

## Propuesta metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades\*

### Introducción

La operación del transporte terrestre es uno de los contribuyentes de impactos negativos al medio ambiente; tales efectos son las emisiones contaminantes, el ruido, la basura, y los accidentes de tránsito, entre otros.

El presente artículo se centra en la estimación de emisiones vehiculares, mediante el desarrollo de una metodología para la cuantificación de las emisiones, y una breve revisión sobre ésta externalidad del transporte.

### El impacto ambiental de la operación del transporte

El transporte es una de las causas principales de los impactos negativos al medio ambiente, debido a las repercusiones ambientales en las zonas urbanas, en aspectos nocivos para la flora y fauna; pero el más importante son las afectaciones a la salud humana, derivadas de las necesidades de movilidad a través de medios automotores, cuyos efectos están relacionados con las emisiones contaminantes y el ruido, generados por la operación vehicular.

El aumento constante de la población urbana y sus necesidades de transporte, traen consigo el crecimiento de la motorización, esto conlleva a que las emisiones de las fuentes móviles sean consideradas como parte de la problemática ambiental, y por tanto, requieren ser incluidas dentro de las estrategias para el mejoramiento de la calidad de aire urbano.

Además de los impactos ambientales directos causados por las fuentes móviles durante su operación, existen impactos indirectos, tales como los derivados de las grasas y aceites usados, el polvo; así como los impactos ambientales por metales y materiales usados en el ensamblaje de los vehículos, los desechos de llantas, etc.

### En Emisiones vehiculares

Las emisiones que se originan en la operación de un vehículo se deben a un conjunto de elementos conformado por el motor, el combustible y el modo de uso; es decir, que las emisiones emitidas a la atmósfera resultan de la interacción de estos tres factores y no de alguno en particular. Por lo que para evaluar

## CONTENIDO

<b>PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES VEHICULARES EN CIUDADES DE LA REPÚBLICA MEXICANA</b>	<b>1</b>
<b>INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARCIALMENTE EMBEBIDOS EN CONCRETO DE UN PUENTE ATIRANTADO</b>	<b>9</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>17</b>
<b>PROYECTOS EN MARCHA</b>	<b>17</b>
<b>PUBLICACIÓN</b>	<b>18</b>
<b>EVENTOS ACADÉMICOS</b>	<b>19</b>

\*Síntesis del documento: GÓMEZ, Cindy; Fernando Mendoza, Guadalupe López, Rodolfo Téllez, Wilfrido Martínez y Elia Alonso, *Propuesta metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades de la República Mexicana*, Publicación técnica No. 322, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro., 2009.

los impactos ambientales y sugerir alternativas efectivas de mejora ambiental se requieren considerar los tres aspectos; por lo que no podemos considerar un cambio de combustibles solamente, sin pensar qué tecnología de motor es la que se está usando o se va usar en el país.

También pudiera resultar importante establecer para cada ciudad, cuál es su situación actual en cuanto a niveles de contaminación, y cuánto representan las emisiones de vehículos en este contexto; y de ser posible, cuál es el contaminante con niveles que excedan los límites máximos aceptados por los estándares normativos. Con estos elementos se podrá plantear una estrategia más eficiente para cada ciudad.

Las emisiones vehiculares son una gama de contaminantes que afectan al medio ambiente. Los debidos al tráfico se pueden clasificar en dos grupos, contaminantes primarios, y los secundarios.

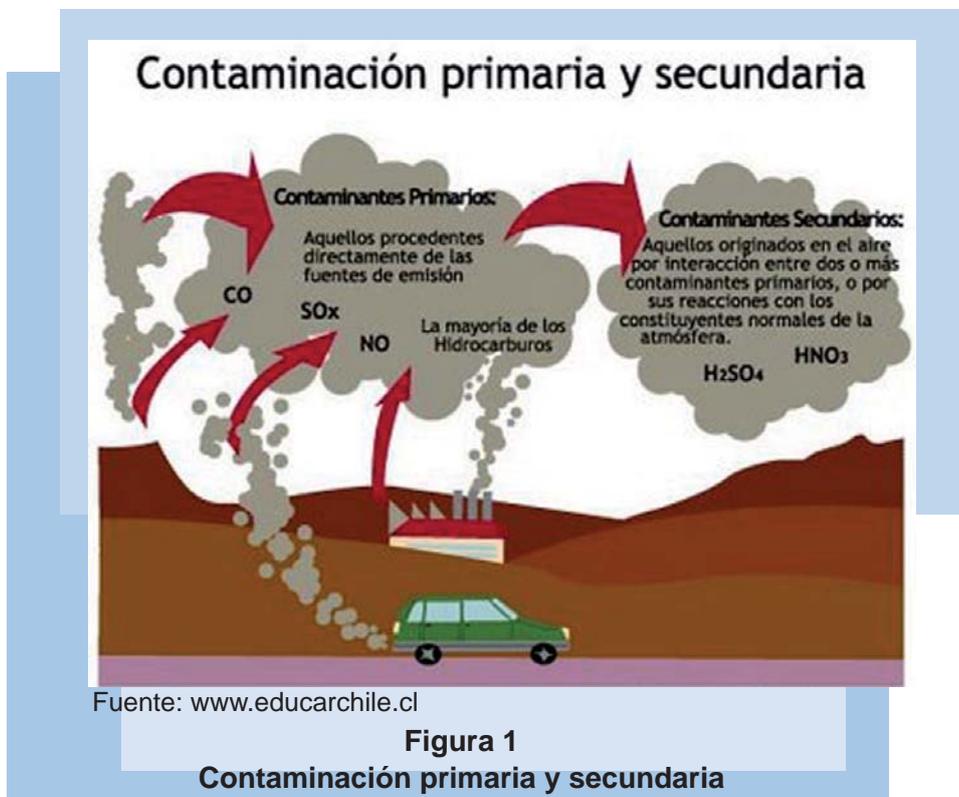
Los contaminantes primarios son aquellos que se emiten directamente a la atmósfera como

resultado de un proceso de combustión, estos son el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), vapores de combustibles y solventes, plomo (Pb) y partículas suspendidas.

Los contaminantes secundarios se forman como consecuencia de las reacciones y transformaciones que experimentan los contaminantes primarios una vez que se encuentran en el aire como el ozono (O<sub>3</sub>), el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y algunos tipos de partículas.

### Tipos de emisiones vehiculares

Las emisiones de vehículos automotores están integradas por un gran número de contaminantes que provienen de muchos procesos diferentes (figura 1). Las más comúnmente consideradas son las provenientes del escape, que resultan de la combustión del combustible y que son liberadas por el escape del vehículo. Los contaminantes de interés clave en este tipo de emisiones incluyen NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno); SO<sub>x</sub> (óxidos de azufre); Compuestos Orgánicos Volátiles (COV); CO (monóxido de carbono); y las partículas PM (partículas en suspensión).



También incluye los gases efecto invernadero, que aunque no afectan a la salud influye en el clima, como es el CO<sub>2</sub>.

