



Investigador, Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional (jose.rojas.marin@una.ac.cr)

Modelos de estimación de emisiones vehiculares como herramienta para mejorar la calidad del aire

José Félix Rojas Marín
Jorge Herrera Murillo



Investigador, Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional (jorge.herrera.murillo@una.ac.cr)



La contaminación del aire es un mal que aqueja a muchas ciudades modernas en el mundo. Dado el crecimiento acelerado que sufren la mayoría de estas, el problema continúa en aumento cada año afectando la salud de millones de personas, en especial poblaciones vulnerables como personas adultas mayores, enfermas crónicas y la niñez. De acuerdo con estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), 9 de cada 10 personas en el mundo respiran una mala calidad del aire, lo que se traduce en alrededor de 7 millones de muertes al año (OMS, 2018). Entre los contaminantes más importantes están las partículas en suspensión y gases inorgánicos como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el ozono troposférico (O₃); provenientes principalmente de procesos de combustión o por reacciones fotoquímicas en la atmósfera. Las partículas son el contaminante más estudiado en los últimos años, principalmente las de menor tamaño dada su capacidad de ingresar al sistema respiratorio y llevar consigo otras sustancias químicas tóxicas que fácilmente se absorben en el torrente sanguíneo ocasionando enfermedades de carácter crónico. A nivel de monitoreo

ambiental, se suelen medir las concentraciones en el aire de las partículas con diámetros menores a 10 y 2.5 micrómetros (mm), denominadas PM_{10} y $PM_{2.5}$ respectivamente, ya que estos tamaños se correlacionan fuertemente con problemas a la salud como: enfermedades del corazón, dificultades para respirar e irritación de las vías respiratorias. Los NO_x y el ozono son bien conocidos por ser promotores del asma, aumentar la susceptibilidad a enfermedades respiratorias y ocasionar bronquitis crónica (USEPA, 2020). Existen muchos otros contaminantes del aire con diversas afectaciones a las personas y también a estructuras (edificios, monumentos, etc.), especies vegetales y animales, además de reducir la visibilidad dando un mal aspecto a la ciudad.

Algunos países llevan varios años lidiando con este tipo de problemática ambiental y han desarrollado infraestructura y capacidad técnica para enfrentarla. Entre las medidas más exitosas está la implementación de los programas de gestión de la calidad del aire, donde se plantea el uso herramientas básicas para monitorear, conocer y modelar la relación emisor-receptor, con el fin de respaldar la toma de decisiones de las autoridades locales o nacionales. Esto potencia la creación de planes de mejora de la calidad del aire, los cuales se van actualizando en el tiempo o modificando según las metas de reducción de la contaminación del aire que se quieran alcanzar. Pero antes, se debe empezar por fijar límites máximos permitidos de exposición para proteger la

salud de las personas, para lo cual la OMS ha girado recomendaciones para cada uno de los contaminantes más comunes en las ciudades modernas (OMS, 2006). Sin embargo, estos valores son muy estrictos y la recomendación es que cada país adopte sus propios límites basados en la realidad que afrontan en términos de tecnologías disponibles, tipos de industria presentes, ordenamiento territorial y calidad de los combustibles disponibles, con el fin de alcanzar dichos valores de referencia a mediano o largo plazo. En Costa Rica tenemos actualmente el Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio (Decreto 39951-S), con el fin de regular valores seguros de exposición aguda y crónica en aire ambiente o inmisión. Pero esta normativa no nos permite determinar quiénes son los mayores contribuyentes a la contaminación presente en el aire, para esto debemos recurrir a otras herramientas.

Un componente muy importante de cualquier Programa de Gestión de la Calidad del Aire es el desarrollo periódico de inventarios de emisiones (IE) de contaminantes criterio y tóxicos. Estos permiten determinar cuáles son las fuentes de emisión más importantes dentro de una zona específica, al realizarse una estimación de los flujos máxicos para los contaminantes de interés dentro de un período de tiempo (usualmente anual). Los IE tienen múltiples aplicaciones entre las que destacan: identificar los mayores emisores, documentar las tecnologías de

