

Chapter Title: TRANSPORTE Y CALIDAD DEL AIRE

Book Title: Introducción a la contaminación atmosférica

Book Author(s): Héctor Torquera González

Published by: Ediciones UC

Stable URL: <https://www.jstor.org/stable/j.ctt1bhkqvz.12>

JSTOR is a not-for-profit service that helps scholars, researchers, and students discover, use, and build upon a wide range of content in a trusted digital archive. We use information technology and tools to increase productivity and facilitate new forms of scholarship. For more information about JSTOR, please contact support@jstor.org.

Your use of the JSTOR archive indicates your acceptance of the Terms & Conditions of Use, available at <https://about.jstor.org/terms>



JSTOR

Ediciones UC is collaborating with JSTOR to digitize, preserve and extend access to *Introducción a la contaminación atmosférica*

Capítulo 9

Transporte y calidad del aire

TRANSPORTE Y CALIDAD DEL AIRE

9.1 Aspectos globales

El consumo de energía en el sector transporte ha mostrado una tasa de crecimiento sostenida a lo largo del período 1973-2010, con un incremento de 120% en la energía utilizada globalmente para el transporte por carretera entre 1973 y 2010 (AIE 2012).

El crecimiento sostenido de las ventas de vehículos de pasajeros indica que los consumidores asignan una alta preferencia a la adquisición de un vehículo a medida que mejora su nivel de ingreso (**Figura 9.1**). Asimismo, se ha producido una tendencia en favor de automóviles más pesados, equipados con un mayor número de características que incrementan el consumo de energía, lo que se suma al crecimiento en la utilización de energía por parte del sector del transporte.

Las emisiones atmosféricas del sector del transporte dependen de múltiples factores, como el tamaño de la flota de vehículos, su edad, tecnología, calidad del combustible, kilómetros recorridos por el vehículo y formas de conducir. La escasa tasa de rotación de las flotas, especialmente para vehículos diésel, y la exportación de los vehículos más antiguos desde los países ricos a los pobres, frenan el progreso en la reducción de emisiones en los países en vías de desarrollo.

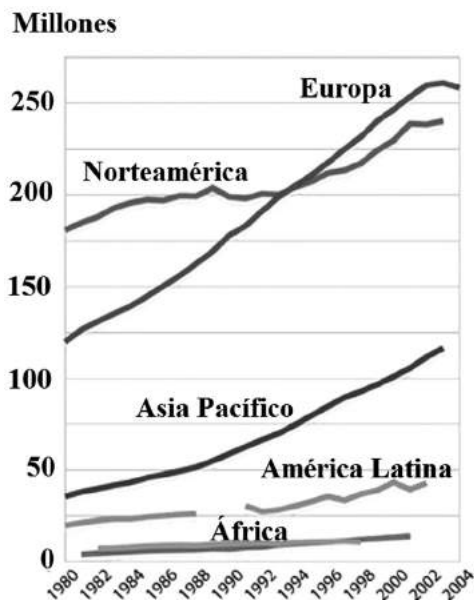
En algunas partes de Asia, la mayor parte de los vehículos en ruta son motocicletas y triciclos alimentados por pequeños motores de dos tiempos que proporcionan movilidad a millones de familias. Aunque de precio reducido, y con un consumo de combustible inferior al de los vehículos o camiones ligeros por vehículo, ellos contribuyen desproporcionadamente a las emisiones de partículas, hidrocarburos y monóxido de carbono (Faiz y Gautam, 2004).

FIGURA 9.1

Número vehículos de pasajeros, por región. América Latina incluye el Caribe.

La línea inferior corresponde a Asia occidental.

Fuente: http://www.grida.no/graphicslib/detail/number-of-passenger-cars-by-region_11d1



El cambio de los sistemas de transporte público al uso del vehículo privado incrementa la congestión y las emisiones atmosféricas. La falta de adecuadas políticas de planificación urbana y del empleo del suelo contribuye a una mayor dispersión de la población en las áreas metropolitanas, llevando inevitablemente al incremento de los viajes en automóvil (**Figura 9.2**) y del correspondiente consumo de energía. Esto tiene un correlato con la calidad del aire: Clark, Millet y Marshall (2011) han analizado 111 ciudades de EE.UU. y han encontrado que la oferta de transporte público reduce significativamente los niveles de $MP_{2.5}$, mientras que la centralidad de la distribución de la población urbana está asociada a menores exposiciones al ozono y al $MP_{2.5}$.

La falta de infraestructura adecuada para caminar y circular en bicicleta también contribuyen al incremento en el uso del automóvil. La **Figura 9.3** muestra el espacio relativo necesario para acomodar a los conductores de vehículos, a los que utilizan autobuses o a los que van en bicicleta, con implicaciones claras para la estrategia y planificación del transporte.

FIGURA 9.2

Intensidad de la actividad urbana (empleos + personas por hectárea) vs. el uso personal del automóvil en las 38 zonas metropolitanas con más altos ingresos en todo el mundo.

Fuente: Newman y Kenworthy, 2006

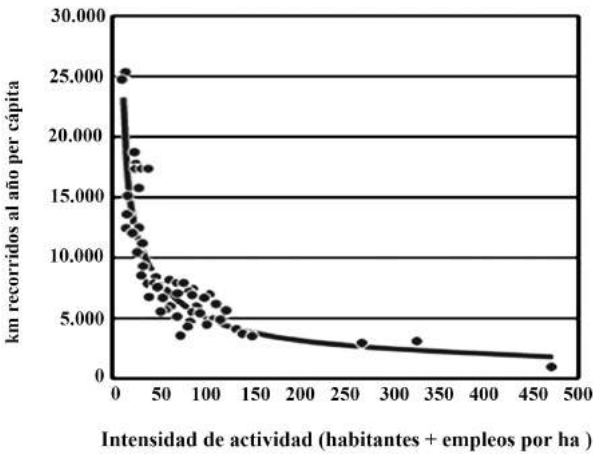
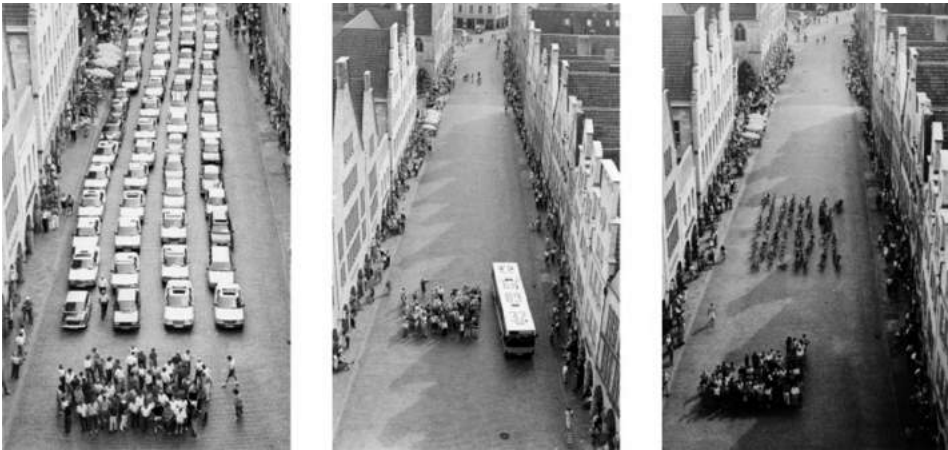


FIGURA 9.3

Cantidad de espacio requerido para transportar 60 pasajeros en automóvil, bus o bicicleta. Fuente: GEO4, PNUMA, 2007



9.2 Tendencia de las emisiones globales del transporte

Los combustibles y las tecnologías del automóvil han mejorado de forma sustancial durante las últimas dos décadas, fomentadas tanto por los desarrollos tecnológicos como por la creciente regulación ambiental. Las emisiones procedentes de los vehículos han sido parcialmente controladas mediante la eliminación del plomo de la gasolina, el uso de convertidores catalíticos, la mejora de los controles de pérdidas por evaporación de combustible, sistemas de diagnóstico a bordo y otras medidas. Las emisiones de los vehículos diésel se han reducido mediante la mejora del diseño de los motores y, para algunos vehículos, filtros para las partículas. Las tendencias en las emisiones se reflejan en gran parte en la evolución de la calidad del aire en grandes zonas urbanas, aspecto presentado en el Capítulo 1, lo que permite evaluar el grado de éxito de las anteriores medidas.

