

Néstor Y. Rojas*

RESUMEN Este artículo presenta una revisión de estudios comparativos entre las emisiones de material particulado por la combustión de diesel de petróleo, biodiesel y mezclas de los dos combustibles, basados no sólo en la concentración másica de las partículas emitidas, sino también en la distribución de su tamaño, concentración y composición química. Finalmente, se presenta la necesidad del país de realizar una caracterización completa de las emisiones de material particulado por la combustión de diesel, biodiesel de aceite de palma y mezclas de los dos, dadas las características particulares de estos combustibles en Colombia. La revisión fue presentada en el I Seminario Internacional de Biocombustibles, Universidad Nacional de Colombia, agosto 4 al 6 de 2004.

ABSTRACT This paper shows a review of studies comparing particulate emissions from diesel engines running on diesel, biodiesel and their blends, based not only on particle mass concentrations, but also on particle number concentrations and particulate chemical composition. Finally, it summarizes the need for thoroughly characterizing particulate matter emissions in studies comparing Colombian diesel and biodiesel from palm oil (or other oil-producing Colombian species).

Recibido el 27 de septiembre, aprobado el 4 de octubre de 2004

Palabras clave: biodiesel, distribución de tamaño de partículas, material particulado, partículas ultrafinas.

***Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes**
nrojas@uniandes.edu.co

1. PARTÍCULAS Y SUS EFECTOS SOBRE LA SALUD

Las enfermedades respiratorias representan una de las más altas causas de morbilidad y mortalidad de la población susceptible (niños especialmente) en centros urbanos. A su vez, existen evidencias científicas, aceptadas internacionalmente, según las cuales estas enfermedades están estrechamente ligadas a la contaminación atmosférica, y en especial a aquella causada por material particulado suspendido en el aire ambiente. En Colombia, el estudio por Solarte et al., 1999 [22] determinó una asociación significativa entre el incremento en la concentración másica de material particulado del aire ambiente con el aumento en el número de consultas por enfermedad de vía aérea superior en menores de 14 años, basado en datos de los hospitales de los barrios Venecia, Bosa y Trinidad Galán, mas no en Engativá. El estudio predice, a partir de sus resultados, que una disminución de PM10 (concentración másica de partículas menores a 10 micras en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ produciría una disminución de 17% en el número de consultas por síntomas de enfermedades respiratorias.

Evidencias similares alrededor del mundo han mostrado que las tasas de mortalidad tienen una alta correlación con PM10: un incremento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM10 causa un incremento del 1% en el número de muertes por todas las causas en Estados Unidos y Europa. De acuerdo con el Health Effects Institute, 1995 [11] y las investigaciones de Lippmann et al.,

1998 [15], las partículas de tamaños menores que $2.5\mu\text{m}$ conllevan un mayor riesgo para la salud que aquellas más grandes, lo cual sugiere que PM2.5 (concentración másica de partículas menores que 2.5 micras, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) es un mejor indicador de la calidad del aire respecto a material particulado que PM10. Por esta razón, los legisladores en algunos estados de Estados Unidos ya han incluido un límite para PM2.5 por parte de las fuentes móviles, es decir, automóviles y camiones, a partir de 1999. La decisión ha sido cuestionada por haberse basado en evidencia insuficiente (Green et al, 2002 [9], Harrison et al. 2000 [10]) y aún no es posible excluir a la fracción gruesa del PM10 de los efectos sobre la salud (Englert, 2004 [7]). A pesar de las críticas, la consideración de un límite para PM2.5 se presenta dentro de las directrices de la Organización Mundial de la Salud para la calidad del aire (WHO, 2000 [25]).