control existentes, servir de línea base para generar nueva normativa, alimentar modelos de calidad del aire y hacer proyecciones o escenarios de las emisiones para evaluar el grado de éxito de alguna medida de mitigación. En Costa Rica no existe legislación vinculante que exija la elaboración periódica de IE para los contaminantes mencionados. Sin embargo, se han realizado dos inventarios para contaminantes criterio y uno para compuestos tóxicos, a través del Laboratorio de Análisis Ambiental, de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional. El primero se hizo con año base 2007 en solamente la Gran Área Metropolitana (GAM); el segundo, con año base 2011 cubriendo todo el país, y el de tóxicos se realizó también en el 2007 en la GAM. Estos IE coinciden en que las fuentes móviles, que circulan por carretera, hacen la mayor contribución a las emisiones antropogénicas con cerca de un 60 % (Herrera, 2014). Esto se puede explicar con los patrones de movilidad urbana, donde predomina la necesidad de desplazarse a los centros de trabajo; cerca del 34 % de los trabajadores utilizan los autobuses y el 33 % usan su vehículo propio; el resto camina (17 %), viaja en motocicleta (10 %) y taxi (6 %) (Sánchez, 2018). Sumado a esto, está el crecimiento del parque automotor, el cual se duplicó en los últimos 20 años, aumentando la congestión vial en las carreteras y la contaminación en las zonas urbanas (MINAE & PNUD, 2015). Solo

entre 2017 y 2018 se incrementó un 3.4 % (Programa Estado de la Nación, 2019). Dentro de estas fuentes, se agrupan todos los vehículos que circulan por carretera, independientemente del tipo de combustible que utilicen, donde los automóviles particulares representan el mayor aporte. Por ejemplo, en Costa Rica estos componen el 61.3 % de la flota vehicular, seguidos de un 20.1 % de motocicletas, 12.8 % carga liviana y 1.2% autobuses (Sánchez, 2018). Las emisiones que estos generan no solo se dan a través del escape (Figura 1), sino también por otros medios:

- *Emisiones por el escape*: ocurren solamente cuando el vehículo se encuentra en movimiento y corresponden a subproductos de la combustión incompleta.
- *Emisiones evaporativas*: estas consisten principalmente en compuestos orgánicos volátiles que permean de forma fugitiva en todo el sistema de combustión. Estas pueden ser:
 - En reposo caliente: se presentan luego de apagar el motor debido a la volatilización del combustible en el sistema de alimentación, ocasionado por el calor residual del motor.
 - En operación: son ocasionadas por las fugas de vapores de combustible que se presentan mientras el motor está en funcionamiento.

- *Emisiones por desgaste:* se dan por fricción en las llantas y el proceso de frenado durante la circulación normal. Estas emisiones se dan tanto en vehículos de combustión interna como eléctricos.

El comportamiento de los perfiles de emisión de los vehículos depende de una serie de variables tanto internas como externas, por ejemplo:

- *Tipo y calidad del combustible:* la composición de este afecta el proceso de combustión y determina el tipo y cantidad de contaminantes.
- *Tecnologías de control de emisiones:* ya sea sistemas pre o post

combustión. Por ejemplo: catalizadores, válvula EGR, filtros, “canisters”, etc., los cuáles disminuyen las concentraciones de algunos contaminantes. Muchos de estos dispositivos son alterados para aumentar la potencia del vehículo.

- *Flota vehicular y su antigüedad:* la composición de la flota vehicular y su edad tiene impacto importante en la calidad de las emisiones. En Costa Rica, la edad promedio ronda los 16 años según el Anuario de Revisión Técnica Vehicular ([Riteve SyC, 2019](#)).
- *Velocidad de circulación:* las tasas de emisión de algunos contaminantes, como los NOx, dependen de la velocidad del vehículo.