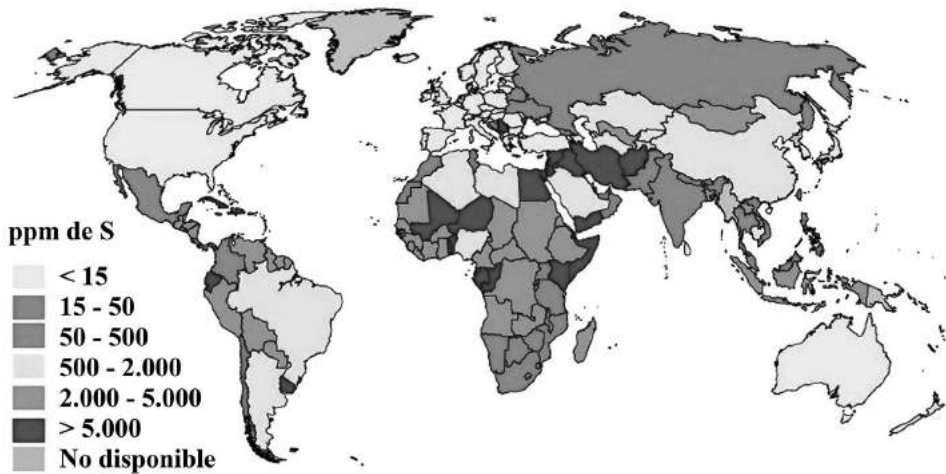
El aumento en el uso de los filtros para partículas exige reducir el azufre en el combustible diésel por debajo de los 15 ppm. Los niveles actuales de azufre en el combustible diésel difieren considerablemente entre los países (**Figura 9.4**). La reducción del azufre en la gasolina a niveles bajos permite la utilización de convertidores catalíticos más efectivos, y por consiguiente la mejora en el control de las emisiones. Los vehículos híbridos gasolina-electricidad, que tienden a ser más eficientes en el empleo del combustible en el tráfico urbano que los vehículos únicamente propulsados por gasolina, han sido introducidos ya en numerosos países desarrollados, pero su utilización es todavía limitada.

La mayor parte de los países desarrollados han efectuado progresos sustanciales en reducir las emisiones por vehículo, y numerosos países de ingresos per cápita promedio han implementado medidas significativas para controlar las emisiones de los vehículos. Además de la mejora de las tecnologías del automóvil, la efectividad de las inspecciones de los vehículos y de los programas de mantenimiento han ayudado a controlar las emisiones provenientes de los vehículos y a hacer cumplir mejores estándares de emisión (Gwilliam y otros, 2004). Sin embargo, el progreso en algunos países de bajos ingresos per cápita ha sido muy lento. Los países en vías de desarrollo no conseguirán obtener beneficios de las tecnologías de control de emisiones más avanzadas a menos que implementen primero medidas para disponer de combustibles más limpios.

En algunos países asiáticos, los vehículos motorizados de dos o tres ruedas contribuyen de forma desproporcionada a las emisiones. Sin embargo, las regulaciones en algunos países están reduciendo las emisiones de estos vehículos. El cambio de motores de dos ciclos a motores de cuatro ciclos, y la introducción

FIGURA 9.4

Distribución mundial de los niveles de azufre en el diésel en junio 2012.

Fuente: www.unep.org/transport/pcfv

de estándares de emisión que prohíban de forma efectiva la venta de nuevos vehículos alimentados por motores de dos ciclos llevarán, en su momento, a una mejora significativa en las emisiones de los vehículos (WBCSD 2005; Faiz y Gautam 2004). Además, se dispone de soluciones tecnológicas y costo-efectivas que permiten mejorar la eficiencia de la combustión de esos *three-wheelers* (Envirofit, 2012), sin necesidad de sacar de circulación vehículos antiguos (esto último sería socialmente excluyente y por ende, no sustentable).

El transporte público constituye una alternativa importante al uso de los vehículos privados, y se ha implementado con éxito en numerosas ciudades mediante la utilización de sistemas de transporte como trenes ligeros, metro y buses rápidos (Wright y Fjellstrom, 2005). Se ha implementado el cambio de combustibles desde el diésel hasta el gas natural comprimido para los vehículos de transporte público en ciudades como Delhi y El Cairo, llevando a reducciones en las emisiones de material particulado y de SO_2 . Sin embargo, en muchos países, el uso generalizado del transporte público continúa viéndose perjudicado por la ineficiencia y las percepciones negativas.

El transporte aéreo es una de las formas de transporte con un crecimiento más rápido, con un incremento del 80 por ciento en los kilómetros volados entre 1990 y 2003 (Portal de Datos GEO, desde la División de Estadísticas de las Naciones Unidas 2007). Este espectacular incremento se ha visto fomentado

por el aumento de la riqueza, más aeropuertos, el ascenso de las aerolíneas de bajo costo y la promoción del turismo en el extranjero. Se han logrado mejoras en la eficiencia energética, y los nuevos aviones comerciales utilizan aproximadamente 20% menos de combustible que los vendidos hace 10 años (IATA, 2007). El transporte por barco también ha crecido de modo notable desde fines de la década de 1980, lo que refleja el incremento en el comercio mundial. Se ha pasado de transportar 4.000 millones de toneladas en 1990 a 7.100 millones de toneladas en el 2005 (CNUCYD, 2006). La mejora en el rendimiento ambiental de la industria naval ha sido menos marcada que en el transporte aéreo.

9.3 Cuantificación de las emisiones del transporte terrestre

Las emisiones de las fuentes móviles en grandes zonas urbanas contribuyen a la degradación de la calidad del aire a escala local y regional. Estas emisiones se suman a la carga de contaminantes primarios y secundarios que amenazan la salud de las personas, dañan los ecosistemas e influyen en el clima (Molina y Molina, 2004; Molina y otros, 2004).

Las emisiones de los vehículos en ruta se cuantifican en los inventarios de emisiones, en base a factores de actividad (ver Capítulo 1) estimados de censos vehiculares o conteos de tráfico, y factores de emisión obtenidos de mediciones de emisiones en tubo de escape, datos que se incluyen en los modelos de emisión (Narsto, 2005). A pesar de la importancia de estas emisiones, su estimación es incierta para muchas especies químicas, debido principalmente a la gran variabilidad entre vehículos de los parámetros que afectan a las emisiones. Estos incluyen aspectos que afectan la eficiencia de la combustión interna y las consecuentes emisiones: tipo y tamaño de motor, composición del combustible, temperatura y presión de la combustión, presencia (o ausencia) de un sistema de control de la inyección del combustible, nivel de congestión, condiciones del camino, patrón de conducción (Nanzetta y otros, 2000), partidas en frío (Singer y otros, 1999) y otras condiciones del vehículo (deterioro o envejecimiento) pueden afectar significativamente las emisiones (Popp y otros, 1999). Para una revisión actualizada de datos de factores de emisión y su variabilidad, consultar el artículo de Franco y otros (2013).

La influencia de todos esos factores pone de relieve la necesidad de aplicar técnicas de medición que capturen las emisiones de vehículos en condiciones reales, de modo de disponer de inventarios de emisiones confiables. Se han desarrollado diversas técnicas para medir las emisiones, tanto en condiciones

de laboratorio como en condiciones de conducción real. Entre estas técnicas podemos mencionar estudios con dinamómetro de chasis (Whitfield y otros, 1998; Yanowitz y otros, 1999), estudios en túneles (Rogak y otros, 1998; Kirchstetter y otros, 1999), monitoreo remoto de emisiones en túneles y puntos fijos (Bishop y otros, 1989; Jiménez y otros, 2000; Schiffler y otros, 2005), y sistemas portátiles de medición de emisiones (PEMS, Cadle y otros, 2002).

Las condiciones reales de conducción pueden diferir de las obtenidas con dinamómetros en distintas formas. Además, típicamente el número de vehículos muestreados es bajo. Las otras técnicas muestrean un número mayor de vehículos, pero en condiciones limitadas de estados de conducción. Los estudios en túneles muestrean de cientos a miles de vehículos, pero miden valores promedio de toda la flota, aunque se puede diferenciar entre vehículos livianos (*light duty*) y pesados (*heavy duty*). La instrumentación colocada a bordo de vehículos puede caracterizar emisiones en un amplio espectro de estados de conducción, pero típicamente el número de vehículos muestreados también es pequeño (Wenzel y otros, 2000).

9.3.1 Monitoreo remoto (óptico) de emisiones

Las técnicas de monitoreo remoto muestrean emisiones de un amplio espectro de edades, modelos, mantención, e historial; sin embargo, el tiempo de muestreo es pequeño ($\sim 0,1$ s) y el tipo de patrón de conducción es usualmente limitado. La Universidad de Denver desarrolló un sistema de monitoreo remoto de emisiones de CO en 1987 (Bishop y otros, 1989). El instrumento en su versión actual utiliza espectroscopia IR no dispersiva para medir CO, CO₂ e hidrocarburos del tubo de escape, mientras que el NO se mide por espectroscopia UV no dispersiva. Los haces de radiación están dirigidos a través de una línea de tráfico hacia un detector (**Figura 9.5**). El sistema de adquisición de datos se activa cuando el vehículo cruza los haces de luz y adquiere, despliega y almacena la atenuación de la radiación IR o UV debida a la presencia de gases en la pluma del vehículo en su paso cruzando los rayos del sensor.

La medición toma menos de un segundo; y debido al corto tiempo del muestreo, es posible recolectar datos de hasta miles de vehículos al día con un solo equipo. Cada día se recalibra el sistema de medición mediante gases patrones. Los cocientes de emisiones se pueden combinar con la información de consumos de combustibles para calcular emisiones individuales en gramos de contaminante por L de combustible consumido. Si los datos son representativos de toda la flota, entonces se puede estimar la emisión total de una zona urbana.