Al mismo tiempo que los estudios epidemiológicos han encontrado asociaciones entre PM10 o PM2.5 con la mortalidad y morbilidad de la población, estudios toxicológicos han intentado explicar cuáles son los mecanismos de acción de las partículas sobre las células alveolares, su exacerbación del asma, su carcinogenicidad y mutagenicidad, entre otros efectos. Los resultados no han sido concluyentes. Se han postulado los siguientes factores como los más relevantes:

a) Composición química: el material particulado, particularmente en la atmósfera urbana, presenta

compuestos químicos de comprobada toxicidad, carcinogenicidad o mutagenicidad, dentro de los que se cuentan sulfatos, nitratos, amonio, cloro, plomo, mercurio, ácidos nítrico y sulfúrico, benceno, tolueno y compuestos aromáticos policíclicos (PAH, por sus siglas en inglés). Sin embargo, los niveles de exposición al material particulado se encuentran por debajo de los límites definidos como tóxicos para cada una de estas sustancias en su estado puro, por lo cual no se ha comprobado que la toxicidad de las partículas se debe a estas sustancias. Además, la respuesta epidemiológica a PM10 se mantiene para lugares con composiciones diferentes del material particulado, lo cual podría sugerir que la composición química no es la característica definitiva en el efecto del material particulado sobre la salud.

b) Tamaño de partículas: además de la evidencia epidemiológica de una asociación levemente mayor entre PM2.5 y efectos sobre la salud que aquella entre PM10 y los mismos efectos, se ha encontrado que las partículas ultrafinas, es decir, aquellas de tamaño menor que $0.1\mu\text{m}$ (100nm , ver Figura 1), presentan una toxicidad notablemente mayor por unidad de masa que las partículas más gruesas. Además, su toxicidad aumenta en tanto que su tamaño se reduce, probablemente debido a su interacción con las membranas celulares y su alta área superficial (Donaldson et al, 1998 [5]).

c) Concentración en número de partículas: Para una misma masa de partículas, habrá un número mucho mayor si éstas son ultrafinas. Estudios de toxicidad

han encontrado que una masa dada de partículas de una sustancia como TiO_2 no presenta efectos tóxicos cuando está presente como partículas de $0.5\mu\text{m}$, pero sí cuando las partículas son inferiores a $0.05\mu\text{m}$, es decir, ultrafinas. Un alto número de partículas ultrafinas causa o incrementa su efecto tóxico. El tamaño de las partículas y su concentración en número de partículas por volumen de aerosol, explican así los efectos de inflamación e irritación alveolar causados por el material particulado (Seaton, 1995 [20]; Oberdörster, 1994 [8]).

2. EMISIÓN DE LAS PARTÍCULAS POR FUENTES MÓVILES

2.1. Formación de las partículas

Los vehículos automotores son la principal fuente de material particulado emitido a la atmósfera. Su contribución se ubica entre un 25% y un 75% del total de emisiones antropogénicas de PM10 (QUARG, 1993 [16]), este último en centros urbanos. El principal contribuyente de las emisiones de material particulado es el parque automotor a diesel.

En los motores a diesel, las partículas son formadas debido a la formación de zonas de baja temperatura o de baja disponibilidad de oxígeno en el frente de llama durante la combustión. La calidad de la combustión depende, principalmente, de las características de la inyección del combustible, de las características de mezclado entre el combustible y el aire, y de la presencia de combustible y aceite lubricante

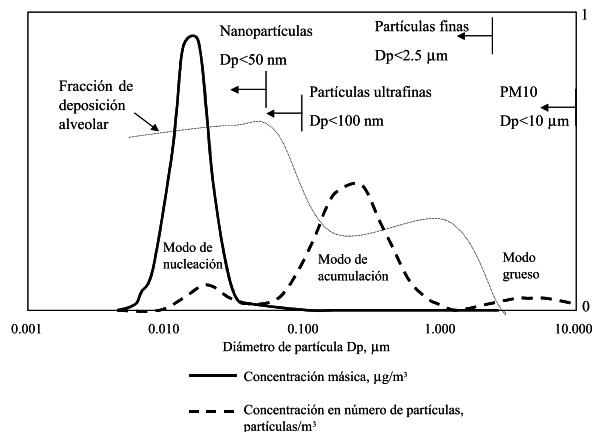


figura 1 Distribución de tamaño de partículas (basado en Kittelson, 1997)

en las paredes de la cámara de combustión y en los asientos de las válvulas de aire. En estas zonas, reacciones de pirólisis forman hidrocarburos policíclicos aromáticos, los cuales promueven la formación de estructuras de fulerenos que, al aglomerarse, forman partículas esféricas de entre 10 y 70 nm de diámetro. Estas partículas, a su vez, se aglomeran entre sí para formar partículas alargadas y ramificadas (ver Figura 2). Sobre estas partículas, compuestos semivolátiles tales como compuestos orgánicos solubles, sulfatos y nitratos asociados con agua, se condensan al enfriarse los gases de combustión. Incluso nuevas nanopartículas, del orden de 10nm, forman nuevos núcleos líquidos de ácido sulfúrico y sulfatos, sobre los cuales se condensan los compuestos semivolátiles durante el enfriamiento.

