabla 1. Intervalos de IRI para la clasificación de los tramos

Condición del camino	IRI (m/km)	
	Autopistas de cuota y corredores carreteros	Red básica libre y red secundaria
Bueno	<1.8	<2.5
Aceptable	1.8-2.5	2.5-3.5
No satisfactorio	>2.5	>3.5

Estas mediciones permiten diagnosticar el estado del pavimento de la red nacional de caminos, pero también representan el estado de confort para los usuarios que circulan por los diferentes tramos carreteros del país. Por otra parte, los diferentes estados del pavimento, representan impactos más o menos significativos en cuanto a las emisiones contaminantes derivadas del consumo energético de los vehículos.

Las métricas de la rugosidad, es decir, del IRI, es uno de los factores que más influyen en el exceso de consumo de combustible [2]. Por lo que es importante para los países mantener en buen estado la superficie de los pavimentos para obtener ahorros importantes en los costos de operación vehicular del tránsito que circula por la red vial mexicana, aunado a su relación intrínseca con las emisiones.

Para contribuir a una gestión adecuada de la conservación de la red vial es fundamental contar con un sistema de gestión de activos, buscando optimizar las inversiones en el mantenimiento y priorizar los tramos que requieren ser intervenidos, que además permita seleccionar acciones de conservación adecuadas sobre una base técnica, pero considerando su impacto al medio ambiente, particularmente en la generación de emisiones.

El presente trabajo de investigación analiza la variable ambiental “emisiones” que se ha obtenido de diversos estudios mediante el Submodelo Efectos Ambientales (SEA), del Sistema para el Desarrollo y Gestión de Carreteras (Highway Development and Management System), mejor conocido por las siglas HDM-4, como un elemento ambiental a considerar en la conservación vial.

## 2 Análisis del Submodelo Efectos Ambientales (SEA)

El HDM-4 es un modelo computacional que simula condiciones económicas y físicas a lo largo de un periodo de tiempo, para una serie de especificaciones y escenarios definidos por el usuario.

El SEA es un submodelo del HDM-4 que permite realizar un análisis del consumo de energía de los vehículos motorizados y del uso de energía en los trabajos, adicionalmente permite cuantificar las emisiones que los diferentes tipos de vehículos generan en los tramos de análisis [3]. La figura 1 muestra el marco conceptual de HDM-4 donde se visualiza donde se encuentra el modelo para la estimación de emisiones.

Dicho modelo permite calcular la cantidad de emisiones contaminantes en forma de sustancias químicas, generadas por la operación del transporte sobre una red carretera o segmento de la misma. La naturaleza y cantidad de estas emisiones depende de una serie de factores que incluyen el tipo, edad y estado de mantenimiento del vehículo, velocidad de desplazamiento, composición del combustible, el estado superficial y la pendiente del camino, así como de las condiciones climatológicas.

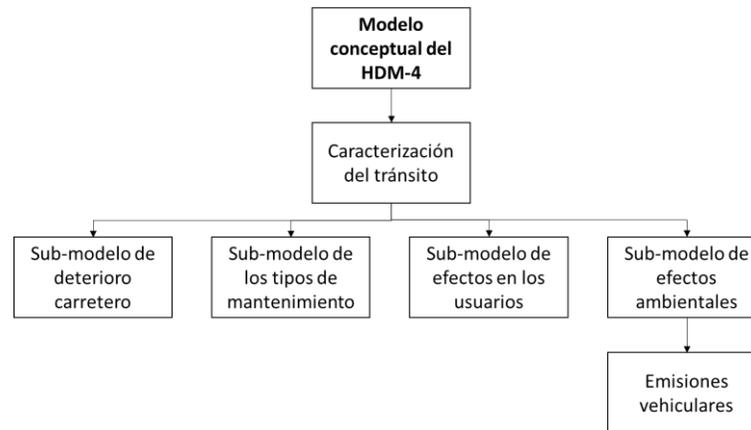


Figura 1. Marco conceptual del HDM-4

### 3. Modelo para el cálculo de emisiones

El modelo considera únicamente las siguientes emisiones primarias: el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), hidrocarburos (HC), plomo (Pb), y las partículas suspendidas (PM). Se considera solo emisiones en caliente y el tipo de combustible (diésel o gasolina).