FIGURA 9.5

Ejemplo de despliegue de sistema de monitoreo remoto para medición de plumas de tubos de escape de vehículos ligeros



Asimismo se puede medir simultáneamente la velocidad y aceleración del vehículo, junto con la placa de identificación, lo que permite ingresar más información relativa al vehículo, como datos de la inspección técnica obligatoria, por ejemplo. Debido a que las emisiones dependen de la carga a que está sometido el vehículo, se calcula una potencia específica de cada uno de ellos en base a la pendiente del camino, velocidad y aceleración. De esta forma se pueden clasificar y procesar los numerosos datos adquiridos en estos sistemas. Una expresión para la potencia específica del vehículo (PEV) es la siguiente:

$$PEV(kW/t) = V \cdot \{1,1 \cdot a + 9,81 \cdot \text{pendiente}(\%) + 0,132\} + 0,00121 \cdot V^3$$

Ecuación 9.1

En donde:

PEV: potencia específica del vehículo, en kW/t

a : aceleración del vehículo

pendiente : inclinación de la vía, en porcentaje

V : velocidad del vehículo

La **Figura 9.6** muestra resultados de mediciones hechas en Las Vegas, EE.UU. (Kuhns y otros, 2004). Las abscisas corresponden a PEV y las ordenadas los factores de emisión de cada contaminante, expresados en g de contaminante por kilo de combustible consumido.

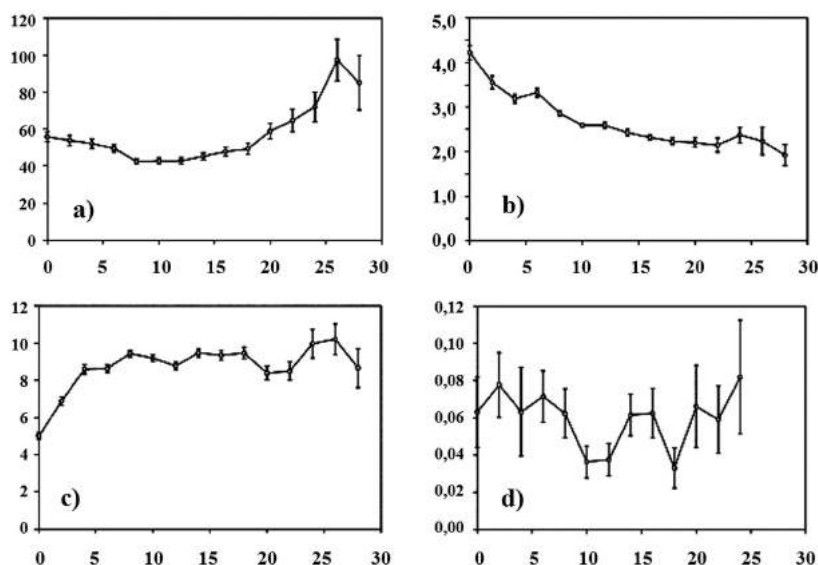
Esta técnica se ha usado en las siguientes aplicaciones:

- Caracterizar las emisiones de toda la flota, ya que las mediciones de estos detectores ópticos se han correlacionado muy bien con emisiones medidas en ensayos de dinamómetros (Ko y Cho, 2006).
- Identificar vehículos de emisiones muy bajas o muy altas; los primeros se pueden eximir de inspecciones y los segundos someterse a revisiones con mayor frecuencia.
- Desarrollar un inventario de emisiones en base al consumo de combustibles en una zona urbana, en conjunto con estimaciones de emisiones evaporativas de HC y de emisiones de las partidas en frío (Singer y Harley, 2000).
- Evaluación y seguimiento de medidas de control. Se puede usar la metodología para medir las emisiones de vehículos anteriores y posteriores a la entrada en vigencia de regulaciones (Guo y otros, 2007).

FIGURA 9.6

Factores de emisión (g/kg) para vehículos a gasolina medidos en Las Vegas, EE.UU.:

a) CO; b) HC; c) NO; d) PM. La abscisa es PEV en kW/t



Como ejemplo de resultados, la **Tabla 9.1** compara los valores de las emisiones de NO de vehículos ligeros obtenidos en diversas ciudades de EE.UU. con las medidas en Ciudad de México. De esta forma se puede hacer un seguimiento temporal al comportamiento de la flota de vehículos y evaluar la efectividad de las políticas sectoriales de reducción de emisiones.

TABLA 9.1
Comparación de estimación de emisiones de NO de vehículos ligeros por monitoreo remoto (Schiffer y otros, 2008)

Año	Chicago NO (ppm)	Phoenix NO (ppm)	Denver NO (ppm)	Los Ángeles NO (ppm)	Ciudad de México NO (ppm)
2000	316	448	511		834
2001		483	411		
2002	262	327			
2003			456	323	
2004	236	245			
2005			371	242	
2006					691

9.3.2 Técnicas de seguimiento de vehículos

Se han desarrollado laboratorios móviles, instalados en vehículos, con instrumentos de respuesta rápida, que han medido emisiones en zonas urbanas (Kittelson y otros, 2000; Kolb y otros, 2004; Shorter y otros, 2005; Zavala y otros, 2006). En la técnica de seguimiento, un laboratorio móvil toma muestras repetidas de un mismo vehículo objetivo. Al usar instrumentación basada en mediciones espectroscópicas de respuesta rápida, junto con otras técnicas de medición rápida de gases traza, se puede hacer un seguimiento de la pluma de emisiones de un vehículo. El proceso se repite con múltiples medios de transportes, obteniéndose así una muestra representativa del parque vehicular en una zona urbana dada.

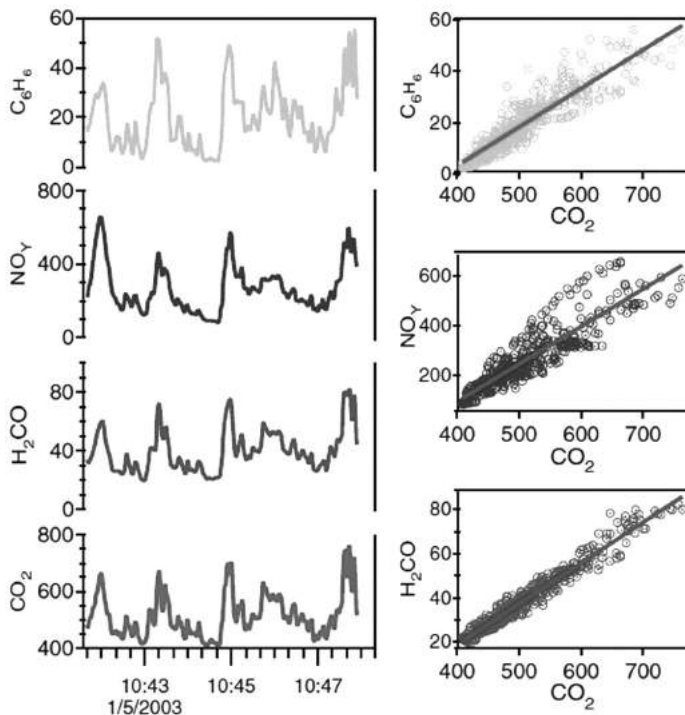
Así, de modo idéntico a los sistemas de monitoreo remoto, las concentraciones de distintas especies (NO, CO, HC, etc.), normalizadas por el CO₂ como especie trazadora de la combustión, son obtenidas y los resultados muestran factores de emisión directamente relacionados con el consumo de combustible

de cada vehículo. Las técnicas de alta resolución temporal entregan información muy valiosa de las características de la emisión de vehículos individuales. Esto permite capturar la variabilidad temporal de las distintas emisiones de un mismo vehículo para diversas condiciones de manejo, lo cual no es factible con un monitor remoto instalado en un punto fijo de medición. La **Figura 9.7** (Zavala y otros, 2006) muestra un ejemplo de resultados para el seguimiento de un vehículo a gasolina durante varios minutos.

Además de la técnica de seguimiento individual, esta técnica permite obtener promedios de la emisión de la flota, procesando plumas de vehículos seleccionadas al azar desde el tráfico. La aplicación exitosa de este método requiere una muestra grande de esos períodos de emisión, y un tiempo de muestreo suficientemente largo, de manera que se incluyen a grandes emisores de forma

FIGURA 9.7

Izquierda: mediciones de CO_2 , formaldehído, NO_y y benceno, en ppb.
Los paneles de la derecha muestran la correlación de cada especie con el CO_2 en ppm
(Zavala y otros, 2006)

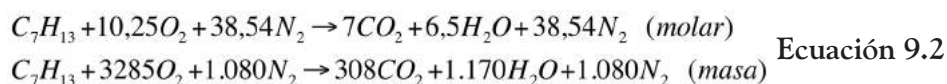


representativa. Así, aplicando el teorema del límite central, los promedios de emisiones deberían estar normalmente distribuidos si las muestras son no sesgadas y suficientemente grandes. Las aplicaciones de la metodología son las mismas que en el caso de detectores ubicados en un punto fijo de la red vial.