2.2. Combustibles y tecnologías para la reducción de la emisión de material particulado

Cada vehículo a diesel emite alrededor de 45 a 80 veces la masa de partículas que emite un vehículo a gasolina con la misma potencia, dependiendo de sus condiciones de operación (Kittelson et al., 1998 [13]). En términos de concentración en número de partículas, un vehículo a diesel emite entre 3 y varios miles de veces el número de partículas emitido por un vehículo a gasolina, también dependiendo de sus condiciones de operación. En condiciones de marcha urbana y con el motor sin aceleración ni carga (*idle*), los motores diesel emiten más de tres órdenes de magnitud por encima de la concentración de partículas emitidas por motores a gasolina.

En condiciones de autopista, esto es, a 120 km/h y carga alta, los vehículos a gasolina emiten 1×10^{14} partículas/km, la mitad de los motores diesel, aprox. 2×10^{14} partículas/km, prácticamente todas ultrafinas (Hall et al., 1998 [17, 18]).

Hoy en día, la respuesta de la tecnología a los límites de emisión para vehículos a diesel ha logrado reducir los factores de emisión en más de un 80% con respecto a los niveles de 1990. Los principales cambios introducidos han sido el mejoramiento de la inyección de combustible hacia mayores presiones, el rediseño de la cámara de combustión para mayor turbulencia, el turbocargador con enfriamiento para el aire, tiempos de inyección flexibles, la introducción de dos válvulas, entre otros. Un vehículo a diesel puede incluso emitir menores concentraciones en número de partículas que un vehículo similar a gasolina o a GLP, cuando está equipado con una trampa o filtro de partículas (Andersson, 2001 [26]; ver Figuras 3a, 3b y 3c).

Con respecto a la composición del combustible, los principales promotores de la formación de partículas en combustión de diesel son: i) el contenido de azufre; ii) el contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos; iii) el contenido de hidrocarburos aromáticos (Westerholm et al, 1994 [24]). Numerosos estudios han mostrado los beneficios de reducir los niveles de azufre: hay una menor producción de partículas ultrafinas, así como una menor concentración en número y en masa de partículas con la utilización de combustible diesel con menos de

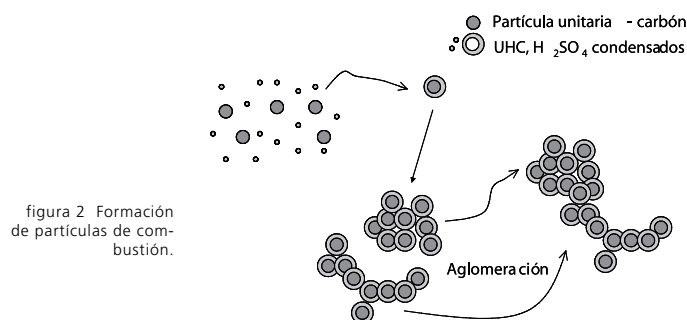


figura 2. Formación de partículas de combustión.

50ppm de azufre. Además, niveles bajos de azufre posibilitan la utilización de trampas de partículas, llevando las emisiones de partículas a la atmósfera por motores diesel a niveles inferiores a los de los motores a gasolina.

3. EMISIONES DE PARTÍCULAS USANDO BIODIESEL

Dada la relación encontrada entre las emisiones de material particulado y altos niveles de aromáticos y azufre en el combustible, se ha dado cabida a los estudios sobre combustibles alternativos al diesel que reduzcan su efecto sobre la salud de la población humana. Una de las alternativas es el biodiesel (Baldassarri et al, 2003 [2]), sea éste usado como único combustible o mezclado con el diesel de petróleo.