El modelo para el cálculo de emisiones del HDM-4 está diseñado para realizar estimaciones comparativas de las cantidades de emisiones generadas por diferentes opciones de mejora y mantenimiento.

El HDM-4 realiza una comparación en cuanto a nivel de emisiones entre dos proyectos de mejora de una carretera y no entre dos vehículos, motivo por el cual se construyó el modelo con base en la predicción de niveles de emisión promedio [4]. Esta comparación podría ayudar a decidir entre diversas estrategias de conservación a la que debería ser usada para un segmento determinado de la red, comparando los beneficios que se obtendrían con la disminución en la cantidad de emisiones generadas debido a la mejora de las condiciones del camino, y el costo de implementar dichas estrategias.

El modelo se basa en el propuesto por Hammerstrom [5], y predice las emisiones del escape de los vehículos en función del consumo de combustible y de la velocidad. El consumo de combustible está en función de la velocidad del vehículo, que a su vez depende de las características del camino y de la propia unidad.

De esta manera es posible analizar el cambio en la cantidad de emisiones como resultado de la implementación de diferentes estrategias de mantenimiento y/o mejora de un camino (cambios en el IRI), o cuando existen cambios mayores en la flota vehicular que transita en la red carretera.

### 4 Metodología para la estimación de emisiones

La metodología planteada para la estimación de emisiones vehiculares con el HDM-4 se basa en tres etapas, conforme se muestra en la figura 2 [6]. La primera etapa requiere recopilar la información de los datos del tránsito, obtener la información de la geometría del camino (longitud, pendiente y curvatura promedio), caracterizar la flota vehicular (autos, autobuses y camiones), así como obtener la información ambiental de la zona donde se ubica el camino (tropical, seca, templada, frío o polar).

La etapa 2 es la alimentación del software HDM-4 para realizar los análisis necesarios con el modelo. Finalmente, en la etapa 3 se obtiene los resultados de las emisiones derivadas del análisis del modelo.

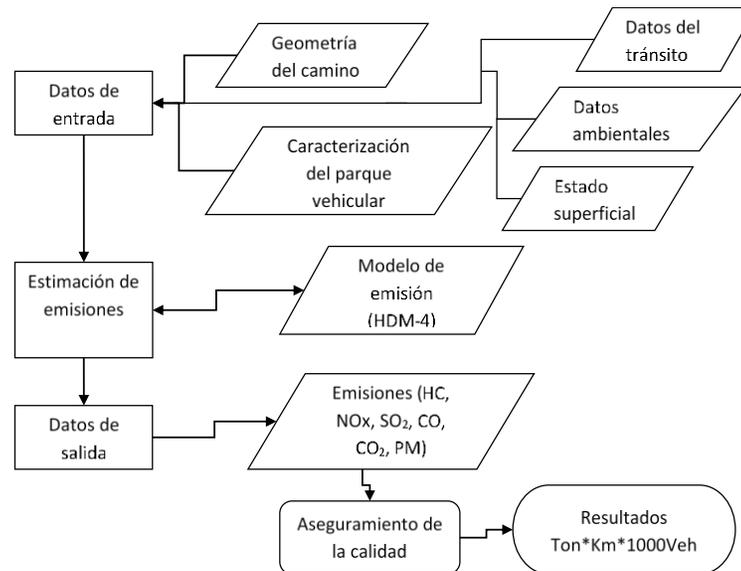


Figura 2. Metodología para la estimación de emisiones de vehículos automotores que circulan en carreteras utilizado el HDM-4

El análisis realizado en este modelo es con base en una flota de vehículos representativos, los cuales muestran características que pueden ser consideradas como representativas del total de vehículos.