Además de las emisiones de COV por combustión, hay un porcentaje significativo de emisiones de COV desde otros dispositivos con especial importancia para los automotores de gasolina. A esta clase se le conoce como emisiones evaporativas. Algunas de ellas son las siguientes:

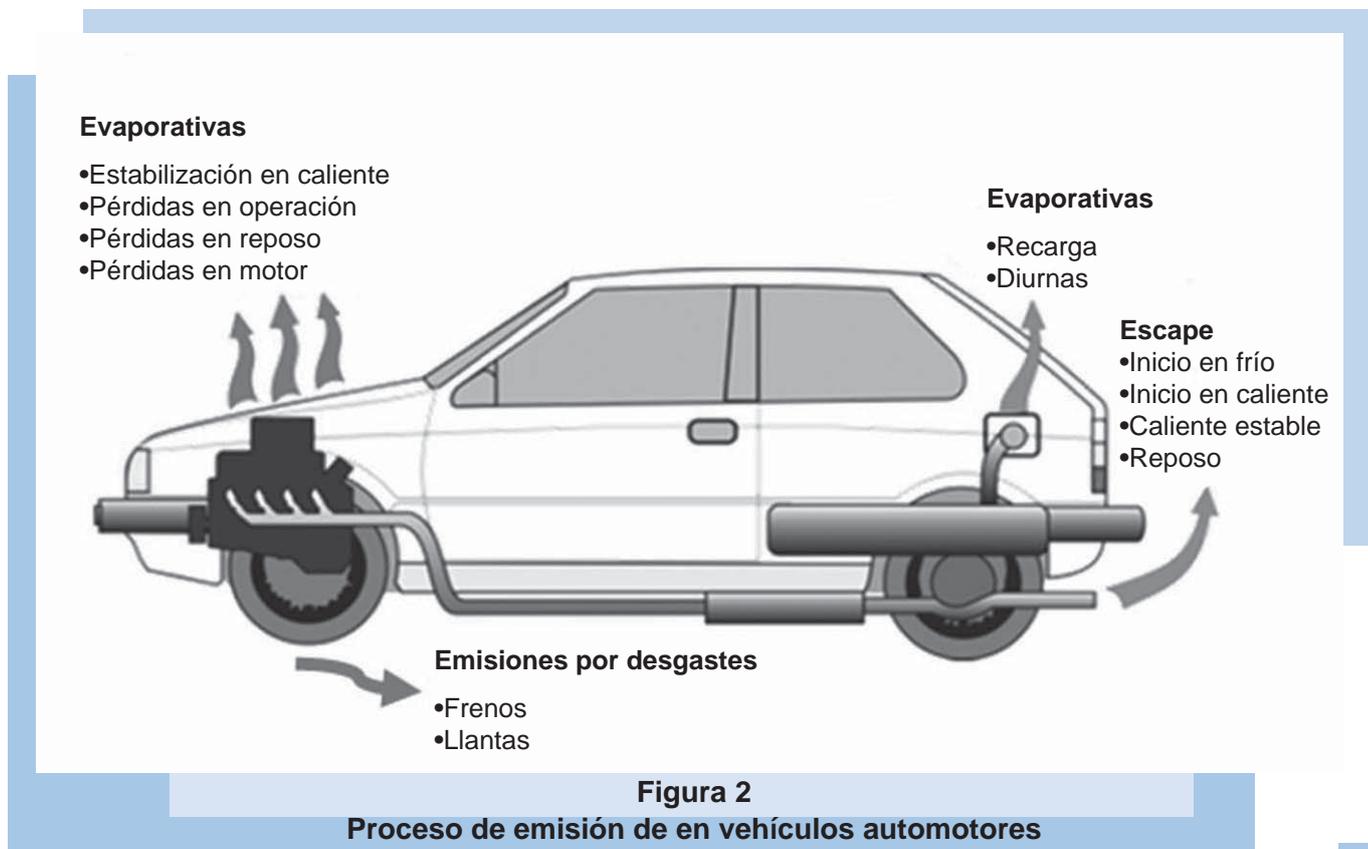
**•Emisiones evaporativas del motor caliente:** son aquellas que se presentan debido a la volatilización del combustible en el sistema de alimentación, después de que el motor se ha apagado. El calor residual del motor volatiliza el combustible.

**•Emisiones evaporativas de operación:** son las emisiones ocasionadas por las fugas de combustible, como líquido o vapor, que se presentan mientras el motor está en funcionamiento.

**•Emisiones evaporativas durante la recarga de combustible:** son las emisiones evaporativas desplazadas del tanque de combustible del vehículo durante la recarga. Pueden ocurrir mientras el vehículo está en reposo y en puntos conocidos, como las gasolineras. La recarga de combustible se maneja típicamente como fuente de área. Los factores de emisión para la carga de combustible también pueden estimarse a través del modelo MOBILE.

**•Emisiones diurnas:** son las emisiones del tanque de combustible del vehículo debidas a una mayor temperatura del combustible y a la presión de vapor del mismo. Se deben al incremento de la temperatura ambiente ocasionado por el sistema de escape del vehículo, o por el calor reflejado en la superficie del camino.

**•Emisiones evaporativas en reposo:** son emisiones evaporativas diferentes a las anteriores, que se presentan cuando el motor no está en funcionamiento. Las pérdidas en reposo se deben principalmente a fugas de combustible y de la permeabilidad, o fugas de los conductos de combustible.



La composición del combustible y las características en la combustión dependen en gran parte de la emisión de contaminantes.

Los combustibles fósiles están formados por una mezcla de diferentes hidrocarburos; luego del proceso de combustión completa generan principalmente monóxido de carbono (CO) y vapor de agua; sin embargo, el funcionamiento de los motores es complejo debido a varios factores; la combustión no se desarrolla en su totalidad. Entre las causas más importantes se destaca la potencial falta de oxígeno y la variabilidad de la mezcla oxígeno/combustible; la baja temperatura, cuando los motores inician su funcionamiento, etc., y como consecuencia se producen emisiones de CO; además de hidrocarburos sin oxidar o parcialmente oxidados [Moreno Racero, et al].

Una combustión incompleta contamina el aire, y libera menos energía de la que teóricamente puede obtenerse, ocasionando así una pérdida económica que puede llegar a ser importante para las diversas posibilidades de combinación entre el carbono y el oxígeno.

Adicionalmente, y debido a las altas temperaturas en la cámara de combustión, (estabilidad térmica del motor), se produce la combinación de N<sub>2</sub> (dinitrógeno) y O<sub>2</sub> (dioxígeno), formando NO<sub>x</sub> [USEPA].

El azufre forma parte de las impurezas que contienen los combustibles fósiles. Su oxidación produce la formación y emisión de SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre). Interfiere directamente en la eficiencia de los catalizadores, cuyo uso sólo es viable con combustible con muy bajo contenido de azufre.

Las emisiones de partículas se producen por la combustión, el desgaste de los neumáticos, recubrimiento de frenos y superficies de rodadura, o por la suspensión de polvo (levantamiento de polvo del camino, polvo recogido por las llantas del vehículo y suspendido en el aire por la turbulencia ocasionada por el movimiento). Las partículas que dan un color blanco al humo del escape se asocian a condiciones frías de los motores; en tanto que humos de color azulado

y negro, se asocian a la combustión incompleta de mezclas que pueden contener lubricantes. La gran mayoría de las partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) se producen debido a la combustión; por lo que cuando se comparan con las del desgaste de las llantas y frenos, son poco significativas; por ello en algunas ocasiones son omitidas de los inventarios de emisiones. Los vehículos diesel producen de 10 – 100 veces más partículas de combustión que los de gasolina.

### **Análisis de modelo MOBILE 6 para la estimación de emisiones vehiculares**

El modelo MOBILE está formado por un conjunto de rutinas codificadas en lenguaje FORTRAN que generan factores de emisión de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), para vehículos alimentados con gasolina y diesel que circulan por carreteras. Los factores de emisión para hidrocarburos pueden ser expresados como hidrocarburos totales (HCT), hidrocarburos no metánicos (HCNM), compuestos orgánicos volátiles (COV), gases orgánicos totales (GOT), o gases orgánicos no metánicos (GONM). Este factor de emisión se obtiene para 28 categorías vehiculares.

La primera generación del modelo MOBILE fue creada a mediados de los años setentas y, desde entonces, ha tenido numerosas actualizaciones y revisiones para incorporar los cambios de la legislación ambiental y los avances tecnológicos.

El MOBILE 6 cuenta con datos de emisiones base obtenidos a partir de pruebas controladas (temperatura, humedad, combustible) FTP 75; el modelo asume factores de deterioro con respecto al tiempo. El programa realiza diversos ajustes a las emisiones base con respecto a condiciones propias de una localidad en específico; los factores de corrección, se basan en los siguientes aspectos:

- Velocidad promedio, por tipo de vialidad
- Temperatura
- Aire acondicionado

- Humedad
- Características de la gasolina (volatilidad, contenido de oxigenantes, detergentes, azufre, etc.)
- Emisiones de CO en frío
- Ciclo de prueba federal complementario
- Alteraciones en los sistemas de control de emisiones
- Vehículos altamente contaminantes
- Programas de inspección y mantenimiento
- Programas anti-alteraciones
- Programas de recuperación de vapores (fase 2)
- Sistemas de diagnóstico a bordo

Los datos requeridos por el modelo se agrupan en dos bloques:

**1)** Condiciones locales: altitud, humedad, temperatura, estación del año, características de los combustibles, programas de inspección y mantenimiento, y año en que se realiza la modelación.