9.4 Control de emisiones de tubo de escape de vehículos

9.4.1 Emisiones de vehículos a gasolina

En el motor de combustión interna convencional a gasolina, se emplea un ciclo Otto de cuatro tiempos, donde se inyecta una mezcla de aire y vapor de gasolina en el cilindro; la mezcla se comprime y se inicia la combustión mediante la acción de una bujía que entrega una chispa. Los productos de la combustión generan alta presión y temperatura en el interior del cilindro, expandiendo el cilindro y generando trabajo útil. En base molar y másica, la reacción de combustión está dada por:



Luego, la combustión completa teórica, en condiciones estequiométricas genera CO_2 y agua. La relación aire a combustible (A/C) expresada en masa, en condiciones estequiométricas es:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{\text{estequiométrico}} = \frac{328 + 1.080}{97} = 14,7 \quad \text{Ecuación 9.3}$$

Este valor es característico de muchos hidrocarburos o mezclas. Se suele definir una razón de equivalencia ϕ como el cociente combustible a aire, respecto del valor estequiométrico:

$$\phi = \frac{(C/A)_{\text{usado}}}{(C/A)_{\text{estequiométrico}}} = \frac{(C/A)_{\text{estequiométrico}}}{(C/A)_{\text{usado}}} \equiv \frac{1}{\lambda} \quad \text{Ecuación 9.4}$$

Donde λ es la razón relativa aire a combustible. Las mezclas con ϕ menor que 1 (o λ mayor que 1) se denominan mezclas pobres; en el caso opuesto se trata de una mezcla rica. La variación de las emisiones de CO, NO e HC depende fuertemente de la razón aire a combustible, como se muestra en la **Figura 9.8**. Las emisiones de CO se reducen con mezclas pobres, y algo similar ocurre con los hidrocarburos. Por otra parte, como en condiciones estequiométricas las temperaturas de combustión son máximas, también son máximas las emisiones de NO, ya que la oxidación del nitrógeno del aire se favorece a mayores temperaturas.

El control de este tipo de emisiones gaseosa se realiza agregando en el tubo de escape un dispositivo denominado convertidor catalítico, que es un reactor donde se completa la reacción de oxidación del combustible, oxidando el CO e hidrocarburos a CO_2 y agua, y a la vez reduciendo el NO a nitrógeno, en un mismo equipo que contiene Pt, Rh y Ce como catalizadores, distribuidos sobre la superficie de un material cerámico y poroso que constituye el núcleo del convertidor catalítico. Para conseguir este objetivo de control, los gases que ingresan al convertidor deben tener una composición química muy específica, con una ventana de operación muy estrecha en torno al valor estequiométrico de aire a combustible (**Figura 9.9**).

FIGURA 9.8

Concentraciones de CO (%), HC (ppm) y NO (ppm) en tubo de escape en función de la razón aire a combustible (caso de emisiones no controladas)

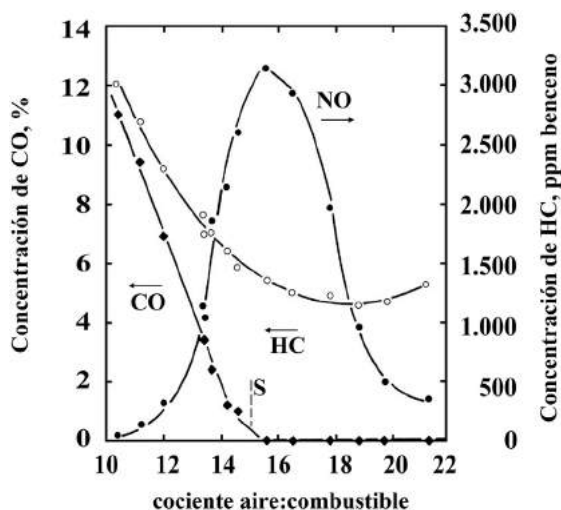
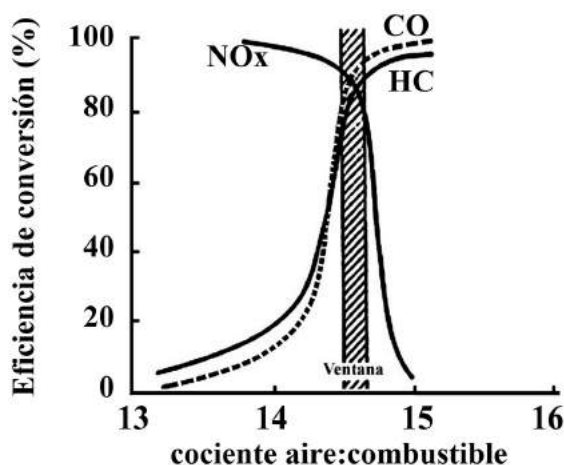


FIGURA 9.9

Esquema de operación de un convertidor catalítico



El sistema de control consiste en un sensor electroquímico que se ubica en la descarga de gases del convertidor y que analiza el contenido de oxígeno en esa corriente, de manera de actuar sobre el sistema de inyección para conseguir mantener λ en valores bien acotados. La respuesta del sensor a 600 °C de operación es de solo 50 ms.

9.4.2 Emisiones de vehículos diésel

En el ciclo básico del motor diésel, el aire (no mezclado con el combustible) se comprime hasta alta temperatura y presión en la etapa inicial del ciclo. Antes de llegar a su punto de volumen mínimo (volumen muerto), se inyecta el combustible y se produce la ignición. La regulación de la potencia se consigue variando solamente la tasa de inyección del diésel y manteniendo la tasa de entrada de aire relativamente constante. En los motores diésel se opera con relaciones aire a combustible de 100:1 a 15:1, es decir, mezclas más pobres que en el caso de motores a gasolina.

El aire se ingresa al cilindro en forma tangencial para alcanzar mejor mezclado con las gotas de combustible inyectado. Las emisiones incluyen: humos, CO, hidrocarburos no quemados NOx y ruido. Todas estas emisiones dependen, de modo complejo, de los siguientes factores: diseño de la cámara de combustión, sistema de inyección, composición del combustible, incluyendo

aditivos, relación A/C, aspiración natural o a mayor presión, y el estado del motor. Todas las emisiones (excepto los hidrocarburos) aumentan al acercarse el motor a operar en condición estequiométrica.

El humo proveniente de un motor diésel se clasifica como negro, blanco o gris y azul. El humo negro es carbono elemental formado en el rompimiento térmico de moléculas en la cámara de combustión, el que posteriormente ha coagulado, formando partículas más grandes y visibles. El humo blanco o gris se debe a residuos no combustibles. El humo azul indica combustible no quemado o presencia de aceite lubricante; en ambos casos, esto requiere mantención para corregirlo.

En los motores diésel, el exceso de aire implica condiciones oxidantes en los gases de salida. Se han desarrollado convertidores catalíticos para reducir las emisiones de gases, de manera análoga al caso de los vehículos a gasolina. No obstante, esto requiere que el combustible tenga un bajo contenido de azufre, típicamente menor a 50 ppm. Debido a la mayor toxicidad de las partículas emitidas por los motores diésel, los dispositivos de postcombustión más utilizados son las trampas de partículas, que las retienen por un tiempo prolongado sobre una superficie catalítica que favorece su combustión completa. La **Figura 9.10** muestra un diseño común de una trampa de partículas, las que usualmente se colocan reemplazando al silenciador del vehículo. Este dispositivo empieza a acumular cenizas con el tiempo, por lo cual el material cerámico debe ser limpiado o bien cambiado completamente en forma periódica.

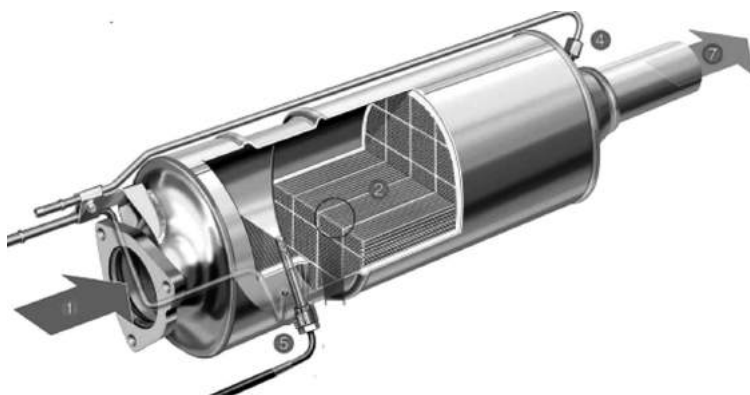
Otro aspecto que hay que considerar en el caso de los vehículos diésel es que ellos se operan frecuentemente en condiciones de marcha neutra, especialmente en el transporte de carga. Se ha encontrado que las emisiones de NO_x en dichas condiciones son particularmente altas con respecto a otras condiciones de manejo como andar en carretera a 90 km/h (Brodrick y otros, 2002), aspecto que debe tomarse en cuenta en los inventarios de emisiones y en la simulación de ciclos de manejo en dinamómetros que sean representativos del manejo real de esos vehículos.

También se requiere un contenido de azufre bajo unos 50 ppm para que esta tecnología sea viable. La eficiencia de las trampas de partículas es muy alta, y sobre todo son capaces de reducir las partículas ultrafinas, como se puede apreciar en la **Figura 9.11**.