Varios estudios, entre ellos los de Wang et al (Wang, 2000 [23]), han mostrado reducciones del 25% en las emisiones de PM₁₀ en motores no modificados al usar mezclas de 35% de biodiesel de soja (0.002% S, 0% aromáticos, 11% O₂) con diesel de petróleo, con respecto al diesel de petróleo (0.04% S, 30% aromáticos, 0.006% O₂). Los estudios sugieren que la reducción en la emisión de material

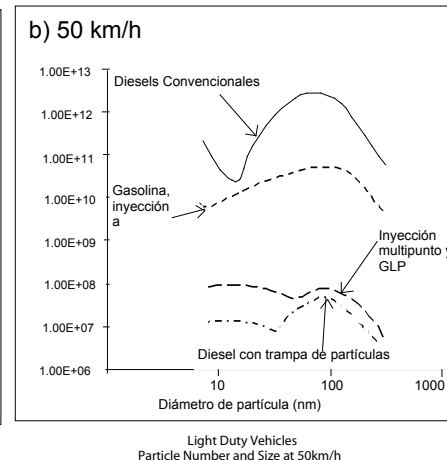
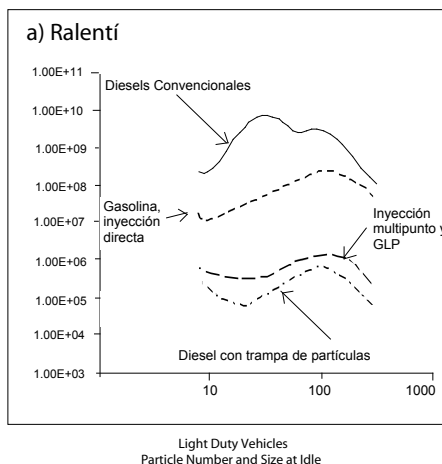
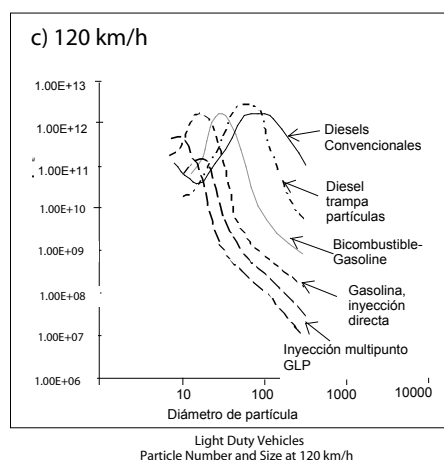
particulado se debe al contenido de oxígeno de la mezcla de biodiesel, el cual sustituye al oxígeno del aire en las regiones de mezcla ineficiente del combustible con el aire. El contenido del material orgánico soluble de las partículas, sin embargo, aumenta, debido al biodiesel no quemado. Las demás emisiones no mostraron diferencias significativas al usar biodiesel, aunque en un balance de ciclo de vida, las emisiones de CO₂ son reducidas al usar biodiesel en un 20 a 30%, lo cual hace del biodiesel un combustible atractivo en la reducción del efecto invernadero.

Por otro lado, en el estudio de Durbin et al. (Durbin, 2000 [6]), comparando emisiones de biodiesel (40ppm S), mezclas de 20% biodiesel con diesel de petróleo de California (280ppm S), diesel de petróleo de California (330 ppm S, 10% aromáticos) y diesel sintético de bajo azufre (<10ppm S, 10% aromáticos), se encontró que, a pesar de que el biodiesel tuvo las menores emisiones de hidrocarburos totales y de CO en la mayoría de los casos, también presentó las mayores emisiones de material particulado total. De manera similar, la mezcla de 20% biodiesel tuvo emisiones similares o mayores que el

Distribución de tamaño de partículas emitidas por diversas tecnologías de motores de vehículos livianos a 50 km/h. (tomado de Andersson, 2001)

Distribución de tamaño de partículas emitidas por diversas tecnologías de motores de vehículos livianos en ralentí. (tomado de Andersson, 2001)

Distribución de tamaño de partículas emitidas por diversas tecnologías de motores de vehículos livianos a 120 km/h. (tomado de Andersson, 2001)



diesel de California y el diesel sintético. Las diferencias fueron sutiles en los motores de tecnología más reciente (95-96, 50-100 mg/milla) frente a los más viejos (88-90, 350 – 800 mg/milla).