**2)** Flota vehicular, año-modelo, categoría vehicular, tipo de combustible utilizado por categoría vehicular, actividad vehicular (kilometraje anual acumulado por categoría, y año modelo del vehículo desagregado por tipo de vialidad, tiempos de reposo, etc.), y tipo de tecnología vehicular (referido a los estándares de emisión).

MOBILE 6 incluye valores por defecto; sin embargo, éstos pueden ser sustituidos por información más específica que refleje las condiciones del sitio en estudio.

### **Metodología para estimación de emisiones vehiculares**

La metodología propuesta para la estimación de ciudades utiliza el software MOBILE 6, debido principalmente a la experiencia del uso en México, y por contar con adaptaciones previas sobre las características de la flota vehicular mexicana.

Para ello fue necesario definir los elementos básicos para alimentar el modelo y puntualizar los estudios requeridos para completar la metodología en la estimación de emisiones urbanas.

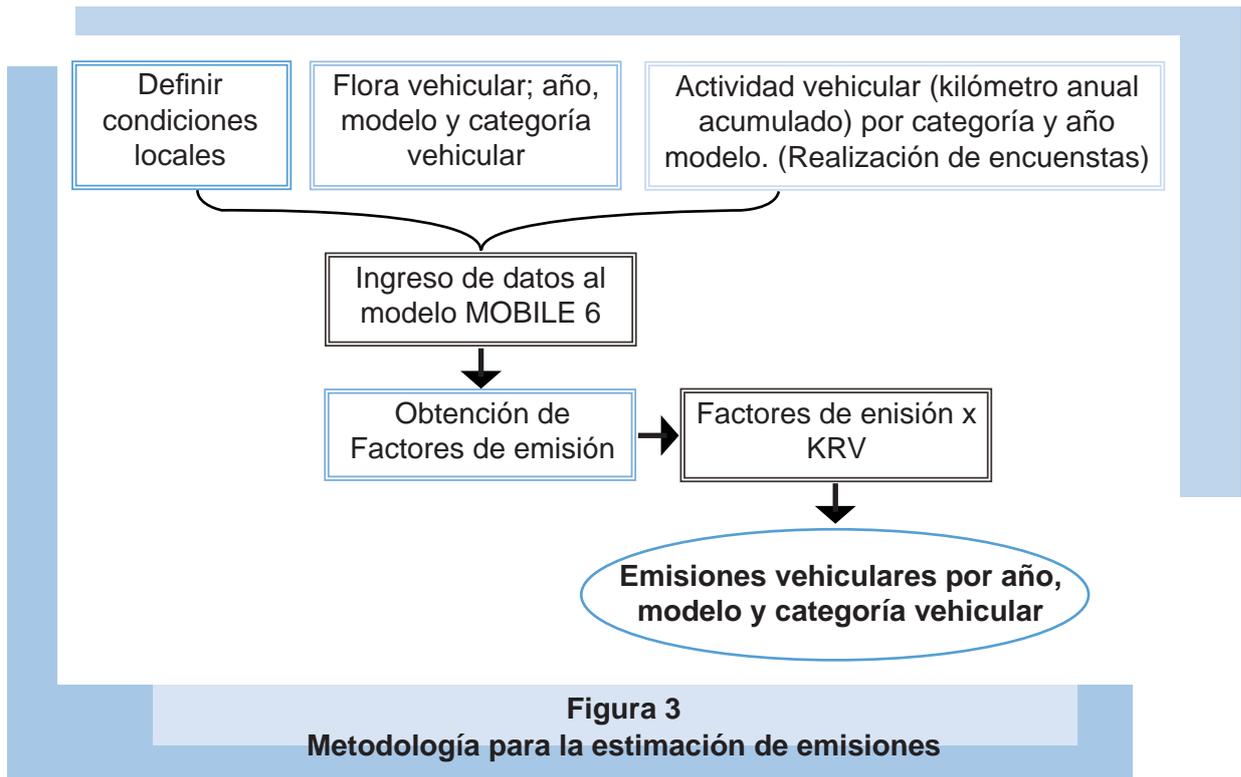
Primeramente, se deben definir las condiciones particulares de la ciudad, tales como: las condiciones ambientales, de temperatura, altitud, etc.; la caracterización de la flota vehicular de la ciudad de estudio; es decir, modelos de vehículos, edad de la flota, la categoría; otros elementos son la actividad vehicular, como el kilometraje, el consumo de combustible, velocidad de operación. Dependiendo de la precisión de estudio se puede precisar también la red vial, y utilizar modelos de transporte para estimar longitudes de viajes urbanos.

Con esta información se puede alimentar el MOBILE 6, y con ello obtener los factores de emisión por tipo de vehículo, según la precisión que se desee.

Con dichos factores y la cantidad de kilómetros que recorre un vehículo de acuerdo con su actividad, se estima la cantidad de emisiones vehiculares generadas en las ciudades, conforme a los diferentes tipos de vehículos y los diversos contaminantes atmosféricos.

La figura 3 muestra el esquema gráfico de la metodología a implementar para la estimación de emisiones vehiculares; cada una de las partes fue planteada en esta metodología a desarrollarse conforme a los elementos externos que rigen a las ciudades del país, ya que el primer obstáculo que se encuentra es la falta de información o la dificultad para conseguirla.

La estimación de emisiones bajo este esquema permite tener un conocimiento macro del escenario que se puede presentar en las ciudades, en cuanto a la contribución que realiza la operación vehicular, y los resultados pueden motivar para llegar a implementar metodologías con un nivel más detallado.



**Estudio de caso**

Para la aplicación del estudio de caso, se definió analizar la segunda ciudad más importante del estado de Michoacán; Uruapan. Tiene una extensión territorial total de 954,17 km<sup>2</sup>, que equivalen al 1,62% de la extensión total del estado. Cuenta con 279.229 habitantes (según los datos arrojados por el segundo conteo de población y vivienda de 2005).

La ciudad se ubica a una altitud de 1.634 m sobre el nivel del mar, con una temperatura máxima de 27°C y mínima de 7,7°C, con una humedad relativa del 78%.

Las características del combustible de acuerdo a datos de Pemex Refinación, reflejan en promedio los valores mostrados en la tabla 1.

Para la obtención de la velocidades se instalaron estaciones de monitoreo en diversas estaciones en las principales arterias de la ciudad, definiendo así dos escenarios de acuerdo a los resultados, el primero referido para velocidades de 36 km/h y el segundo para 56 km/h.

La flota vehicular de servicio privado, federal y de transporte público se encuentra registrada en base de datos, de la Dirección de Ingresos de la Secretaría de Finanzas y Administración en el Estado de Michoacán, la cual contiene

**Tabla 1**  
**Calidad de la gasolina y el diesel de la ciudad de Uruapan**

2007	MAGNA		PREMIUM			DIESEL
	Azufre (ppm)	PVR (psi)	Azufre (ppm)	PVR (psi)	Oxígeno (%P)	Azufre (ppm)
Promedio	600,8	9,82	33,3	7,71		223,2

Fuente: PEMEX, Refinación

parámetros tales como: año modelo, tipo de vehículo por marca o por uso, entre otros parámetros, que permiten caracterizar la flota vehicular.

Para conocer información de la actividad vehicular en la ciudad, se recurrió al uso de encuestas, aplicadas directamente a los conductores de la población de estudio. El objetivo principal al aplicar la encuesta desarrollada, fue conocer el tipo de combustible que utilizan comúnmente los vehículos en la ciudad (Magna o Premium), y otros aspectos tales como: el uso de aire acondicionado, el gasto aproximado de combustible y la tasa de acumulación de kilometraje de los vehículos, así como conocer el modelo, año y categoría vehicular (ligero, pesado, autobús, entre otras).