Estos dispositivos se han instalado exitosamente en buses, camiones pesados, maquinaria pesada fuera de ruta y barcos, con desempeños satisfactorios y similares a los mostrados en la **Figura 9.11**. A medida que las fuentes móviles

FIGURA 9.10

Diagrama de una trampa de partículas para emisiones diésel.
 1: ingreso de gases de combustión; 2: filtro; 4: sensor de presión; 5: sensor de temperatura; 7: salida de gases filtrados. Fuente: www.carmagazine.co.uk

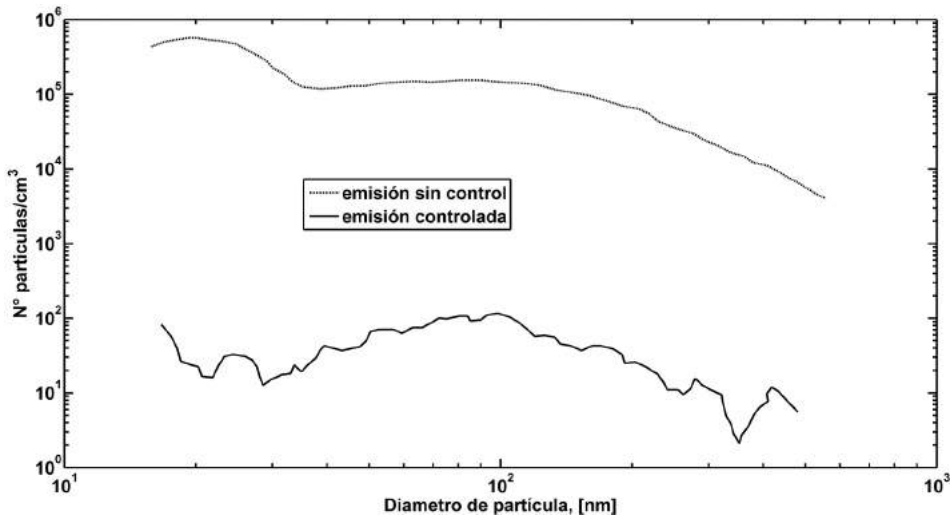


en ruta se van reduciendo, las emisiones del resto de la maquinaria diésel se harán relativamente más importantes y la regulación se extenderá igualmente a esas categorías de fuentes.

Un problema que poseen los dispositivos de postcombustión para vehículos diésel es que su característica catalítica oxidativa facilita la oxidación de parte del NO de los gases de combustión, convirtiéndolos a NO_2 , gas oxidante que favorece la formación del ozono (Capítulo 6) en ciudades donde hay altas emisiones de NO_x . Así, las emisiones tradicionales de tubo de escape diésel, que consistían en más de 90% molar de NO, ahora poseen una mayor fracción NO_2/NO_x , por lo que la capacidad de formación de ozono de esas emisiones aumenta, pues se emite NO_2 primario y se deja de emitir NO, que participa en la destrucción del ozono. Esta consecuencia no deseada de la implementación masiva de filtros de partículas se ha apreciado en una disminución de la caída de la concentración de ozono en Londres (BBC News, 6 de diciembre de 2012). Para contrarrestar este efecto, en Estados Unidos los vehículos diésel más pesados incorporan a continuación de la etapa oxidativa una etapa de reducción catalítica selectiva, para abatir las emisiones de NO_x ; esta medida se ha implementado a partir del 2010.

FIGURA 9.11

Desempeño de un filtro de partículas para reducir las concentraciones (N°/cm^3) de las emisiones de escape de vehículos diésel



9.5 Otras medidas de control de emisiones

Las autoridades regulatorias cuentan con diversas herramientas para reducir las emisiones del sector transporte. A continuación se describe brevemente cada una de ellas.

9.5.1 Programas de inspección y mantención técnica

Estos programas están diseñados para asegurar que los vehículos en ruta poseen estándares mínimos de desempeño, y están diseñados de manera que solamente los vehículos que son grandes emisores fallen la aprobación. Las plantas de revisión técnica son operadas por empresas privadas que han postulado a licitaciones hechas por la autoridad. Los conductores deben obtener certificados de aprobación. La inspección cubre los componentes claves del equipamiento de control de emisiones y se verifican las emisiones por el tubo de escape.

Estos programas identifican aquellos vehículos en los que no hay una operación adecuada o que tienen otros problemas que causan emisiones elevadas. Los vehículos que no cumplen deben ser reparados y vueltos a revisar. Los programas pueden ser muy efectivos en reducir las emisiones de la flota,

identificando y retirando a los grandes emisores, y reduciendo las tasas de conductas incorrectas. Los componentes de un programa son los siguientes:

- a) Un ensayo estandarizado para medir emisiones de tubo de escape
- b) Fiscalización suficiente para promover cumplimiento de la revisión anual, semestral, etc.
- c) Personal técnico calificado y entrenamiento en el diagnóstico y reparación
- d) Estándares de emisión diferentes según antigüedad del vehículo
- e) Minimizar excepciones
- f) Evaluación periódica por parte de la autoridad regulatoria

El continuo aumento de las exigencias de los estándares de emisión de los vehículos, como por ejemplo los estándares EURO-I a EURO-V de la Comunidad Europea se ha reflejado que en los países desarrollados las emisiones globales se han reducido, debido a una acelerada tasa de recambio de vehículos en conjunto con estándares de emisión más exigentes. Por ejemplo, Bechle, Millet y Marshall (2011) han analizado 86 ciudades en el mundo, estimando las concentraciones ambientales de NO_2 mediante monitoreo satelital, encontrando que dichas concentraciones siguen una curva de Kuznets con un máximo en alrededor de 30.000 dólares (valores de 1995); por encima de ese valor de PIB, las concentraciones ambientales empiezan a disminuir. Este valor es muy superior al estimado para otros contaminantes (Barbier, 1997) expresados en la misma moneda: 4.900 a 14.200 para SO_2 , 4.900 a 12.700 para MP_{10} , y 13.000 a 25.000 para CO.

9.5.2 Medidas de gestión y control del transporte

Estas medidas están normalmente incluidas en un plan de mejoramiento del transporte urbano, donde se coordinan las distintas iniciativas. Estas apuntan a tener menos vehículos en las calles o a reducir la congestión. Las medidas que se han utilizado en diversas partes del mundo se pueden clasificar en:

- 1) Opciones de tránsito: vías exclusivas y segregadas para transporte público, vías para peatones y ciclistas, etc.
- 2) Incentivos económicos: estacionamientos más caros, subsidios a vehículos compartidos, cobro por el uso de la vialidad e impuestos a combustibles.
- 3) Medidas regulatorias: prohibiciones de estacionar en ciertas vías, zonas libres de autos, restricción a circular ciertos días, zonas de baja emisión.

Todas estas disposiciones buscan reducir la dependencia del vehículo privado para transporte de personas, reduciendo la congestión y consiguiendo mayores velocidades de circulación. En general, a medida que las velocidades medias del tráfico aumentan, las emisiones de los vehículos disminuyen.

Asimismo puede hacerse gestión de demanda fomentando horarios laborales diferidos, semanas con cuatro días hábiles en rotación, etcétera. Esto incluye el desarrollo urbano con servicios locales suficientes para reducir las distancias recorridas en automóvil.

9.5.3 Uso de combustibles alternativos y biocombustibles

Con respecto a los combustibles reformulados, el uso de combustibles oxigenados se ha probado como opción de reducir las emisiones de CO; se ha encontrado que una mezcla con 3% de oxígeno en masa reduce hasta en 30% las emisiones de ese gas. Las emisiones de COV tienden a reducirse un poco, mientras que las de NOx suben, lo cual no es recomendable en zonas impactadas por ozono. La mezcla de gasolinas con metanol, etanol, ter-butil alcohol o metil ter-butil éter (MTBE) han sido usadas en EE.UU., pero el efecto secundario ha sido la contaminación de aguas subterráneas por derrames y la dificultad de limpiar esas napas debido a la alta solubilidad del aditivo en el agua.

Los combustibles alternativos incluyen el gas natural comprimido (GNC), gas licuado de petróleo (GLP) y metanol puro o etanol. Estos últimos tienen poderes caloríficos muy inferiores a las gasolinas, mientras que el CNG y LPG tienen mayor contenido energético, pero hay que comprimirlos para distribuirlos. Las emisiones causadas por la combustión de CNG y LPG producen 50% menos de CO y COV que las gasolinas, con poca reactividad de los COV y sin benceno. Sus dificultades están en cómo recargar los estanques y cómo manejar esas sustancias a alta presión. Otro problema que se ha detectado es que si bien el uso de CNG en vehículos diésel livianos implica menores emisiones de NOx y COV con respecto al uso de gasolinas reformuladas, el deterioro de los vehículos propulsados con CNG es mayor, por lo que los beneficios se reducen en el tiempo (Deaton y Winebrake, 2002).

La combustión de alcohol produce menos CO y menos COV reactivos, excepto las emisiones de formaldehído que son elevadas. Otros problemas con los alcoholes es su dificultad de almacenamiento (destruyen materiales sintéticos como gomas) y la autonomía de los vehículos es baja. La dificultad común es la red de distribución, ya que es necesario proveer a los usuarios de la infraestructura adecuada para acceder a estos combustibles.