## 5 Caso de estudio

Con el fin de ejemplificar la manera en que se obtiene la cantidad de emisiones generadas y observar en el impacto en las emisiones al comparar diferentes estrategias de conservación, se seleccionó un tramo carretero en el Estado de Querétaro, es un camino tipo C, el TDPA y la composición vehicular fueron obtenidos de los Datos Viales de la SICT, y la caracterización de la flota vehicular se basaron en los análisis de los estudios origen-destino que publica el IMT, la zona climática es subtropical-cálido/semiárido, y el tipo de pavimento es de concreto asfáltico.

Las características del tramo se presentan en la tabla 2.

Tabla 2 Características del tramo de estudio

Tramo	TDPA	Longitud	IRI	Año de medición	Velocidad máxima permitida
ID 1	1900	24 km	5	2022	100 km/h



Se establecieron tres casos de conservación para el tramo. Las características respectivas se muestran en la tabla 3. Con lo anterior se pretende visualizar los cambios en la cantidad de emisiones generadas por los vehículos cuando se implementan medidas para mejorar las condiciones físicas de la infraestructura carretera.

Tabla 3 Descripción de casos de conservación

Caso	Descripción del tipo de conservación
1	Bacheo, riego de sello para 20% del área dañada, reconstrucción para IRI = 8
2	Bacheo, reconstrucción para IRI = 8, y sobrecarpeta para IRI=5
3	Bacheo, riego de sello para 20% del área dañada, reconstrucción para IRI = 8, y sobrecarpeta para IRI=5

Esta comparación en cuanto a nivel de emisiones entre dos proyectos de mejora de una carretera, ayudaría a decidir entre diversas estrategias de conservación de un segmento determinado de la red, comparando los beneficios ambientales que se obtendrían con la disminución en la cantidad de emisiones generadas debido a la mejora de las condiciones del camino, y el costo de implementar dichas estrategias.

Lo anterior permite obtener información del comportamiento ambiental en cuanto a la generación de emisiones contaminantes, con requerimientos relativamente bajos de datos de entrada adicionales a los que se requieren para realizar un análisis de proyecto dentro del mismo programa, además facilita una comparación entre las consecuencias de las distintas obras y alternativas de construcción con un caso base.

La tabla 4 muestra la suma de las emisiones generadas del año 2022 al 2032 por emisión, para cada caso de conservación, en ella se puede ver que el caso 2 y 3 generan la misma cantidad de emisiones, y están por debajo de la opción de conservación 1.

Tabla 4 Comparativa entre casos de conservación

Caso	HC	CO	NOx	PM	CO <sub>2</sub>	SO
1	129.854,33	519.104,24	1.189.098,00	39.124,81	85.669.510,84	25.446,97
2	129.415,92	542.121,26	1.182.571,76	38.499,87	86.386.404,05	25.682,49
3	129.415,92	542.121,26	1.182.571,76	38.499,87	86.386.404,05	25.682,49

Nota: Emisiones totales en gramos por 1000 vehículos - kilómetro

Además de las emisiones anuales totales y por vehículo, la variación anual neta de las emisiones como consecuencia de las distintas obras y alternativas de construcción con un caso base (sin proyecto o mínimo), que normalmente representa el estándar mínimo de conservación rutinario puede también ser analizada con el HDM-4.

Aunque los resultados, no representan de manera detallada la cantidad y naturaleza exacta de las emisiones generadas, por el tipo de agregación de la información, si nos proporciona una idea clara de cómo la selección de la estrategia de conservación puede tener un mayor o un menor impacto en la generación de emisiones.

Esto se debe principalmente al nivel del estado superficial que se desea alcanzar con la estrategia de conservación, por lo que el IRI representa un parámetro significativo en la generación de emisiones carreteras.

## 6 Análisis de la sensibilidad del IRI en el HDM-4

Un análisis adicional fue realizado para evaluar la cantidad de emisiones que se generan en un tramo en operación utilizando el HDM-4 para diferentes niveles de IRI, para observar su sensibilidad e impacto.

La Figura 3 muestra la variación del IRI desde una condición superficial buena (2.0), hasta el límite de inicio de la condición no satisfactoria (4.2), donde se aprecia un incremento en la generación de emisiones, particularmente las de dióxido de carbono, en función del deterioro del estado superficial del pavimento.