### Resultados

Los resultados muestran que el CO representa en promedio el 84% del total de las emisiones generadas, principalmente por los vehículos que emplean gasolina como combustible. El contaminante NOx representa el 11%; HC el 4%; y las PM10 sólo el 1% del total de emisiones.

En los dos escenarios evaluados, el primero para velocidades de 36 km/h, y el segundo para 56 km/h; no se aprecia una diferencia significativa en cuanto al porcentaje de aportación de cada contaminante. Debido al cambio de velocidad, las emisiones de CO y NOx aumentan si la velocidad del vehículo es mayor; pero en el caso del HC disminuye; para las PM10, se mantiene porque el modelo para este contaminante no es sensible al cambio de velocidad.

Cabe mencionar que las camionetas pick up y los automóviles representan el 80% de la flota, y en específico son la principal fuente de contaminación de CO en la ciudad de estudio.

Los vehículos pesados, los autobuses y camiones urbanos que emplean diesel representan sólo el 3% de la flota vehicular, y son la categoría de fuente más significativa en cuanto a emisiones de NOx con una aportación del 79%; y PM10 con 74%. Ello se debe a que

los factores de emisión de estos contaminantes para vehículos pesados que se alimentan con diesel son considerablemente mayores que los correspondientes a vehículos a gasolina.

El 97% de la flota vehicular de la ciudad utiliza gasolina como combustible; de la cual, el 92% utiliza gasolina magna, y sólo el 3% son unidades a diesel.

### Conclusiones

El aumento constante en las ciudades, de la población y sus necesidades de transporte, traen consigo el crecimiento de la motorización; esto conlleva a que las emisiones de las fuentes móviles sean consideradas como parte de la problemática ambiental, y por tanto, requieren ser incluidas en las estrategias para el mejoramiento de la calidad de aire urbano.

El diagnóstico y monitoreo de la calidad del aire en las ciudades, tiene como tarea fundamental conocer la naturaleza y la cantidad de emisiones generadas por las diferentes fuentes productoras de tales contaminantes. Para ello existen diversas herramientas y métodos que permiten cuantificar las emisiones emitidas por una fuente, ya sea móvil o fija; pero su complejidad, costo de implementación y necesidad de datos de entrada, hacen que su uso en México sea aún restringido.

La aplicación de la metodología propuesta en este artículo permite obtener información del comportamiento ambiental en cuanto a la generación de emisiones contaminantes, con requerimientos relativamente bajos de datos de entrada. Esta metodología puede coadyuvar a otras ciudades de la República Mexicana para conocer el estado actual de la calidad del aire en cuanto a la generación de emisiones atmosféricas provenientes de la operación vehicular.

Con la propuesta metodológica utilizada y la herramienta informática del modelo MOBILE6 adaptado a condiciones vehiculares mexicanas, permitió conocer la naturaleza de las emisiones en la ciudad de Uruapan, obteniendo resultados

que muestran las condiciones ambientales de la ciudad a un nivel macro.

Los resultados obtenidos podrán servir a las autoridades ambientales de la ciudad de Uruapan para la toma de decisiones que coadyuven a la mejora de las condiciones del aire de la misma.

### Recomendaciones

Una estrategia que se considera útil para disminuir la generación de emisiones emitidas a la atmosfera por la operación vehicular es la implementación de un programa de verificación vehicular en la ciudad, aplicado de manera estratificada en el tiempo; comenzando de manera obligada con las camionetas pick up por el alto porcentaje que representa del total de la flota vehicular y de emisiones de CO generadas; además de contener la invasión de automotores usados en malas condiciones, procedentes de Estados Unidos. En una segunda etapa, el resto de los vehículos ligeros; finalizando con una tercera etapa, con el resto de la flota vehicular.

El mantenimiento vehicular es una obligación ciudadana para hacer un uso eficiente del transporte, ya que el descuido de algunas personas, en cuanto al mantenimiento y cuidado de las partes mecánicas de los motores de sus automóviles, hace que el rendimiento del combustible en éste no sea aprovechado de manera óptima, haciendo que su quema sea ineficiente, y con ello aumenten las emisiones de sustancias contaminantes a la atmosfera.

Finalmente, se considera prioritario que en México se establezcan políticas que sancionen o estimulen las decisiones ambientales en las ciudades; así como realizar esfuerzos de concientización y educación ambiental que ayuden a modificar los malos patrones de vida actuales, en modelos de vida más sustentables.

### Bibliografía

Adame Romero, Aurora; Salín Pascual, Daniel A. *Contaminación ambiental*. Segunda edición, Editorial Trillas. México. (2000)

Aguilar Gómez, J. Andrés. *Curso Uso del MOBILE6\_México*. Instituto Nacional de Ecología (INE). México, D.F. (Febrero de 2009)

*Air Resources Board. Methodology for Estimating Emissions from On-Road Motor Vehicles*. Volume I: EMFAC7F, California Air Resources Board, Sacramento, California, USA. (1993)

Anderson, David R.; Sweeney, Dennis J.; Williams, Tomas A. *Estadística para administración y economía*. (2005)

Box, Paul C.; Oppenlander, Joseph C. Ph. D. *Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito*. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. USA (1985)

Centro Nacional de Estudios Municipales de la Secretaría de Gobernación. *Los Municipios del Estado de Michoacán*. Enciclopedia de los Municipios de México. México, DF. (1987-1988.

Dick, Homero Cuatecontzi; Gasca, Jorge; González, Uriel; Guzmán, Francisco. *Opciones para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte*. Instituto Mexicano del Petróleo. México, DF.

Gustafsson M, Blomqvist G, Dahl A, Gudmundsson A; *Inhalable Particles from Pavement Wear caused by Studded Tyres – Properties and Inflammatory Effects in Human Airway Cell*; Administradora Sueca de Caminos, Reporte 520; Suecia, (2005)

IEA (International Energy Agency). *Saving Oil and Reducing CO2 Emissions in Transport: Options & Strategies*. París: IEA, OECD. [IEA 2000]

Instituto Nacional de Ecología. *Manuales del programa de inventarios de emisiones de México, Volumen VI - Desarrollo de Inventarios de emisiones de vehículos automotores*. México, DF. (1997)

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Technical Summary of Climate Change*. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/pub/wg3spm.pdf>. [IPCC 2001]

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Methodological and Technological Issues in Technology Transfer*. Working Group III. New York. (2000)

Johannes F., José Puy Huarte. *Métodos Estadísticos en Ingeniería de Tránsito*. Publicado por Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. México, DF. (1975)

Mendoza Sánchez, Juan Fernando. *El impacto ambiental de ruido generado por el transporte carretero y su valoración hacia un transporte sustentable*. Seminario Internacional, PIARC. Monterrey, México. (2006)

Molina, Luisa T.; Molina, Mario J. *La calidad del aire en la megaciudad de México, un enfoque integral*. Fondo de Cultura Económica, México, ISBN 968-16-7580-0 (2005)

Quintanilla Martínez, Juan. *Escenarios de emisiones futuras en el sistema energético mexicano*. Instituto Mexicano del Petróleo.

Racero Moreno, Jesús; David Ortiz, José; Galán de Vega, Ricardo; Villa Caro, Gabriel. *Estimación*

*de la emisión de contaminantes debida al tráfico urbano mediante modelos de asignación de tráfico*. Universidad de Sevilla. [Racero et al]

Rafael Morales, Mercedes Yolanda; Zavala Ponce, Armando. Publicación Técnica No. 128 del IMT. *Selección del tren motriz de vehículos pesados (carga y pasajeros) destinados al servicio público federal*. Sanfandila, Querétaro. (1999)

Ruza, F. *El ruido del tráfico: Evaluación y corrección de su impacto*. Simposio sobre Impacto Ambiental de Carreteras, PIARC, España (1988)

United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov>. (Marzo 2006). [USEPA].

LARA GómezCindy  
cindylago@hotmail.com  
MENDOZA Fernando  
jmendoza@imt.mx  
LÓPEZ María Guadalupe  
glopez@imt.mx  
GUTIÉRREZ Alejandra  
agutierrez@imt.mx

## INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARCIALMENTE EMBEBIDOS EN CONCRETO DE UN PUENTE ATIRANTADO

### Introducción

En el año 2000, el Instituto Mexicano del Transporte participó como parte de un equipo de trabajo para realizar el análisis de la falla de uno de los elementos de anclaje superior de un tirante del puente Río Papaloapan. Como resultado de este análisis, el IMT encontró que el material constitutivo presentaba baja resistencia mecánica por alto contenido de inclusiones y porosidades, así como, por ser un acero con microestructura con grano de tamaño grande; todo esto originado durante el proceso de fabricación de la pieza.