La promoción del uso de energías renovables como los biocombustibles ha sido motivada recientemente por la creciente evidencia de los impactos que el cambio climático está causando en la biósfera (IPCC, 2009); en el pasado, como en la década de 1970, la motivación se debió al alza de los precios del petróleo; por ejemplo, la US Energy Policy Act del 2005 exige que se generen 28,4 billones de galones de biocombustibles por año a partir del 2012 (DOE, 2005). En el 2007, en EE.UU. se estableció como objetivo reducir el consumo de gasolina en 20% en los siguientes 10 años. El 15% de esa reducción provendría de la mayor oferta de combustibles alternativos, y el restante 5% de construir motores con mayor eficiencia energética. Ese 15% de reducción de consumo de gasolina para el 2017 requiere una rápida expansión de la oferta anual de combustibles renovables, desde alrededor de 5 billones de galones de etanol de maíz a aproximadamente 35 billones de galones de combustibles alternativos de una variedad de materiales, tales como pasto, residuos de aserraderos y desechos agrícolas.

En el Reino Unido, el UK Carbon Trust invertirá en generación de biomasa a partir de algas, con el objetivo de reducir en 80% las emisiones de CO₂ para el año 2050 (Gas 2.0, 2009). En Brasil, se ha lanzado el Plan Nacional de Agroenergía, con el objeto de promover la generación de biocombustibles por parte de los agricultores, fundamentalmente a partir del etanol de caña de azúcar (S. Farm Press, 2009). En Canadá, entre 2007 y 2013, se invertirán 2.000 millones de dólares para apoyar la producción de combustibles renovables (Marketwire, 2007). En el caso de países en desarrollo en Asia y África, se han efectuado estudios de posibles cultivos adecuados para la realidad climática de esas zonas, y se han difundido los resultados a los posibles inversores (Icrisat, 2009).

Para todos los países en desarrollo, la Unctad ha propuesto una iniciativa de biocombustibles que tiene como agenda principal trabajar en estrecho contacto con el sector privado para desarrollar el negocio de biocombustibles de modo sustentable y promover la producción y consumo local y el comercio en biocombustibles (Unctad, 2009).

En resumen, los biocombustibles han pasado a formar parte de la agenda energética de todos los países del mundo, ricos y pobres, dependientes o independientes del petróleo, con sectores agrícolas fuertes o débiles, etcétera. Sin embargo, existe la preocupación del impacto que estas políticas puedan tener sobre mayores precios de los alimentos y su efecto sobre la pobreza a escala mundial.

9.5.4 Nuevas tecnologías de propulsión

Entre las tecnologías con diverso grado de maduración podemos citar vehículos a hidrógeno, eléctricos, a energía solar y vehículos híbridos.

La propulsión por hidrógeno tiene el atractivo de emisiones cero y el más alto contenido energético por unidad de masa de combustible. No obstante, subsisten muchos obstáculos tecnológicos para operar esta tecnología de manera segura. Los automóviles a energía solar están todavía en etapa experimental, mientras que los vehículos eléctricos ya son realidad. Se han desarrollado automóviles ligeros propulsados por baterías, que operan con cero emisiones y bajo nivel de ruido. Todavía hay limitaciones como el costo del vehículo, la duración de la recarga de las baterías, la disponibilidad de una red de puntos de recarga de amplia cobertura y la baja autonomía. Los impactos en calidad del aire (emisiones) se trasladan de la red vial al sector de generación eléctrica.

Un desarrollo más reciente y más costo-efectivo que el automóvil eléctrico es el vehículo híbrido, una combinación de motor a gasolina y eléctrico. La ventaja es que reducen prácticamente a cero las emisiones en detención y alta congestión, donde opera el motor eléctrico, mientras que el motor a gasolina solo entra en operación si hay requerimientos de mayor potencia. Al frenar, se captura esa energía para recarga de baterías. Estos vehículos están siendo comercializados en todo el mundo.

9.6 Referencias

- 1) AIE. Estadísticas sobre energía de la Agencia Internacional de la Energía (AIE). París: AIE, 2012: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/kwes.pdf>
- 2) Barbier, E. B. "Introduction to the environmental Kuznets curve, special issue". *Environ Dev Econ* 2, 4 (1997), 369–381.
- 3) BBC News, 6 Diciembre 2012. <http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-20563591>
- 4) Bechle, M.J., D.B. Millet y J.D. Marshall. "Effects of Income and Urban Form on Urban NO₂: Global Evidence from Satellites". *Environ Sci Technol* 45 (2011), 4914-4919.
- 5) Bishop, G.A., J.R. Starkey, A. Ihlenfeldt, W.J. Williams y D.H. Stedman. "IR long-path photometry: a remote sensing tool for automotive emissions". *Analytical Chemistry* 61, 10 (1989), 671-677.

- 6) Bishop, G.A., J.A. Morris, D.H. Stedman, L. H. Cohen, R.J. Countess, S. J. Countess, P. Maly y S. Scherer. "The effects of altitude on Heavy-Duty Diesel Truck on-road emissions". *Environ Sci Technol* 35 (2001), 1574-1578.
- 7) Brodrick, C., H.A. Dwyer, M. Farshchi, D.B. Harris y F.G. King Jr. "Effects of Engine Speed and Accessory Load on Idling Emissions from Heavy-Duty Diesel Truck Engines". *J Air & Waste Manage Assoc* 52 (2002), 1026-1031.
- 8) Cadle, S.H., R.A. Gorse, B.K. Bailey y D.R. Lawson. "Realworld vehicle emissions: a summary of the Eleventh Coordinating Research Council On-Road Vehicle Emissions Workshop". *J Air Waste Manage Assoc* 52, 2 (2002), 220-236.
- 9) Clark, L.P., D.B. Millet y J.D. Marshall. "Air Quality and Urban Form in U.S. Urban Areas: Evidence from Regulatory Monitors". *Environ Sci Technol* 45 (2011), 7028-7035.
- 10) CNUCYD. Review of Maritime Transport 2006. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo. Nueva York y Ginebra, 2006: http://www.unctad.org/en/docs/rmt2006_en.pdf.
- 11) Deaton, M.L. y J.J. Winebrake. "Comparing Lifetime Emissions of Natural Gas and Conventional Fuel Vehicles: An Application of the Generalized ANCOVA Model". *J Air & Waste Manage Assoc* 50 (2002), 162-168.
- 12) DOE 2005; ver más detalles en: <http://genomicsgtl.energy.gov/biofuels/>
- 13) Envirofit. Video sobre mejora de combustión en motores de dos tiempos en Manila, Filipinas, 2012. Disponible en: www.envirofit.org
- 14) Faiz, A. y S. Gautam, S. "Technical and policy options for reducing emissions from 2-stroke engine vehicles in Asia". *International Journal of Vehicle Design* 34, N° 1 (2004), 1-11.
- 15) Franco, V., M. Kousoulidou, M. Muntean, L. Ntziachristos, S. Hausberger y P. Dilara. "Road vehicle emission factors development: A review". *Atmospheric Environment* 70 (May 2013), 84-97.
- 16) Gas 2.0, 2009: <http://gas2.org/2008/10/23/uk-starts-worlds-largest-algae-biofuel-initiative/>
- 17) Guo, H., Q. Zhang, Y. Shi, D. Wang. "On-road remote sensing measurements and fuel-based motor vehicle emission inventory in Hangzhou, China". *Atmospheric Environment* 41 (2007), 3095-3107.
- 18) Gwilliam, K., M. Kojima y T. Johnson, T. Reducing air pollution from urban transport. Washington: Banco Mundial, 2004.

- 19) IATA. Fuel Efficiency. Asociación de Transporte Aéreo Internacional, Montreal y Ginebra, 2007: http://www.iata.org/whatwedo/environment/fuel_efficiency.htm
- 20) Icrisat (2009): <http://www.icrisat.org/Investors/Biofuel.pdf>
- 21) IPCC (2009): <http://www.ipcc.ch/languages/spanish.htm>
- 22) Jiménez, J.L., J.B. McManus, J.H. Shorter, D.D. Nelson, M.S. Zahniser, M. Koplow, G.J. McRae y C.E. Kolb. "Cross road and mobile tunable infrared laser measurements of nitrous oxide emissions from motor vehicles". *Chemosphere - Global Change Science* 2 (2000), 397-412.
- 23) Kirchstetter, T. W., B.C. Singer, R.A. Harley, G.R. Kendall y M. Traverse. "Impact of California reformulated gasoline on motor vehicle emissions. 1. Mass emissions rates". *Environ Sci Technol* 33 (1999), 318-328.
- 24) Kittelson, D., J. Johnson, W. Watts, Q. Wei, M. Drayton, D. Paulsen y N. Bukowiecki. "Diesel Aerosol Sampling in the Atmosphere". *Society of Automotive Engineers*. Paper number SAE 2000-01-2212, 2000.
- 25) Ko, Y.W. y Ch. Cho. "Characterization of large fleets of vehicle exhaust emissions in middle Taiwan by remote sensing". *Science of the Total Environment* 354 (2006), 75-82.
- 26) Kolb, C. E., S.C. Herndon, J.B. McManus, J.H. Shorter, M.S. Zahniser, D.D. Nelson, J.T. Jayne, M.R. Canagaratna y D.R. Worsnop. "Mobile laboratory with rapid response instruments for real-time measurements of urban and regional trace gas and particulate distributions and emission source characteristics". *Environ Sci Technol* 38 (2004), 5694-5703.
- 27) Kuhns, H.D. y otros. "Remote sensing of PM, NO, CO and HC emission factors for on-road gasoline and diesel engine vehicles in Las Vegas, NV". *Science of the Total Environment*, 322 (2004), 123-137.
- 28) Marketwire, 2007: <http://www.marketwire.com/press-release/Agriculture-And-Agri-Food-Canada-643394.html>
- 29) Molina, M.J. y L.T. Molina. "Megacities and atmospheric pollution". *J Air Waste Manage. Assoc* 54, 6 (2004), 644-680.
- 30) Molina, L.T., M.J. Molina, R.S. Slott, C.E. Kolb, P.K. Gbor, F. Meng, R.B. Singh, O. Galvez, J.J. Sloan, W.P. Anderson, X.Y. Tang, M. Hu, S. Xie, M. Shao, T. Zhu, Y.H. Zhang, B.R. Gurjar, P.E. Artaxo, P. Oyola, E. Gramsch, D. Hidalgo, D. y A.W. Gertler. "Air quality in selected megacities, critical review complete online version": <http://www.awma.org>, 2004.
- 31) Nanzetta, K., D. Niemeier y J.M. Utts. "Changing Speed-VMT Distributions: The Effects on Emissions Inventories and Conformity". *J Air & Waste Manage Assoc* 50 (2000), 459-467.