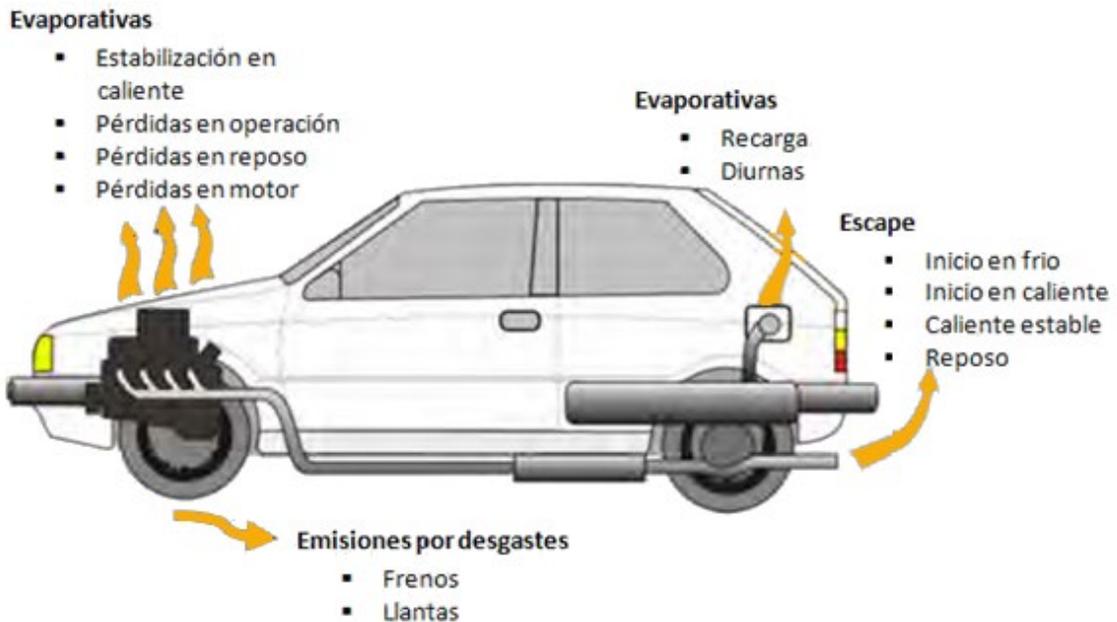


Figura 1. Tipos de emisiones al aire en un vehículo (IMT, 2009).

- *Otras variables:* recorridos anuales por tipo de vehículo, tipo de carretera, condiciones ambientales (temperatura y humedad) y ciclos de conducción.

Dada la cantidad de parámetros que impactan las emisiones generadas por las fuentes móviles, las complejas interacciones entre estos, y los altos costos de las mediciones reales, se utilizan los modelos matemáticos computarizados como técnica preferida de estimación. Esta técnica está limitada por cuales contaminantes son medidos durante las revisiones técnicas vehiculares. Entre los modelos más utilizados están:

- COPERT 5: desarrollado por la Agencia Ambiental Europea (EEA), es el modelo oficial en los países europeos y utilizado en la preparación de los inventarios de emisiones nacionales. Permite inventariar contaminantes criterio, tóxicos del aire y gases con efecto invernadero (GEI).
- *MOtor Vehicle Emission Simulator* (MOVES), es un modelo creado por la Agencia Ambiental de Estados Unidos (USEPA) y es el modelo oficial a nivel federal. Posee un alcance similar al COPERT en cuanto a los contaminantes que puede estimar.
- *International Vehicle Emissions* (IVE), fue desarrollado por el *International Sustainable Systems Research Center* (ISSRC) y la Universidad de California, con la intención

de ser utilizado en países en desarrollo. Tiene el mismo alcance que los modelos anteriores, pero es mucho más simplificado y limitado.

El COPERT 5 es uno de los modelos más utilizados porque permite actualizaciones periódicas de los factores de emisión, posee una interfaz amigable con el usuario, permite correr el modelo en 3 diferentes modos según la disponibilidad de información, y es más fácil de adaptar a condiciones de otros países fuera de la Unión Europea.

Si estos modelos son alimentados con la información correcta, tienen la capacidad de representar las emisiones tan reales como si fuesen medidas directamente. Esto permite, entre otras aplicaciones, realizar proyecciones de cuanto se incrementará la contaminación del aire y evaluar el impacto de propuestas de cambios en el sector transporte. Solamente a través de estimaciones confiables es posible tomar decisiones técnicas y políticas en pro de la mejora de la calidad del aire y, por ende, de la salud de las personas que habitan el país. Sin embargo, para lograr hacer una estimación exitosa se requiere una cantidad importante de datos relacionados al parque automotor. En la práctica mucha de esta información no está disponible en países para los que no fue desarrollado el modelo, o solo se encuentra parcialmente, lo que afecta la exactitud de las estimaciones. En esos casos, hay que valorar el grado de impacto sobre los resultados y llenar los vacíos

con suposiciones razonables o con datos de otros países que posean condiciones similares. Si bien en Costa Rica ya se han hecho esfuerzos para utilizar estos modelos, todavía queda mucho por trabajar

si queremos hacer mejores estimaciones ahora y en el futuro. En el **Cuadro 1** se mencionan las principales limitaciones de información, así como posibles soluciones.

