

# Trazabilidad en las Mediciones de Opacidad

Guillermo Valencia

Centro Nacional de Metrología  
km 4,5 Carretera a Los Cués, 76246, Querétaro, México.  
gvalenci@cenam.mx

## RESUMEN

La opacidad es una de las magnitudes empleadas para evaluar y controlar la emisión de contaminantes de vehículos automotores a diesel y gasolina. Los instrumentos de medición diseñados para medir la opacidad, establecen sus lecturas de escala a partir de una relación entre la intensidad de radiación transmitida por un material absorbente y la intensidad de radiación proveniente de una fuente de radiación visible, la definición de opacidad y el diseño óptico del instrumento. Debido a que los fabricantes de los instrumentos manejan diferentes diseños ópticos se encuentran diferencias entre las mediciones realizadas por los mismos. En el presente documento se muestra como se establece la trazabilidad en las mediciones de opacidad, a partir del Patrón Nacional de transmitancia, absorbancia y reflectancia espectrales, y se darán los motivos por los que se obtienen lecturas distintas entre los instrumentos de medición.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas ambientales más importantes es la contaminación atmosférica o contaminación del aire. Las causas que originan esta contaminación son diversas, pero el mayor índice es provocado por las actividades industriales, las combustiones domésticas e industriales y los vehículos automotores. Razón por la cual se establecen programas y normas que permitan eliminar o en su defecto controlar y reducir los diversos contaminantes. Se tiene estimado que el 65 % de las emisiones anuales de contaminantes son de origen vehicular. [1]

Es conocido, que entre los principales contaminantes se encuentran: Dióxido de Azufre, Dióxido de Carbono, Monóxido de Carbono, Oxido de Nitrógeno, Hidrocarburos Gaseosos y Partículas, lo cuales originan problemas en los ecosistemas y de salud humana. Los gases, son medidos con analizadores de gases que basan su método de medición en celdas electroquímicas e infrarrojo no dispersivo. La medición de partículas es realizada a través de un instrumento que basa su medición en un método óptico.

De los combustibles, el diesel genera una mayor contaminación ambiental por partículas, se ha asociado a problemas de asma, cardiovasculares, irritación de vías respiratorias y mortalidad, entre otras, por la cual se busca controlar el humo de vehículos automotores a diesel. Donde el humo, es el residuo resultante de la combustión del diesel, que se compone de carbón y partículas en suspensión.

Existe un gran número de instrumentos para medir el humo, los cuales están diseñados para medir la opacidad, por lo que son llamados opacímetros.

Los opacímetros son clasificados en tres tipos:

- Opacímetros de flujo total en línea, analiza el total del humo que pasa por el tubo de escape. La medición es realizada dentro del tubo de escape.
- Opacímetros de flujo total tipo estela o fin de línea, analiza el total del humo que sale del escape en forma de estela. La medición es realizada a la salida del escape.
- Opacímetros de flujo parcial o muestreo, analiza una fracción del humo que pasa por el escape. La medición es realizada en una cámara especialmente diseñada. [2, 3]

Para evaluar que los diversos opacímetros funcionan correctamente y que sus mediciones son comparables es necesario relacionar los resultados de medición con las unidades de transmitancia del Sistema Internacional de unidades (SI), esto se consigue empleando materiales de referencia certificados.

De conformidad con la NOM-045-SEMARNAT-2006 el presente trabajo únicamente trata de opacímetros de flujo parcial.

## 2. INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE OPACIDAD

Los opacímetros establecen sus lecturas de escala a partir de una relación entre la intensidad de radiación transmitida por un material absorbente y la intensidad de radiación proveniente de una fuente

de radiación visible, la definición de opacidad y el diseño óptico del instrumento.

**2.1. Principio de Medición de Opacímetro**

El principio de medición se basa en la medición de la atenuación de la intensidad de radiación visible por absorción y dispersión de humo. La intensidad,  $I_0$ , de radiación visible, generada por una fuente de radiación, pasa a través de una columna de humo de longitud específica, donde parte de la radiación es absorbida o dispersada por el humo ocasionando una reducción de la intensidad,  $I$ , recibida por un elemento fotosensible conocido como detector. La radiación absorbida y la radiación dispersada dependen de que exista interacción entre las componentes monocromáticas de radiación con el material que atraviesa dicha radiación, por lo que la longitud de onda es una magnitud de influencia.