Ante este panorama, surgió la necesidad de saber si las deficiencias estructurales del elemento de anclaje que falló, se repetían

en el resto de los 111 elementos de anclaje del puente. Para ello, se propuso emplear la técnica de ultrasonido para conocer la integridad estructural de esos elementos. En este trabajo se describe el desarrollo de la metodología empleada y sus resultados que permitieron calificar a cada uno de los elementos de anclaje y, una vez sustituidos aquellos que se identificaron como estructuralmente deficientes, la corroboración con las evidencias de daño encontradas en las piezas retiradas del puente.

### Antecedentes

El puente Río Papaloapan, está ubicado en el estado de Veracruz en el kilómetro 85 + 980 de la Carretera La Tinaja – Minatitlan, en el



**Figura 1**  
**Puente Río Papaloapan [1]**

tramo Entronque Cosamaloapan – Entronque Los Tuxtlas y fue puesto en servicio en Abril de 1995 (figura 1).

Este puente es del tipo atirantado que consta de 8 semi-arpas, cada una de ellas con 14 tirantes que dan un total de 112 tirantes, con una longitud total de 422 metros y un claro principal de 203 metros.

En el año 2000, se presentó la falla del tirante 11 de la semi-arpa 7 (torre 3, lado agua, aguas arriba), y para lo cual el Instituto Mexicano del Transporte fue invitado por la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (DGST-SCT) para formar parte del equipo que realizó el análisis de la falla de la pieza. De esta evaluación, se encontró que la falla se debió a la fractura del elemento del anclaje superior



**Figura 2**  
**Imágenes de la falla del tirante 11, semi-arpa 7 en el año 2000**

(botella) en una zona cercana a la soldadura con la placa de soporte, la cual se presentó bajo condiciones de operación normal sin que existiera alguna evidencia de deterioro previo (figura 2).

Del análisis del material constitutivo del elemento de anclaje superior, que incluyó análisis químico, metalográfico y pruebas mecánicas, destacaron los siguientes hallazgos [2]:

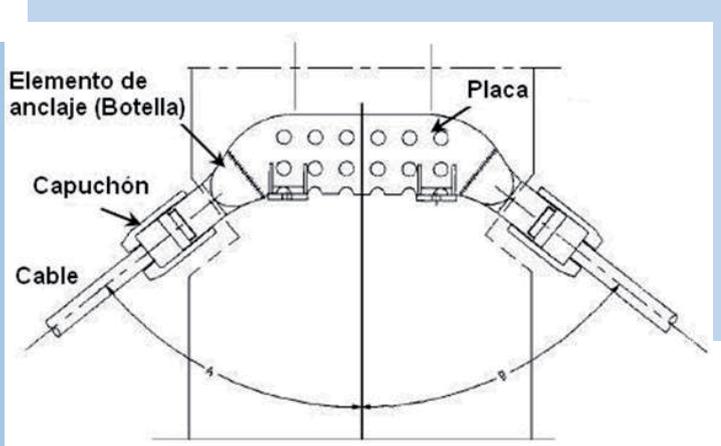
- Alto contenido de inclusiones y porosidades (figura 3), llegando incluso a registrar por ultrasonido un defecto de 15 mm de longitud.
- La microestructura presentó un tamaño de grano grande ASTM 1 y 2 (figura 3).



**Figura 3**  
**Inclusiones y porosidades del elemento de anclaje analizado en 2000**

- La macroestructura del material fue dendrítica y en la microestructura se encontró perlita y ferrita segregadas. Lo cual indica que el material no se le aplicó un tratamiento térmico adecuado, que concuerda con el tamaño de grano encontrado.
- En los ensayos de tensión, el material experimentó baja deformación plástica, tanto longitudinal como en reducción de área, por debajo de la norma de referencia para el tipo de material empleado en este tipo de construcciones.
- En los ensayos de mecánica de la fractura, el material experimentó una alta velocidad de crecimiento de grieta junto con una baja tenacidad a la fractura.

En la figura 4, se muestra el sistema de anclaje de este puente, en el cual se observa al elemento de anclaje superior (botella), el cual presenta una geometría como punta de desarmador con el fin de poderlo unir a la placa.



**Figura 4**  
**Sistema de anclaje superior [2]**

Como resultado de los análisis mostrados, el material presentaba una baja resistencia mecánica, que junto con la geometría del elemento y del propio sistema de anclaje del puente, hace que exista una alta concentración de esfuerzos en la punta del elemento de anclaje en la zona de unión con la placa, lo que puede provocar fallas de forma súbita en los tirantes del puente, ya que posee una baja capacidad para la acumulación de daño provocado por fenómenos como la fatiga o la sobrecarga.

### **Desarrollo de la metodología de inspección no destructiva**

Una vez terminado el análisis de falla del elemento de anclaje superior del año 2000, surgió la necesidad de conocer el estado estructural que tenían los 111 elementos restantes, con el fin de estimar la condición estructural del puente. Como alternativa de solución fue emplear la Inspección No Destructiva y en el transcurso de los años de 2001 y 2002, se desarrollaron las pruebas para calificar al material de los elementos de anclaje superior del puente [3]. Tomando como base el tamaño de grano encontrado en

la pieza fallada, se desarrolló la metodología para evaluar la calidad del material, utilizando el método de ultrasonido. Cabe destacar que esta metodología fue un desarrollo del Instituto Mexicano del Transporte, para identificar patrones similares con los que presentaba el elemento de anclaje que falló en el año 2000.

Para determinar el cambio en la calidad de la señal de ultrasonido, debido al tamaño de grano de la microestructura, se fabricó una probeta con tres secciones (figura 5), dos de las secciones con tamaño de grano grande y una con tamaño de grano fino (centro). El material se obtuvo de la pieza retenida que falló en el año 2000, y se modificó la microestructura mediante el empleo de tratamientos térmicos para refinar el tamaño de grano.

La diferencia en las señales de ultrasonido se muestra en la figura 6, el cual se traduce en pérdida de energía del haz ultrasónico debido al tamaño de grano. En la imagen de la izquierda se observa, que los ecos disminuyen en cada rebote de la señal con la pared posterior de la pieza debido al tamaño de grano grande del material, en el caso de tamaño de grano fino (a la derecha), este rebote permanece al mismo nivel del primer rebote de la señal con la pared posterior. Lo anterior significa que, se puede emplear la técnica de ultrasonido para calificar el tamaño de grano del material empleado en la fabricación de los elementos de anclaje superior del puente.



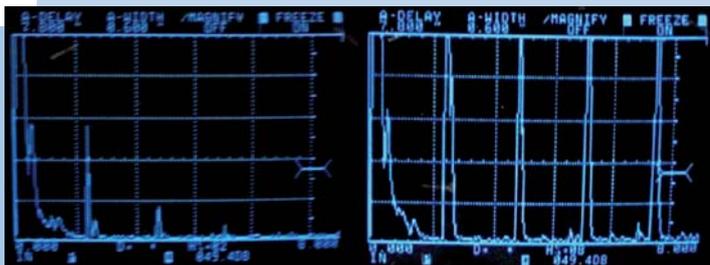
**Figura 5**  
**Probeta para determinar el tipo de señales de ultrasonido**



Figura 7

Espacio de inspección con ultrasonido

Una dificultad adicional se presentó para la inspección de los elementos de anclajes superior, que fue debido al espacio existente entre la columna y el propio tirante (figura 7), y que junto a la curvatura de la pieza, hizo necesario el desarrollo y fabricación de aditamentos especiales para poder inspeccionar y detectar el tamaño de grano, así como, la presencia de grietas en la unión soldada (figura 8).