De mayor interés con respecto a los efectos sobre la salud y el ambiente, son los estudios que han medido, además de los contaminantes regulados (PM10, hidrocarburos, CO, NOx), parámetros como la distribución de tamaño de partícula, la composición química, la carcinogenicidad y la mutagenicidad del material particulado. De estos estudios, menos numerosos que aquellos que miden solamente los contaminantes regulados, se escogieron dos de los más representativos en esta revisión. Sus hallazgos se describen a continuación.

3.1. Schröder et al, 1999 [19]

El estudio, realizado en el Centro de Investigación Agrícola Federal de Alemania (FAL por sus siglas en alemán), analizó las emisiones producidas en la combustión de combustible diesel de bajo azufre frente a las de biodiesel de colza en un motor de uso agrícola funcionando en el ciclo europeo de 13 modos. Las siguientes propiedades relacionadas con impactos ambientales y a la salud humana fueron determinadas: concentración másica y en número, distribución de tamaño de partícula, potencial mutagénico y potencial de formación de ozono.

Las emisiones de partículas por la combustión del biodiesel de colza presentaron una concentración másica mayor en un 20 a 50% a las emitidas por la

combustión del diesel de bajo azufre en todos los tamaños entre 0 y 11.3 μm , con excepción de la fracción a 0.71 μm . El componente de material soluble también fue mayor en las emisiones del biodiesel. Las emisiones de partículas del biodiesel fueron reducidas en más de un 50% con el uso de un convertidor catalítico.

Las concentraciones en número de partículas fueron mayores en las emisiones del biodiesel que en las de diesel de bajo azufre para prácticamente todos los tamaños inferiores a 200 nm. El uso del catalizador redujo las concentraciones en número de partículas en un orden de magnitud, en promedio, siendo más eficiente en modos de velocidad media y carga media-alta (reducción en 3 órdenes de magnitud), y poco eficiente para las partículas inferiores a 15 nm en los modos de operación a alta velocidad y baja carga del motor.

La mutagenicidad de las emisiones de material particulado del diesel de bajo azufre fue entre 2 y 8 veces la mostrada por las partículas emitidas por el biodiesel de colza. La mutagenicidad estuvo correlacionada con el contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos de las partículas, mayor en las emisiones de diesel de bajo azufre que en las de biodiesel, en la mayoría de las muestras tomadas. Los resultados concuerdan con la tendencia encontrada en anteriores estudios por Bagley et al, 1998 [1] y Bünger et al, 1998 [3].

Por último, el potencial de formación de ozono resultó ser entre 20 y 30% mayor en las emisiones

del biodiesel frente a las de diesel de bajo azufre, debido a la presencia de mayores concentraciones de precursores tales como alquenos (eteno) y aldehídos (formaldehído). Sin embargo, el uso del convertidor catalítico reduce la emisión de estos precursores en un 80%. El aumento en las emisiones de formaldehído y otros aldehídos con el uso de biodiesel también había sido reportado por Howes et al., 1988, trabajando con aceite de soja, y por Krahl et al, 1996 [14], trabajando con biodiesel de colza. En contraste, el estudio de Sharp et al, 2000, mostró reducciones en las emisiones de hidrocarburos carbonílicos trabajando con biodiesel puro y mezclas con biodiesel al 20%.

En conclusión, el estudio muestra la desventaja de mayores emisiones másicas y en número de partículas, así como un mayor potencial de ozono producido por el uso del biodiesel de colza frente al diesel de bajo azufre, características mejoradas con el uso de un convertidor catalítico. Sin embargo, es positiva la reducción de la mutagenicidad por parte del biodiesel de colza. Los autores recomiendan más estudios sobre la distribución de tamaño de partícula y las concentraciones en número de partículas de las emisiones de biodiesel, con el fin de revelar más efectos potenciales sobre la salud y el ambiente.