Figura 3. Metodología para la estimación de emisiones de vehículos automotores que circulan en carreteras utilizado el HDM-4

Los resultados obtenidos tienen como base una muestra representativa de 1000 vehículos por tipo, por lo que al caracterizar la flota vehicular el tramo se puede conocer el impacto real en las emisiones, el cual varía por la cantidad y tipo de vehículos.

Los resultados del estudio en el tramo con mayor detalle muestran que la mayoría de las emisiones de HC y CO provienen de los vehículos tipo A. Esto se debe en esencia a que los factores de emisión para los vehículos que utilizan gasolina como combustible tienen valores relativamente más elevados.

Para los vehículos pesados que utilizan diésel son la categoría de fuente más significativa en cuanto a emisiones de NOx, PM, SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Esto se debe a que los factores de emisión de estos contaminantes para vehículos pesados que se alimentan con diésel son considerablemente mayores



que los correspondientes a vehículos y camiones ligeros a gasolina. Se observa la importante contribución de los vehículos pesados en la generación de NOx, además de la generación de hidrocarburos por parte de los vehículos ligeros (tipo A), debido al uso de gasolina como combustible.

Lo anterior permite observar el comportamiento ambiental de la generación de emisiones contaminantes en carretera con requerimientos relativamente bajos de datos de entrada a los que se requieren para realizar un análisis de proyecto dentro del mismo programa HDM-4.

## 7 Conclusiones

El uso del módulo ambiental para estimar la cantidad de emisiones integrado en el HDM-4, permite tener la posibilidad de estimar la cantidad de emisiones generadas en la red o segmento de la misma, por la operación del transporte carretero que circula sobre ella.

Además, el modelo utilizado permite tener una idea aproximada de las implicaciones ambientales del deterioro de las condiciones de la red carretera, lo que genera un aumento en el consumo de combustible, costos para el usuario, y por lo tanto de las emisiones emitidas a la atmósfera.

Desde el punto de vista ambiental el mejoramiento de las carreteras contribuye directamente a la reducción de emisiones contaminantes. De esta manera se puede incluir la variable ambiental “Emisiones” en el proceso de toma de decisiones, para lograr convertirse en un criterio relevante en la selección de las estrategias de conservación y en el mejoramiento del estado superficial de las carreteras del país.

El uso del submodelo Efectos Ambientales del HDM-4 en las redes carreteras puede también ser una herramienta dentro de conservación vial para la reducción de gases de efecto invernadero y pueda en un futuro formar parte como criterio de los programas de conservación vial. A nivel de red, por ejemplo, puede identificar tramos carreteros donde actualmente se genera una cantidad significativa de emisiones, y que por lo tanto deben ser intervenidos para reducir el impacto al medio ambiente.

## 8 Referencias

- [1] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). (2016). *N-CSV-CAR-1-03-0004/16 Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI)*. Dirección General de Servicios Técnico. Subsecretaría de Infraestructura.
- [2] Botshekan, Meshkat; Tootkaboni, Mazdak P.; Louhghalam, Arghavan. (2019). *Global Sensitivity of Roughness-Induced Fuel Consumption to Road Surface Parameters and Car Dynamic Characteristics*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. <https://doi.org/10.1177/0361198118821318>
- [3] World Road Association (PIARC). (2006). *Highway Development & Management (HDM-4)*. Volumen Four: Analytical Framework and Model Descriptions. Version 2.0.
- [4] Bennett, Christopher R. (1996). *HDM-4 Emissions model - draft specifications: International study of highway development and management tools*. United Kingdom: University of Birmingham.
- [5] Hammarström, Ulf (1995). *Exhaust emissions from road traffic - description of driving patterns by means of simulations models*. Swedish National Road and Transport Research Institute, November 1995.
- [6] Mendoza, J.F. et al. *Inventario de emisiones en carreteras*. (2010). Publicación Técnica No. 339 Instituto Mexicano del Transporte. Qro, México.