La relación entre  $I$  y  $I_0$  define la transmitancia,  $\tau$ , magnitud que pertenece al sistema internacional de unidades.

El término, longitud específica de humo, se refiere a la trayectoria recorrida por la radiación a través del material, conocida como longitud efectiva del camino óptico ó longitud óptica efectiva, la cual depende del diseño del fabricante del opacímetro.

**2.2. Diseño del Opacímetro**

El Opacímetro, posee una fuente de radiación visible, un detector y un camino óptico específico. Las especificaciones para los componentes antes mencionados están establecidas en normas tales como la ISO 11614:1999(E) y las normas propias de cada región o país. En México las especificaciones están dadas en la NOM-045-SEMARNAT-2006 [4]. A continuación se describe de manera breve las especificaciones relevantes para los componentes arriba indicados que impactan fuertemente en la magnitud de opacidad y el coeficiente de absorción de luz.

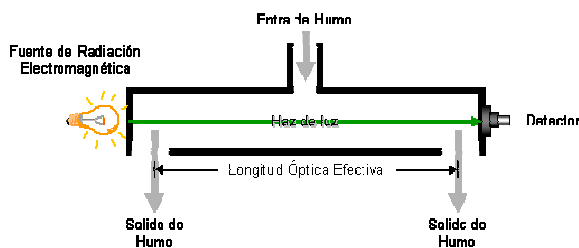


Fig. 1. Esquema típico de opacímetro de flujo parcial.

La fuente de radiación es usada para generar la radiación que atravesará la muestra. Puede ser una lámpara incandescente con temperatura de color de 2 800 K a 3 250 K o un LED verde con pico espectral entre 550 nm y 570 nm.

El detector es usado para evaluar la propiedad del medio para atenuar la radiación, puede ser una fotocelda o un fotodiodo. Cuando el detector es empleado junto con una fuente incandescente debe incluir, en el detector, un filtro que tenga una respuesta espectral similar a la curva fotópica del ojo humano con una respuesta máxima entre 550 nm a 570 nm. Ver Fig. 2.

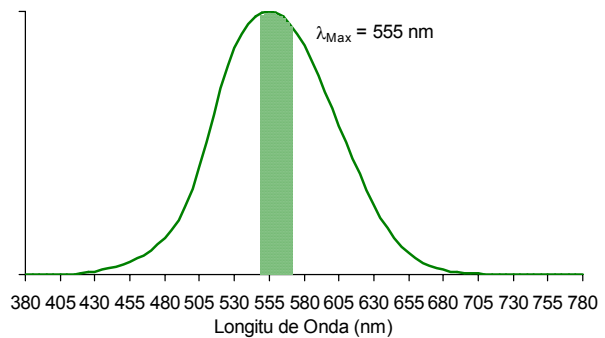


Fig. 2. Curva fotópica del ojo humano. El área en verde representa la región especificada de 550 nm a 570 nm.

Cuando el detector es utilizado junto con un LED verde, no es necesario emplear el filtro debido a que el ancho de banda espectral del LED se encuentra entre 550 nm y 570 nm y un máximo de emisión a 565 nm. Ver Fig. 3.

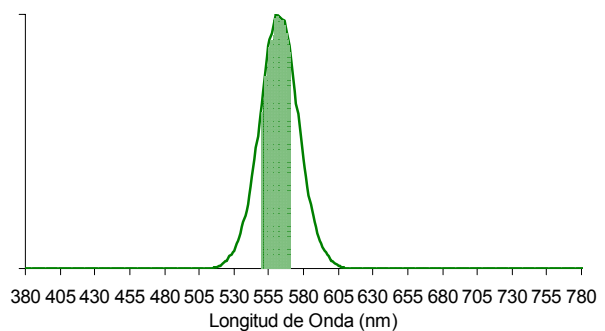


Fig. 3. Distribución espectral relativa de LED de GaP. El área en verde representa la región especificada de 550 nm a 570 nm.

El camino óptico, en opacímetros de flujo parcial, depende del diseño de la cámara que contendrá el

humo. Debe tener acabados internos de superficie que eviten o reduzcan la luz extraviada por reflexiones internas o efectos de difusión por ejemplo en negro mate. En México, la longitud óptica efectiva especificada en la NOM-045-SEMARNAT-2006 es de 430 mm [4].