3.2. Baldassarri et al., 2003 [2]

Este estudio, realizado en el Instituto Superior de Sanidad y el Instituto Motori de Italia, determinó y comparó las emisiones de material particulado por la combustión de diesel de petróleo (300ppm S),

y una mezcla de 20% biodiesel de colza con diesel (240ppm S). Se utilizó un motor diesel de trabajo pesado EURO II, típico de los buses públicos en Italia y con un número elevado de horas de funcionamiento, siguiendo el ciclo europeo de 13 modos, ECE R49, aumentando 25 veces su duración para lograr la recolección suficiente de material particulado.

Los ensayos no mostraron diferencias estadísticamente significativas en las emisiones de contaminantes regulados: hidrocarburos totales, CO, NOx y material particulado total. Estadísticamente, sólo resultó significativo un aumento del 3% en el consumo de combustible al operar con la mezcla con biodiesel de colza 20%.

Las emisiones de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) e hidrocarburos aromáticos policíclicos nitrogenados (nitro-PAHs) asociados al material particulado tampoco mostraron diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, las emisiones de criseno, benzo(*e*)pireno y benzo(*a*)pireno, y por ende PAHs y nitro-PAHs, sí mostraron mayores concentraciones en fase vapor para diesel de petróleo que para la mezcla con biodiesel. Las emisiones de tolueno también fueron mayores en el diesel de petróleo. En contraste, las emisiones de formaldehído fueron más altas para la mezcla con biodiesel que para el diesel de petróleo.

Los resultados de mutagenicidad combinada entre la fase vapor y el material particulado no mostraron una diferencia estadísticamente significativa entre

el diesel de petróleo y la mezcla con biodiesel. La variabilidad experimental fue alta entre réplicas, como en otros estudios, lo cual indica dificultades en la observación de esta propiedad. No es posible, entonces, anticipar una alta reducción de efectos mutagénicos debida al biodiesel.

La distribución de tamaño del material particulado emitido por la mezcla con biodiesel mostró una mayor abundancia de partículas ultrafinas y menor concentración de partículas finas (0.1 a 2.5 μ m) al comparar con el de diesel de petróleo. Las partículas emitidas por ambos combustibles mostraron una composición similar.

3.3. Enseñanzas de los estudios

Con base en los resultados de los estudios descritos anteriormente, se resume:

- a) Que no existen resultados definitivos con respecto a las ventajas en el uso de biodiesel con respecto a las emisiones de material particulado, dada la variabilidad de los resultados entre uno y otro estudio.
- b) Que existe un potencial de mejoramiento de las emisiones de material particulado con el uso de biodiesel, sólo comprobable por medio de estudios con los combustibles y las condiciones locales o nacionales.
- c) Que los efectos sobre el ambiente y la salud de la población pueden definirse sólo después de una caracterización cuidadosa de las emisiones de combustión, especialmente las de material particulado.

d) Que la caracterización cuidadosa del material particulado en las emisiones debería incluir:

Muestreos en ciclos de conducción

- PM10
- PM2.5
- Concentración en número de partículas
- Distribución de tamaño de partículas, especialmente en el intervalo de partículas ultrafinas
- Composición química, incluyendo la fracción orgánica soluble, PAHs, sulfatos, nitratos, metales
- Ensayos de mutagenicidad y carcinogenicidad

4. PERSPECTIVAS DE ESTUDIOS EN COLOMBIA

De los resultados descritos, podría predecirse que el uso de biodiesel en Colombia reduciría las concentraciones máximas de material particulado en las emisiones de combustión. Esto, por los altísimos contenidos de azufre y de aromáticos del diesel de petróleo en Colombia. Sin embargo, sería atrevido e irresponsable asegurar categóricamente que el uso de biodiesel reducirá los efectos negativos de las emisiones diesel a la salud de la población sin haber hecho los ensayos suficientes. Hasta ahora, estudios de Agudelo et al. [27] en la Universidad de Antioquia han logrado determinar un buen potencial de reducción de emisiones de partículas por el uso de biodiesel de palma, al observar reducciones en el porcentaje de opacidad del 30% al 4%. La opacidad, sin embargo, no es la mejor técnica para investiga-

ción en emisiones de partículas; es necesario desarrollar y utilizar mejores técnicas.