Material con grano      Material con grano

Figura 6

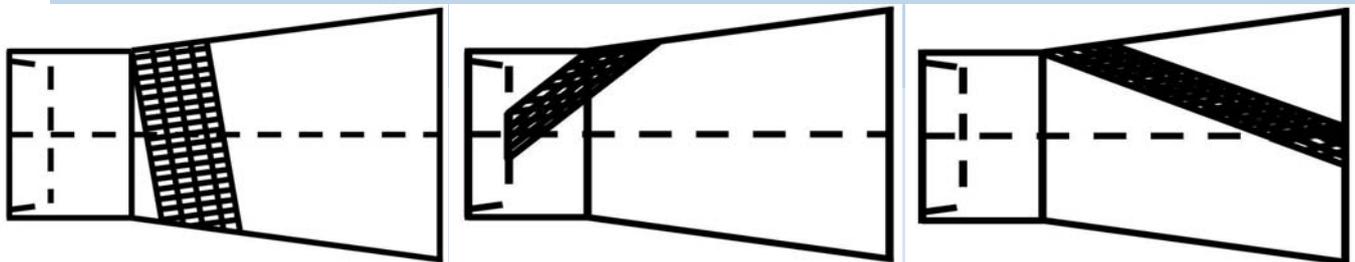
Indicaciones por ultrasonido para estimar el tamaño de grano

### Inspecciones no destructivas en el año 2003

En el año 2003, se realizaron las inspecciones por ultrasonido para calificar al material de los elementos de anclaje superior de los 112 tirantes del puente (incluyendo al reparado en el año 2000), en las que se encontraron que 8 de ellos fueron calificados como estructuralmente disfuncionales por tener tamaño de grano grande, 6 elementos adicionales mostraron una alta probabilidad de poseer una microestructura de grano grande y 2 más presentaron un alto contenido de defectos internos. Estos 16 elementos de anclaje superior son los que inicialmente se recomendaron para su sustitución, pero con el fin de hacer un estudio de confiabilidad de los 96 elementos de anclaje restantes, se incluyeron dentro del programa de sustitución a 4 elementos calificados como “en buena condición” los cuales fueron elegidos al azar con el criterio de que fueran representativos por la cantidad del tipo de botella [3], el resumen de los elementos de anclaje que se propusieron retirar se presentan en la tabla 1 y se ilustran en la figura 9.

### Inspecciones de 2008 procedimiento y resultados [4]

En el año 2008, se llevó a cabo la rehabilitación de los 20 elementos de anclaje superior del puente Río Papaloapan, durante el proceso de rehabilitación se realizaron inspecciones



(a) Haz recto

(b) Haz angular para zona interna

(c) Haz angular para la soldadura

Figura 8

Zonas de inspección con ultrasonido utilizando haz recto y haz angular



Torre 2 Semi-Arpa 3 y 4



Torre 2 Semi-Arpa 6 y 5



Torre 3 Arpas 1 y 2



Torre 3 Arpas 7 y 8

Figura 9

Tirantes que fueron programadas para rehabilitación

no destructivas antes de retirar el elemento de anclaje superior, una vez destensado el cable y descubierto el elemento de anclaje, el objetivo fue poder detectar agrietamientos en la soldadura, así como, en el elemento de anclaje, para ello se utilizaron tres métodos de inspección: visual para describir la superficie del elemento de anclaje y observar defectos mayores, líquidos penetrantes para revelar grietas superficiales y ultrasonido para verificar el tamaño de grano y detectar la presencia de defectos internos.

Los resultados de las inspecciones no destructivas se presentan a continuación:

### Inspección visual

Lo que se observó como principal característica, fue que las superficies de todas las piezas inspeccionadas tienen un alta rugosidad, típica de una pieza de fundición, en donde también se observan poros y rechupes en

distintas partes de las piezas, sin poseer un patrón específico.

### Inspección por ultrasonido

Para las inspecciones por ultrasonido se utilizó el equipo Quantum-TE y transductores con frecuencia de 5 MHz y de 1/4" de diámetro. En todos los casos se calibró el equipo en campo y se utilizó grasa como medio de acoplamiento, esto debido principalmente a la temperatura ambiente y a la humedad presentes en la zona, así como, a la alta rugosidad de las botellas y a la posición de la zona a inspeccionar de la pieza.

Los resultados de las inspecciones por ultrasonido, permitieron corroborar las calificaciones realizadas en 2003, como se observa en la tabla 1, en donde se muestran los resultados de las inspecciones por ultrasonido en los elementos de anclaje después de que

fino y presentan un tamaño de grano medio, así como, en la inspección 12, el cual fue calificado con tamaño de grano probablemente grande, cuando en realidad presenta un grano fino, el error en este último caso se debió a la presencia de porosidades, por lo que se registró una pérdida de la energía del haz ultrasónico y esto generó el error en la calificación.

De los resultados de las inspecciones con ultrasonido, en dos botellas se observaron defectos, en las inspecciones 3 y 15, la primera de ellas presenta un tamaño de grano grande y aún así se presentaron dos defectos, por lo que se supone que son defectos de tamaño considerable. El segundo caso, presenta un defecto de 14 mm de longitud. También se

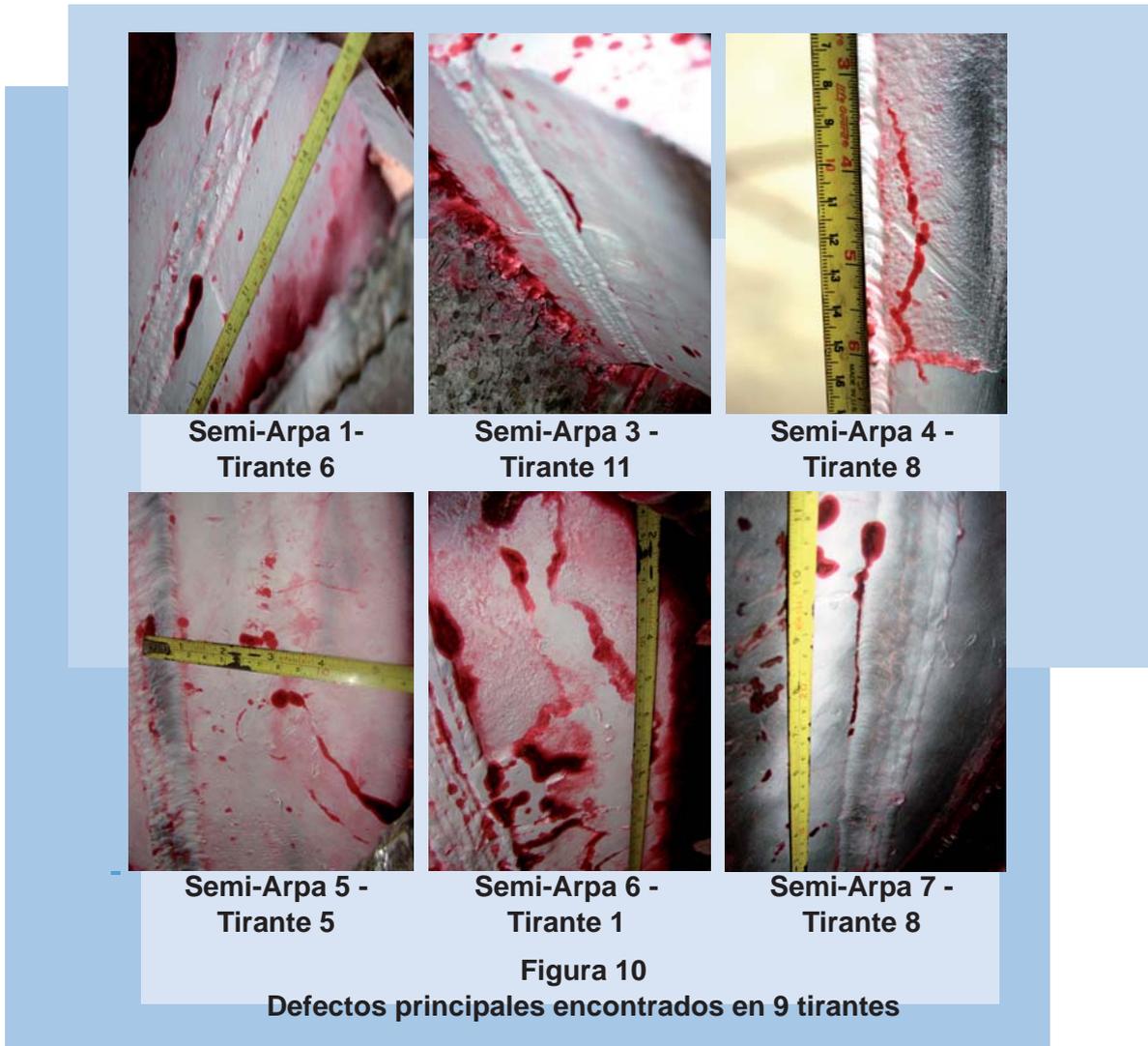
encontraron defectos en la soldadura de la inspección 13 y en la placa de las inspecciones 10, 11 y 19.