- 32) NARSTO (North American Research Strategy for Tropospheric Ozone): Improving emissions inventories for effective air quality management across North America, a NARSTO assessment, NARSTO-05-001, 2005.
- 33) Newman, P. y J. Kenworthy. "Urban Design to Reduce Automobile Dependence". *Opolis: An International Journal of Suburban and Metropolitan Studies* 2, N° 1, Artículo 3: <http://repositories.cdlib.org/cssd/opolis/vol2/iss1/art3>
- 34) Parrish, D.D. "Critical evaluation of US on-road vehicle emission inventories". *Atmospheric Environment* 40 (2006), 2288-2300.
- 35) PNUMA. "Partnership for clean fuels and vehicles". Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Nairobi, Kenia, (2007b): <http://www.unep.org/pcfv>.
- 36) Popp, P.J., G.A. Bishop y D.H. Stedman. "Development of a high-speed ultraviolet spectrometer for remote sensing of Mobile source nitric oxide emissions". *J Air Waste Manage Assoc* 49 (1999), 1463-1468.
- 37) Portal de Datos GEO. Base de datos fundamental en línea de PNUMA, con estadísticas y mapas nacionales, subregionales, regionales y globales, que incluye los datos e indicadores ambientales y socioeconómicos. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Ginebra: <http://www.unep.org/geo/data>.
- 38) Rogak, S.N., U. Pott, T. Dann y D. Wang "Gaseous Emissions from Vehicles in a Traffic Tunnel in Vancouver, British Columbia". *J Air & Waste Manage Assoc* 48 (1998), 604-615.
- 39) Schifter, I., L. Díaz, V. Mugica y E. López-Salinas. "Fuel-based motor vehicle emission inventory for the metropolitan area of Mexico City". *Atmos Environ* 39 (2005), 931-940.
- 40) Singer, B. C. y R.A. Harley. "A fuel-based inventory of motor Vehicle exhaust emissions in the Los Angeles area during summer 1997". *Atmos Environ* 34 (2000), 1783-1795.
- 41) Singer, B.C., T.W. Kirchstetter, R.A. Harley, G.R. Kendall y J.M. Hesson. "A Fuel-Based Approach to Estimating Motor Vehicle Cold-Start Emissions". *J Air & Waste Manage Assoc* 49 (1999), 125-135.
- 42) Sjodin, A. y K. Andreasson. "Multi-year remote-sensing measurements of gasoline light-duty vehicle emissions on a freeway ramp". *Atmospheric Environment*, 34 (2000), 4657-4665.
- 43) Southwest Farm Press, 2009: <http://southwestfarmpress.com/news/051214-Brazil-biofuels-initiatives/>

- 44) Stedman, D. H., G.A. Bishop, P. Aldrete y R.S. Slott. "On-road evaluation of an automobile emission test program". *Environ Sci Technol* 31 (1997), 927-931.
- 45) UNCTAD (2009): <http://www.unctad.org/Templates/Page.asp?intItemID=4344&lang=1>
- 46) UNSD Transport Statistical Database (2007a).
- 47) UNSD International Civil Aviation Yearbook: Civil Aviation Statistics of the World (2007b).
- 48) WBCSD. Mobility 2030: Meeting the Challenges to Sustainability. Consejo Empresarial Mundial de Desarrollo Sostenible, Ginebra (2005).
- 49) Wenzel, T., B.C. Singer y R.S. Slott. "Some issues in the statistical analysis of vehicle emissions". *Journal of Transportation and Statistics* (September 2000), issue 1-14.
- 50) Whitfield, J. K. y D.B. Harris "Comparison of heavy-duty diesel emissions from engine and chassis dynamometers and on-road testing". 8th CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop, San Diego, CA, Coordinating Research Council, 1998.
- 51) Wright, L. y K. Fjellstrom. "Sustainable Transport: A Sourcebook for Policymakers in developing countries, Module 3a: Mass Transit Options". German Technical Cooperation (GTZ), 2005: http://eprints.ucl.ac.uk/archive/00000113/01/Mass_Rapid_Transit_guide,_GTZ_Sourcebook,_Final,_Feb_2003,_Printable_version.pdf, Bangkok.
- 52) Zavala, M., S.C. Herndon, R.S. Slott, E.J. Dunlea, L.C. Marr, J.H. Shorter, M. Zahniser, W.B. Knighton, T.M. Rogers, C.E. Kolb, L.T. Molina y M.J. Molina. "Characterization of on-road vehicle emissions in the Mexico City Metropolitan Area using a mobile laboratory in chase and fleet average measurement modes during the MCMA-2003 field campaign". *Atmos Chem Phys* 6 (2006), 5129-5142.

9.7 Problemas propuestos

- 1) Calcule la razón estequiométrica de aire a combustible para: a) metanol (CH_3OH); b) etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$); c) metano (CH_4); d) hidrógeno; y e) diésel, asumiendo que este último se puede representar por $\text{C}_{15}\text{H}_{30}$.
- 2) Se diseña un sistema de inyección de aire y combustible a un motor en condiciones de presión atmosférica igual a 1.013 mbar y con densidad del aire de $1,2 \text{ kg/m}^3$. Si no hay posteriores modificaciones, ¿cuál sería la

razón estequiométrica A/C en Ciudad de México, donde por la elevación sobre el nivel del mar (2.240 m), la densidad del aire es de 1 kg/m^3 ? ¿Se trata de una mezcla rica o pobre?

- 3) Obtenga la base de datos de ensayos de homologación del 3CV del Ministerio de Transportes y úsela para construir un modelo de emisiones de vehículos livianos nuevos, considerando la cilindrada del motor y el año del ensayo. ¿Qué tanta variabilidad presentan las emisiones? ¿Son estas variabilidades similares para todos los contaminantes? ¿Cuál es el porcentaje con respecto a la norma de emisión de referencia? Construya histogramas de emisiones por categoría de normativa aplicable por cada contaminante normado. La planilla con la nómina de ensayos está en: http://www.subtrans.cl/subtrans/doc/Nomina_Vehiculos_Livianos_y_Medanos_Homologados_110909.xls
- 4) Grafique los datos de calidad del aire de Santiago, disponibles en el sistema SINCA: (<http://sinca.mma.gob.cl>), en conjunto con los datos de PBI del INE y explore la relación concentración ambiental versus PIB para Santiago. ¿Se aprecia un comportamiento de curva de Kuznets?
- 5) Las emisiones de NO_x en ciudades están normalmente controladas por el transporte. Además, prácticamente todo el NO_x emitido se convierte a NO₂. Por lo tanto, es posible monitorear la evolución de las emisiones de NO_x en ciudades usando el monitoreo satelital de la columna de NO₂ en la tropósfera. Utilice el servidor Giovanni de la NASA para extraer datos de NO₂ troposférico del instrumento OMI a bordo del satélite AURA. Se recomienda el siguiente procedimiento:
 - i) Conectarse a Giovanni: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/overview/index.html>
 - ii) Seleccionar en el menú Aura OMI Level 2G
 - iii) En el panel superior, ubicar la zona urbana donde se extraerán los datos, actualizando la figura para verificar que se está cubriendo la zona buscada. Ejemplo: para Santiago los límites serían -33,37° / -33,6° S y -70,53° / -70,75° W
 - iv) En el panel de selección de variables, marcar: NO2 Tropospheric Column Amount (Clear, 0-30% Cloud)
 - v) Más abajo en el panel, escoger fecha de inicio y de término de la extracción de datos
 - vi) En el menú Select Visualization, escoger la opción Time Series Area Statistics

- vii) Ahora marcar el botón *Generate Visualization*, esperar que se haga el proceso de datos. Al finalizar ese proceso, aparece el gráfico con el promedio del NO_2 sobre Santiago como función del tiempo, el cual puede ser descargado desde la página web.
- viii) En la pestaña superior, escoger *Download Data* para bajar los resultados como archivos de texto. Los resultados incluyen el promedio diario de la columna de NO_2 , así como su desviación estándar, calculados para todos los pixeles que quedan en la zona urbana definida en iii).
- ix) Los datos se pueden agregar a nivel mensual; por ejemplo, para graficarlos como serie cronológica de datos.