El escenario ideal para definir la conveniencia de sustituir diesel de petróleo por biodiesel en Colombia, en términos de sus efectos sobre la salud de la población y el ambiente, incluiría los ensayos de comparación entre las emisiones de material particulado de la combustión de biodiesel de aceite de palma, diesel de petróleo y sus mezclas, con la calidad de los combustibles producidos en Colombia.

A pesar de que el acceso a las técnicas de caracterización necesarias es muy limitado en Colombia, así como en otros países latinoamericanos, existe, en el laboratorio del Instituto Colombiano del Petróleo, ICP, un sistema equipado para mediciones en ciclos de conducción y muestreo de emisiones en túnel de dilución. Se necesitaría luego la consecución de los siguientes equipos:

- Impactador de cascada para la recolección de material particulado en diversos tamaños
- Contador de partículas (CNC, Condensation Nuclei Counter; o CPC, Condensation Particle Counter)
- Equipo para la determinación de tamaño de partículas en el tamaño ultrafino (SMPS, Scanning Mobility Particle Sizer, o DMA, Differential Mobility Analyzer)

Dado el altísimo costo de estos equipos, las formas viables de llevar a cabo estos estudios sería:

- A través de convenios de cooperación con universi-

dades o institutos en el exterior para el préstamo de equipos comerciales; y

- Mediante el desarrollo y adaptación de prototipos financiados localmente en las universidades.

Por otro lado, la sustitución parcial o total del diesel de petróleo por biodiesel debería ir acompañada de una política clara de renovación del parque automotor de buses y camiones, para lograr reducciones realmente apreciables en los inventarios de emisiones de material particulado, y por ende, en la calidad del aire, particularmente en los centros urbanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bagley, S. T., Gratz, L.D., Johnson, J. H., McDonald, J. F.

“Effects of an oxidation catalytic converter and a biodiesel fuel on the chemical, mutagenical and particle size characteristics of emissions from a diesel engine”.

En *Environmental Science and Technology*, 32: 1183-1191, 1998.

- [2] Baldassarri, L. T., Battistelli, C. L., Conti, L., Crebelli, R., De Berardis, B., Iamiceli, A. L., Gambino, M. Iannaccone, S.

“Emission comparison of urban bus engine fueled with diesel oil and ‘biodiesel’ blend”.

En *Science of the Total Environment*, 327(1-3):147-62, 2004.

- [3] Bünger, J., Krahel, J., Franke, H. U., Munack, A., Hallier, E.
 “Cytotoxic and mutagenic effects of particulate matter of biodiesel compared to fossil diesel fuel”.
 En *Mutat Res* 415: 13-23, 1998.
- [4] Donaldson, K, MacNee, W.
 “Acute respiratory effects of particulate air pollution”
 En *Annu. Rev. Public Health*, 1994; 15: 107-132.
- [5] Donaldson, K, MacNee, W.
 “The mechanism of lung injury caused by PM10”
 En *Issues in Environmental Science and Technology*, No. 10, Hester RE, Harrison RMM editors. Royal Society of Chemistry, 1998: 21-32.
- [6] Durbin, T. D., Collins, J. R., Norbeck, J. M., Smith, M. R.
 “Effects of biodiesel, biodiesel blends, and a synthetic diesel on emissions from heavy-duty diesel vehicles”
 En *Environmental Science and Technology*, 34 No. 3, 2000.
- [7] Eglert, N.
 “Fine particles and human health – a review of epidemiological studies”
 En *Toxicology letters*, 149. 235-242, 2004.
- [8] G. Oberdörster,
Environmental Health Perspectives, 102 (5): 173, 1994.
- [9] Green, L, Crouch, E. A. M., Ames, M.R. and Lash, T. L.
 “What’s wrong with the National Ambient Air Quality Standard (NAAQS) for fine particulate matter (PM2.5)?”
 En *Regulatory toxicology and pharmacology*, 35, 327-337, 2002.
- [10] Harrison, R.M., Yin, J. P.
 “Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health?”
 En *The Science of the Total Environment*, 249, 85-101, 2000.
- [11] Health Effects Institute (HEI),
Diesel Exhaust: A Critical Analysis of Emissions, Exposure and Health Effects
 Cambridge, MA, 1995.
- [12] Howes, P., Rideout, G.
 “Evaluation of biodiesel in an urban transit bus power by a 1988 DDEC116V92 TA engine”
 En *National biodiesel board*, MSED report #95-26743-1, Ottawa, Ontario, 1998.
- [13] Kittelson, D. B.
 “Engines and Nanoparticles: A Review”
 En *Journal of Aerosol Science*, Vol. 25, No. 5/6, pp 575-588, 1998.