**Inspección con líquidos penetrantes**

Los resultados de la inspección por líquidos penetrantes, muestran en todos los casos indicaciones de discontinuidades en diferentes zonas de las piezas inspeccionadas como: rechupes o segregaciones, presencia de poros, diversas discontinuidades en la soldadura, sin embargo las principales indicaciones fueron la presencia de defectos en la botella en 9 piezas con diversos tamaños, en la figura 10, se muestran los defectos más significativos encontrados utilizando la prueba de líquidos penetrantes.

**Tabla 1**  
**Resultados de las inspecciones por ultrasonido en 2008 vs 2003**

# Inspección	Arpa	No. de Tirante	Calificación 2003	Calificación 2008
1	3	10	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
2	1	6	Tamaño de grano fino	Tamaño de grano medio
3	3	11	Tamaño de grano grande	Tamaño de grano grande
4	1	13	Tamaño de grano grande	Tamaño de grano grande
5	3	12	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
6	2	4	Tamaño de grano fino	Tamaño de grano medio
7	4	8	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
8	2	12	Tamaño de grano grande	Tamaño de grano grande
9	2	13	Tamaño de grano grande	Tamaño de grano grande
10	7	1	Tamaño de grano fino con alto contenido de poros	Tamaño de grano fino
11	6	13	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
12	7	8	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano fino
13	6	3	Tamaño de grano fino con alto contenido de poros	Tamaño de grano fino
14	7	9	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
15	6	1	Tamaño de grano fino	Tamaño de grano fino
16	7	10	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
17	5	5	Tamaño de grano fino	Tamaño de grano fino
18	7	12	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
19	5	10	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
20	7	13	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande



### Conclusiones

Con estos resultados y para este caso en particular, se encontró que las inspecciones por ultrasonido por medio de la evaluación del tamaño de grano aplicado a elementos embebidos en concreto es confiable, con una exactitud del 93%, esto es, 15 elementos de 16 fueron identificados satisfactoriamente con tamaño de grano grande. El elemento que fue inicialmente clasificado con tamaño de grano grande y resultó con tamaño de grano fino con una gran cantidad de poros, fue incorrectamente clasificado por el contenido de poros, en donde la disipación de la energía presenta la misma característica que un material con tamaño de grano grande. Por esta

razón, el elemento de anclaje fue clasificado como estructuralmente deficiente.

De las inspecciones con los elementos de anclaje descubiertos, 2 elementos presentaron varias discontinuidades que fueron identificadas con la prueba de ultrasonido y con la prueba de líquidos penetrantes. Por otro lado, en otros cuatro elementos, fueron encontrados defectos cerca del área de soldadura o en la zona afectada por el calor (ZAC), usando la técnica de líquidos penetrantes. Cuatro defectos grandes en diferentes elementos (2 con tamaño de grano grueso y 2 con tamaño de grano fino) fueron detectados con ambos métodos de inspección sobre la unión soldada del anclaje y la placa. Uno de estos defectos

es interno y fue detectado con la inspección ultrasónica, mientras que los otros tres fueron superficiales y se detectaron con líquidos penetrantes. En general, existe alguna relación entre las características de la microestructura (tamaño de grano, poros e inclusiones) y los defectos; pero el factor más importante está dado por la soldadura y el tratamiento térmico posterior.

Desde un punto de vista estadístico, la inspección ultrasónica inicial sobre los elementos de anclaje embebidos en concreto tiene un 93% de confiabilidad en lo que respecta a la identificación del tamaño de grano, 66% de confiabilidad en el reconocimiento de alto contenido de poros (2 elementos de 3), y 75% de confiabilidad para la detección de discontinuidades internas.

Con respecto a los elementos de anclaje calificados con "buena condición", es de destacar que en 3 de los 4 elementos rehabilitados presentaron defectos (75%), estos defectos se presentaron tanto en la soldadura, así como, defectos atribuidos al proceso de fabricación de estos elementos (fundición), como puede observarse en las imágenes de los elementos de anclaje del Arpa 1-Tirante 6, Arpa 5-Tirante 5 y Arpa 6-Tirante 1, de la figura 10.

Con el trabajo desarrollado en 2008, se disminuyó el riesgo de falla de los elementos de anclaje superior, al reemplazar los elementos con tamaño de grano grande los cuales presentaban una baja resistencia mecánica, pero permanecen aún en su sitio los elementos de anclaje que pueden presentar problemas de defectos en la soldadura o los generados por el proceso de fabricación, motivo por el cual, a este puente se le hará un seguimiento de las respuestas dinámicas, con el fin de ir monitoreando la condición estructural y su índice de confiabilidad, los cuales esperamos comentárselos en un artículo próximo.

## Bibliografía

- [1] Cárdenas, Roberto Alvarado; Francisco Javier Carrión Viramontes, J. Alfredo López López and Juan Carlos Toledano Andrade, *Monitoring and evaluation of the anomalous vibration of a cable in a stayed bridge*, Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2009, Proceedings of the SPIE International Society for Optical Engineers, Vol. 7295, San Diego Cal., USA, 8 April, (2009) ISBN: 9780819475558
- [2] López, José Alfredo; Carlos Agustín Poblano y Miguel Martínez, *Análisis de falla del dispositivo de anclaje del Tirante 11 Lado Agua Torre 3 del Puente Papaloapan*, Instituto Mexicano del Transporte, Informe de Proyecto 001, Sanfandila, Municipio de Pedro Escobedo, Querétaro, (2000)
- [3] Informe final de investigación EE 05/03, *Estudio para la evaluación de los dispositivos de soporte superior (botellas) de los anclajes de los tirantes del puente Río Papaloapan*, Instituto Mexicano del Transporte, México, (2003)
- [4] Carrión, Francisco Javier Viramontes; Miguel Martínez Madrid, José Alfredo López, Juan Antonio Quintana Rodríguez y Pablo Rodrigo Orozco, *Asesoría para la rehabilitación y estudio de integridad de los elementos de anclaje superior del puente Río Papaloapan*, Instituto Mexicano del Transporte, Informe de Investigación EE01/04, Sanfandila, Municipio de Pedro Escobedo, Querétaro, (2009)

LÓPEZ José Alfredo  
jalopez@imt.mx

QUINTANA Juan Antonio  
jaquintana@imt.mx

LOMELÍ María Guadalupe  
mglomeli@imt.mx

CARRIÓN Francisco Javier  
carrion@imt.mx

## GLOSARIO

### Artículo 1:

**Impacto ambiental:** es todo aquel efecto positivo o negativo ocasionado por diversas acciones inherentes a proyectos de desarrollo, sobre los factores naturales, sociales y culturales en un lugar y tiempo determinados.

**Externalidad del Transporte:** Son los efectos positivos o negativos que produce la operación del transporte y que son referidas básicamente al impacto ambiental, tales como el ruido, emisiones, residuos sólidos, accidentes, etc.

**MOBILE6:** Modelo computacional para la estimación de emisiones, desarrollado por la Agencia para la protección del medio ambiente de los Estados Unidos de América.

### Artículo 2:

**Defectos internos:** La mayoría de los materiales no son homogéneos y presentan defectos internos, los cuales afectan las propiedades mecánicas del mismo, estos

pueden ser; precipitados metálicos, inclusiones, poros, grietas, etc.