Aplique este procedimiento a los datos de Santiago, Gran Valparaíso, Gran Concepción y también a las ciudades que han crecido más rápido en los últimos años, como Antofagasta y Temuco. Estime la tendencia de las emisiones en el tiempo. ¿Cómo podría usted desagregar el efecto del transporte del resto de las fuentes que emiten NO_x ? ¿Es posible encontrar tendencias significativas de las emisiones del transporte en ciudades de Chile?

- 6) Aplique el procedimiento de Parrish (2006) para evaluar la tendencia de las emisiones de CO y NO_x del transporte en Santiago y otras ciudades de Chile. Para datos de concentraciones ambientales, use el sistema SINCA: <http://sinca.mma.gob.cl>
- 7) Considere los datos del inventario de emisiones para Santiago, 2005, el cual se resume en las siguientes tablas de emisiones y de los factores de emisión (en g/km) de los contaminantes en función de la velocidad media de circulación por la red vial (en km/h), para las distintas categorías de vehículos y contaminantes.
 - a) Encuentre cuáles serían las velocidades medias de desplazamiento de los vehículos en Santiago, en base a las estimaciones de emisiones de la **Tabla 9.3** y de los factores de emisión de tubo de escape de las tablas que aparecen en la Guía Metodológica para Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles: <http://retc.conama.cl/archivo/GUIA%20CONAMA.pdf>
 - b) En sus cálculos se debe considerar que hay un efecto de deterioro del parque que significa que las emisiones de algunos tipos de vehículos se incrementan con respecto a los factores de emisión ya citados, de acuerdo a las siguientes proporciones (válidas solamente para la flota de vehículos de Santiago año 2005):

TABLA 9.2
Factores de deterioro⁶⁴ de algunos tipos de vehículos

Descripción	NO _x	CO	COV
Vehículos particulares cat. Tipo 1	1,653	1,890	1,890
Vehículos de alquiler cat. Tipo 1	2,241	2,684	2,684
Vehículos comerciales cat. Tipo 1	1,797	2,086	2,086
Vehículos escolares cat. Tipo 1	1,904	2,226	2,226
Taxis colectivos cat. Tipo 1	1,929	2,258	2,258

- c) ¿Son sus resultados consistentes o no? Explique. En el caso particular del CO, hay que considerar el incremento de emisiones por partidas en frío, que se pueden obtener en el Estudio: “Actualización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana”, Informe Final, DICTUC S.A., Santiago, enero de 2006, Ministerio del Medio Ambiente, Región Metropolitana.
- d) Verifique las estimaciones de las emisiones de CO₂.
- e) ¿Cómo se podrían estimar los factores de deterioro de las emisiones de los vehículos?
- f) Ídem a lo anterior, pero para la situación de las carreteras, cuyas emisiones aparecen en la **Tabla 9.4**.

⁶⁴ Corresponden al incremento en las emisiones calculadas con factores de emisión debido a la edad del vehículo.

TABLA 9.3
Emisiones de fuentes móviles en ruta, Santiago, año 2005

Categoría de fuente	MP _{2,5} t/año	CO t/año	NOx t/año	COV t/año	CO ₂ t/año	KM Rec
Veh. particulares cat. Tipo 1	0	19.653	2214	2.547,40	1.793.258	8.028.735.004
Veh. particulares no catalíticos	0	85.952	6826	6.614,10	485.002	1.916.434.083
Veh. de alquiler cat. Tipo 1	0	3.075	395	354,4	269.853	1.205.601.927
Veh. de alquiler no catalíticos	0	1.394	140	171,1	9.467	37.324.743
Veh. de alquiler a gas	0	99	10	7,8	5.024	30.955.333
Veh. comerciales cat. Tipo 1	0	28.380	977	971,6	795.516	2.539.274.455
Veh. comerciales no catalíticos	0	33.918	3285	4.292,20	192.922	616.826.157
Veh. comerciales diésel Tipo 1	197,6	832	710	112,1	158.386	679.850.583
Veh. comerciales a gas	0	311	8	10,4	4.589	21.956.897
Buses particulares	16,1	103	496	42,3	34.389	56.518.679
Veh. escolares cat. Tipo 1	0	200	7	6,8	5.605	17.890.805
Veh. escolares no catalíticos	0	514	50	65	2.925	9.352.012
Vehículos escolares a diésel	36,2	152	130	20,5	28.987	124.422.415
Cam. livianos diésel convencional	36,6	392	481	220,4	48.763	145.725.683
Cam. livianos diésel Tipo 1	34,7	285	487	240,7	71.118	212.181.130
Cam. livianos diésel Tipo 2	21	225	571	155	69.953	209.119.190
Cam. medianos diésel convencional	118	586	1273	330,6	124.561	216.745.156
Cam. medianos diésel Tipo 1	69,1	264	805	223,6	112.618	195.401.730
Cam. medianos diésel Tipo 2	39	194	528	191,2	103.283	179.024.641
Motos 2 tiempos convencional	0	1.416	4	552,9	5.931	60.206.831
Motos 4 tiempos convencional	0	2.555	21	153,6	13.991	110.544.249
Taxis colectivos catalíticos Tipo 1	0	2.402	311	239,3	209.949	822.186.743
Taxis colectivos no catalíticos	0	906	100	89,5	8.430	29.185.690
Taxis colectivos a gas	0	182	27	21,6	11.682	72.132.987
Cam. pesados diésel convencional	173,3	704	3307	382,5	254.895	271.044.585
Cam. pesados diésel Tipo 1	79,6	274	1285	135,2	180.699	191.582.918
Cam. pesados diésel Tipo 2	21,8	160	667	86,8	128.723	136.630.921
Buses licitados urbanos diésel Tipo 3	19,3	158	611	84	133.384	104.791.921
Buses licitados urbanos diésel Tipo 1	102,7	660	2861	301,1	189.970	245.364.893
Buses licitados urbanos diésel Tipo 2	74,1	619	2395	329,5	366.126	287.651.590
Buses interurbanos diésel convencional	2,2	11	46	6,1	3.191	5.491.249
Buses Interurbanos diésel Tipo 1	2,8	13	46	7,3	5.227	6.293.678
Buses Interurbanos diésel Tipo 2	1,1	11	34	6,4	5.307	6.551.174
Buses Interurbanos diésel Tipo 3	0	0	0	0,1	92	101.801
Buses rurales diésel convencional	0,3	1	5	0,3	230	520.290
Buses rurales diésel Tipo 1	4,6	29	110	17,1	7.158	9.249.595
Buses rurales diésel Tipo 2	3,8	30	105	20,9	15.677	12.429.144
Buses rurales diésel Tipo 3	3	24	81	17,2	17.271	13.469.723
TOTALES	1.057	186.686	31.408	19.029	5.874.152	18.828.770.600

TABLA 9.4
Emisiones de fuentes móviles en carreteras, Santiago, año 2005

Categoría de fuente	MP _{2,5} t/año	CO t/año	NO _x t/año	COV t/año	CO ₂ t/año	km rec
Veh. particulares cat. Tipo 1	0,0	1.602	517	198	195.927	1.394.325.504
Veh. particulares no catalíticos	0,0	17.983	707	328	53.299	332.765.708
Veh. comerciales cat. Tipo 1	0,0	3.799	429	78	135.145	457.808.888
Veh. comerciales no catalíticos	0,0	1.876	417	72	32.781	111.234.228
Veh. comerciales diésel Tipo 1	15,2	87	64	13	32.607	122.544.131
Veh. comerciales a gas	0,0	61	1	1	879	3.959.677
Cam. livianos diésel convencional	6,0	65	178	30	18.406	42.575.353
Cam. livianos diésel Tipo 1	5,7	47	181	33	26.805	61.998.133
Cam. livianos diésel Tipo 2	3,4	37	287	21	26.418	61.100.507
Cam. medianos diésel convencional	18,0	93	265	43	38.355	60.741.717
Cam. medianos diésel Tipo 1	10,6	42	168	29	34.581	54.762.039
Cam. medianos diésel Tipo 2	6,0	31	110	25	31.683	50.170.237
Buses interurbanos diésel convencional	12,4	61	375	34	27.702	45.614.555
Buses interurbanos diésel Tipo 1	4,6	19	119	10	15.933	26.232.060
Buses interurbanos diésel Tipo 2	5,1	46	249	25	45.941	75.636.431
Buses interurbanos diésel Tipo 3	1,3	12	63	6	16.627	27.373.290
Buses rurales diésel convencional	13,3	71	306	14	13.848	37.322.625
Buses rurales diésel Tipo 1	4,7	30	180	9	13.522	31.444.793
Buses rurales diésel Tipo 2	6,0	49	265	17	45.695	64.639.305
Buses rurales diésel Tipo 3	0,6	5	27	2	6.609	9.348.444
Cam. pesados diésel convencional	17,5	72	369	33	43.209	47.229.213
Cam. pesados diésel Tipo 1	8,1	28	144	12	30.599	33.444.083
Cam. pesados diésel Tipo 2	2,2	16	75	8	21.873	23.906.380
TOTALES	141	26.131	5.495	1.039	908.443	3.176.177.299