- [14] Krahrl, J., Munack, A., Bahadir, M., Schumacher, L., Elser, N.
 "Review: utilization of rapeseed oilmethyl ester or diesel fuel: exhaust gas emissions and estimation of environmental effects"
 En *International fall fuels and lubricants meeting*, SAE Technical Paper 962096, 1996.
- [15] Lippmann, M.
 "The 1997 US EPA standards for particulate matter and ozone"
 En *Issues in Environmental Science and Technology*, 10, Hester RE, Harrison RMm editors. Royal Society of Chemistry, 1998: 75-99.
- [16] Quality of Urban Air Review Group (QUARG)
 Second report: Diesel Vehicle Emissions and Urban Air Quality
 December 1993
- [17] Hall D.E., Goodfellow C.L., Heinze P., Rikeard D.J., Nancekevill G., Martini G., Hevesi J., Rantanen L., Merino M.P., Morgan T.D.B. and Zemroch P.J..
 "A Study on the Size, Number and Mass Distribution of the Automotive Particulate Emissions from European Light Duty Vehicles"
 En SAE Technical Paper 982600, 1998.
- [18] Hall D.E., King D.J., Morgan T.D.B., Baverstock S.J., Heinze P. and Simpson B.J.
 "A review of recent literature investigating the measurement of automotive particulates: the relationship with environmental aerosol, air quality and health effects"
 En SAE Paper 982602, 1998.
- [19] Schröder, O., Krahrl, J., Bünger, J.
 "Environmental and health effects caused by the use of biodiesel"
 En SAE Technical Paper 1999-01.3561, 1999
- [20] Seaton, A., MacNee, W., Donaldson, K., Godden, D.
 Particulate air pollution and acute health effects
 En *The Lancet*, Vol. 345, pp.176-178, 1995
- [21] Sharp, C., Howell, S., Jobe, J.
 "The effect of biodiesel fuel on transient emissions from modern diesel engines. Part II: Unregulated emissions and chemical characterization"
 En SAE Technical Paper 2000-01-1968, 2000.
- [22] Solarte, I.; Caicedo, M.; Restrepo, S.
Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Santafé de Bogotá
 Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 1999.
- [23] Wang, W. G., Lyons, D. W., Clark, N. N., Gautam, M., Norton, P.M.
 "Emissions from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modification"
 En *Environmental Science and Technology*, 34: 933-939, 2000.
- [24] Westerholm R, Li, H.
 "A multivariate statistical analysis on fuel-related polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from heavy-duty diesel vehicles"
 En *Environmental Science and Technology*, 28: 965-972, 1994.
- [25] World Health Organization (WHO)
 "Guidelines for Air Quality. WHO, Geneva, 2000"
- [26] J. Andersson and B. Wedekind.
 "DETR/SMMT/CONCAWE Particulate Research Programme 1998-2001"
 En *Summary report, Ricardo Consulting Engineering*, DP01/0515. www.ricardo.com UK, May 2001.
- [27] Agudelo, J. R. Benjumea, H., Pérez, J. F.
 "Pruebas cortas en ruta en un vehículo tipo microbús con biodiesel de aceite de palma colombiano"
 En *Revista Scientia et Technica, Universidad Tecnológica de Pereira*. No. 24. Mayo 2004. pp 162-168.