**Inspección No Destructiva:** Son métodos que utilizan principios físicos, que no dañan o alteran las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material, parte o componente sujeto a inspección.

**Método de líquidos penetrantes:** Es un método que permite detectar discontinuidades superficiales, y consiste en aplicar un líquido con una viscosidad muy baja, el cual penetra en la discontinuidad por el fenómeno de capilaridad y con la aplicación de un revelador previa remoción del exceso del líquido penetrante, resalta el contorno de las discontinuidades.

**Método de ultrasonido:** Este método se basa en la propagación de ondas ultrasónicas las cuales al encontrar un cambio en la impedancia acústica del medio se reflejan o se transmiten permitiendo encontrar discontinuidades internas en el material de estudio.

## PROYECTO EN MARCHA

### Estudios en modelos hidráulicos para definir el proyecto constructivo de la prolongación del rompeolas de Ensenada, B.C.

El propósito de este estudio es generar información sobre los costos de operación de vehículos representativos del tránsito interurbano nacional, y un procedimiento sencillo para su estimación en función del alineamiento geométrico y del estado superficial de las carreteras, como un apoyo para los responsables de elaborar la evaluación de proyectos de conservación y construcción de caminos.

Este trabajo se actualiza cada dos años (a partir de 2006), debido a la necesidad de contar con información reciente sobre el tema, derivada de la demanda proveniente de diversas áreas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), así como de profesionales que proporcionan servicios de consultoría y que laboran en las áreas de planeación de los gobiernos estatales.

Se toma como base el uso de los modelos matemáticos desarrollados por el Banco Mundial en 1987 (The Highway Design and Maintenance Standards Model, versión 3 - HDM III). Se utiliza también la nueva versión del programa de cómputo VOCMEX (programa conformado a partir de los modelos del Banco Mundial, versión 4.0), que considera la adaptación de dicho programa a las características técnicas de los vehículos que operan en México hecha en el propio IMT y que incluye la actualización de datos diversos sobre características técnicas de los vehículos, sus precios y los de sus insumos. Así, se elabora un conjunto de gráficas, las cuales permiten estimar los costos de operación para las siete configuraciones vehiculares contenidas en el estudio: tres tractocamiones articulados (T3-S3, T3-S2 y T3-S2-R4), un camión pesado de tres ejes (C3), un camión mediano de dos ejes (C2), un autobús foráneo y un vehículo ligero tipo, representativo de los automóviles.

Asimismo, se actualiza el ejemplo ilustrativo de la publicación, con el objeto de mostrar la magnitud de los costos de operación, condicionados por los alineamientos y la rugosidad, en comparación con los costos de conservación, durante la vida útil de una carretera.

Finalmente, el trabajo se complementa con tres apéndices que contienen información relativa a las características técnicas de los vehículos considerados en el análisis, así como sobre los consumos y rendimientos de combustibles. Además, se incluye información sobre el costo de fletes (proporcionada por algunas empresas dedicadas al transporte de carga), la cual se utilizó para validar los resultados finales

ARROYO José Antonio  
jaarroyo@imt.mx  
TORRES Guillermo  
gtorres@imt.mx

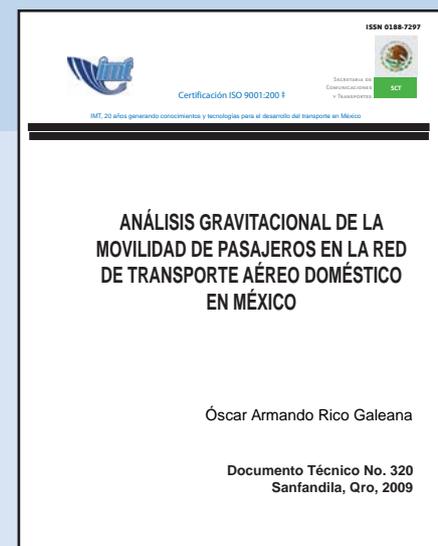
## PUBLICACIÓN

### Análisis gravitacional de la movilidad de pasajeros en la red de transporte aéreo doméstico en México

El objetivo de la **PUBLICACIÓN TÉCNICA 320** fue realizar un análisis gravitacional de la movilidad de los pasajeros que utilizan los servicios regulares de transporte aéreo en el espacio geográfico mexicano.

Se empleó un modelo de regresión lineal múltiple con estructura gravitacional, pero adaptado para ser calibrado a partir de datos empíricos, mediante la técnica de los mínimos cuadrados.

Los resultados de la presente investigación coinciden plenamente con los obtenidos previamente en los estudios de la movilidad de carga.



Se puede consultar de forma gratuita en la página del Instituto: <http://imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec/pt320.pdf>

Instituto Mexicano del Transporte

## EVENTOS ACADÉMICOS

### Desarrollo de aplicaciones del sistema de información geoespacial para el transporte

El pasado 19 al 23 de julio de 2010, dicho Curso Internacional fue llevado a cabo en las Instalaciones del Instituto Mexicano del Transporte en Sanfandila, Querétaro. La coordinación académica del curso estuvo a cargo de Miguel Backhoff.

Tuvo como objetivo impartir los conceptos y características básicas de operación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de Posicionamiento Global (GPS), con el propósito de identificar sus principales aplicaciones en el transporte carretero, a fin de incorporar la dimensión espacial a los eventos que son su objeto de estudio, y así apoyar los procesos de planeación y gestión derivados de la ubicación y las correlaciones espaciales de los fenómenos asociados a este modo de transporte. Así como Iniciar a los participantes en el uso y manejo de estas tecnologías, en particular en los programas comerciales ArcView y ArcGis y de los GPS; así mismo introducir a los asistentes en el conocimiento y manejo del SIG-SCT.

El curso se diseñó para el personal de los Centros SCT y oficinas centrales de la SCT.

Tuvo una asistencia de 26 participantes, de los cuales provinieron de la Dirección General de Conservación de Carreteras-SCT, Dirección General de Autotransporte Federal-SCT, Dirección General de Carreteras-SCT, Dirección General de Planeación, Gobierno del Estado de Michoacán, de los Centros SCT Tabasco, Sonora, Coahuila, Durango, Oaxaca, Michoacán, Chiapas, Hidalgo, Baja California y Guerrero; de la Universidad Autónoma de Querétaro y Universidad Politécnica del Valle de México.

La temática que se trató en dicho curso fue:

- Marco teórico de los Sistemas de Información Geográfica y de Posicionamiento Global (SIG-GPS).
- Identificación y desarrollo de aplicaciones de las tecnologías geoespaciales al transporte.
- Funciones de análisis espacial de los sistemas geoinformáticos.
- Planeación y gestión del transporte con apoyo de las tecnologías geoespaciales.

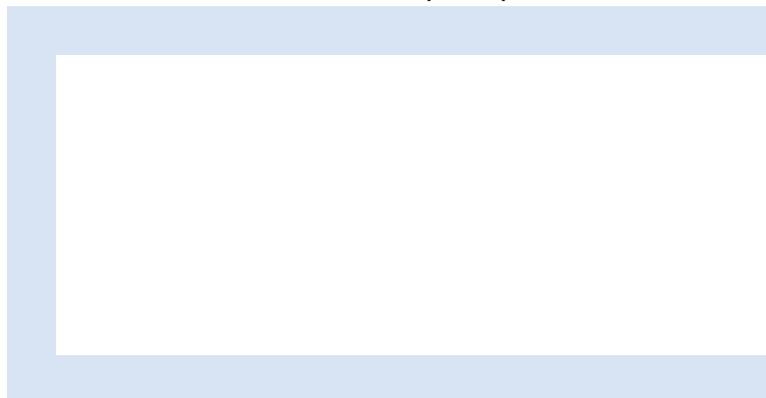
Los profesores que impartieron el Curso Internacional fueron Miguel Backhoff, Juan Carlos Vázquez Paulino, Luz Angélica Gradilla y Elsa Morales Bautista.





INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE  
APARTADO POSTAL 1098  
76000 QUERÉTARO, QRO  
MÉXICO

Registro Postal  
Cartas  
CA22-0005  
Autorizado por Sepomex



POR AVIÓN  
AIR MAIL