Cuadro 1. Faltantes en la información necesaria para utilizar adecuadamente modelos de simulación.

Limitante Actual	Impacto sobre la modelación	Propuesta de mejora
Falta de un criterio de homologación entre las categorías de vehículos del modelo y las establecidas en el país.	Sesgo en las emisiones al no haber correspondencia con las características tecnológicas de los vehículos.	Las importaciones de los vehículos nuevos y usados deben venir con cuál estándar ambiental cumplen. También se podría generar un criterio a partir de los datos de la revisión técnica vehicular.
No hay estudios específicos sobre la distribución de velocidades de circulación por tipo de vehículo y carretera en el país.	Los informes existentes sobre circulación vial no brindan detalles, por lo que se han utilizado valores idénticos para todas las categorías.	Se puede explotar la información recolectada por aplicaciones tecnológicas de movilidad como <i>Waze</i> y <i>Google Maps</i> . Esto mientras se realizan estudios más especializados.
No hay datos del contenido de metales pesados y otros contaminantes en los combustibles.	Actualmente solo se regula la presencia de manganeso, pero para poder modelar otros tóxicos del aire se requiere un perfil de metales.	Las universidades públicas cuentan con técnicas para medir metales pesados. Estas, junto a RECOPE, podrían iniciar un programa de monitoreo para medir al menos una vez al año.
Se necesitan desarrollar estudios recientes de los ciclos de conducción para cada tipo de vehículo.	Parte de esta información se ha abordado de manera fragmentada en algunos trabajos de graduación, pero se necesitan actualizar y completar para utilizar el modelo adecuadamente.	Se podría incentivar la ejecución de este tipo de proyectos en la academia. Además, estos estudios se van a requerir en revisiones técnicas vehiculares que pretendan medir NOx.

Costa Rica debe apostar a la tropicalización de un modelo de emisiones vehiculares con el fin de contar con una herramienta más confiable y poderosa en la toma de decisiones por parte de las autoridades

superiores. Así, para el 2030 se podría valorar el grado de éxito ambiental de proyectos como la expansión del servicio de tren actual, la implementación del tren eléctrico, la venta de mezclas de gasolina con etanol o el impacto de mejoras en

la red vial de la GAM. También podrían evaluarse otras medidas como la sustitución parcial de la flota de autobuses por modelos más recientes o con estándares ambientales más estrictos, la introducción progresiva de vehículos eléctricos, la efectividad de la restricción vehicular, o la formalización del uso de catalizadores de tres vías.

Actualmente el Laboratorio se encuentra trabajando en la actualización del inventario de emisiones de contaminantes criterio y tóxicos del aire. Este tiene un énfasis especial en el sector transporte, con el fin de crear un nuevo programa de mejora de la calidad del aire con miras a los próximos 10 años, considerando que la movilidad urbana es un eje central del desarrollo.

Referencias

- Herrera, J. (2014). Inventario de emisiones de contaminantes criterio de Costa Rica en 2011. *Revista de Ciencias Ambientales*, 1(48), 5. <https://doi.org/10.15359/rca.48-2.1>
- Instituto Mexicano del Transporte-IMT. (2009). Propuesta metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades de la República Mexicana. IMT. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt322.pdf>
- OMS. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. OMS. https://www.who.int/publications/list/who_sde_phe_06_02/es/
- Organización Mundial de la Salud: OMS. (2018, 2 mayo). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado [Comunicado de prensa]. <https://www.who.int/es/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- Programa Estado de la Nación. (2019). Informe Estado de la Nación 2019 [Libro electrónico]. PEN. <http://hdl.handle.net/20.500.12337/7808>
- Riteve SyC. (2019). Anuario Revisión Técnica Vehicular. <https://www.rtv.co.cr/wp-content/uploads/Anuario2019.pdf>
- MINAE & PNUD. (2015). VII Plan nacional de energía 2015-2030. PNUD. <https://minae.go.cr/recursos/2015/pdf/VII-PNE.pdf>
- Sánchez Hernández, L. (2018). INFORME ESTADO DE LA NACIÓN EN DESARROLLO HUMANO SOSTENIBLE 2018. Programa Estado de la Nación. <http://hdl.handle.net/20.500.12337/2962>
- USEPA. (2020, 26 junio). Basic Information about NO2. <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#Effects>