Los arreglos dependen del diseño de cada fabricante. En la Fig. 4 se representan subjetivamente los posibles arreglos ópticos que se podrían tener para opacímetros de flujo parcial.

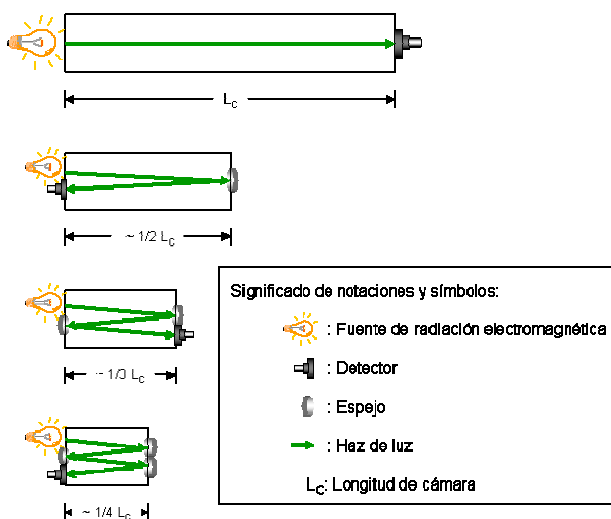


Fig. 4. Arreglos ópticos posibles para una Longitud Óptica Efectiva en opacímetros de flujo parcial.

**2.3. Definición de Magnitudes de Escala**

Los opacímetros poseen dos escalas, opacidad y coeficiente de absorción de luz.

La Opacidad es definida como la fracción de luz transmitida por un humo, el cual impide alcanzar el detector del instrumento. La opacidad es representada como una magnitud derivada de la transmitancia. Ver Ec. (1):

$$N = 100 - \tau(\%), \tag{1}$$

donde  $N$  es la opacidad y  $\tau$  es la transmitancia expresada en porcentaje a una longitud de onda específica.

El Coeficiente de absorción de luz es definido por la Ley de Beer-Lambert, suele ser expresado en  $m^{-1}$ . Ver Ec. (2):

$$K = -\frac{1}{L} \times \ln\left(1 - \frac{N}{100}\right), \tag{2}$$

donde  $K$  es el coeficiente de absorción de luz,  $L$  es la longitud óptica efectiva dada en metros, y  $\ln$  indica el logaritmo natural.

El opacímetro es ajustado, en su escala de opacidad, a cero cuando la radiación pasa a través de la zona de medición (cámara de humo), llena del aire del medioambiente, y que llega al detector. El cien por ciento corresponde a la radiación mínima que llega al detector cuando se apaga o se bloquea la fuente de radiación. Un valor de opacidad intermedia entre 15 % y 85 % es evaluado con un Material de Referencia Certificado (MRC) para comprobar si el ajuste es correcto o requiere de algún modelo de ajuste diferente.

**3. TRAZABILIDAD**

La trazabilidad de las magnitudes de Opacidad y Coeficiente de absorción de luz al SI es dada a través de Materiales de Referencia Certificados (MRC), los cuales son caracterizados y certificados para su propiedad óptica de transmitancia espectral. Mediante las Ecs. 1 y 2, definición de opacidad y la ley de Beer-Lambert respectivamente, se obtienen los valores correspondientes en las magnitudes de Opacidad y Coeficiente de absorción de luz a partir de la transmitancia a la longitud de onda específica dentro del intervalo antes mencionado. Ver Fig. 5.

En la Fig. 5, el bloque en línea punteada indica que no fue considerado en la dissemination de la incertidumbre; los alcances indicados en la calibración de los opacímetros están dados conforme a lo establecido en la NOM-045-SEMARNAT-2006.

**3.1. Materiales de Referencia Certificados**

Los materiales de referencia certificados que se pueden emplear pueden encontrarse en estado gaseoso y en estado sólido, donde el primero tendría la propiedad de llenar la cámara, mientras que el segundo tendría forma y dimensiones bien definidas, por lo que es necesario que este se sitúe en el trayecto de haz de luz que pasa a través de la zona de medición llena de aire sin necesidad de abrir la cámara o utilizar herramientas. El MRC en estado gaseoso permite evaluar la longitud óptica efectiva de un opacímetro cuando no es posible determinar ésta a partir de su geometría. El MRC en estado sólido permite la evaluación rutinaria del

opacímetro sobre su correcto funcionamiento a través de programas de calibración y verificación.

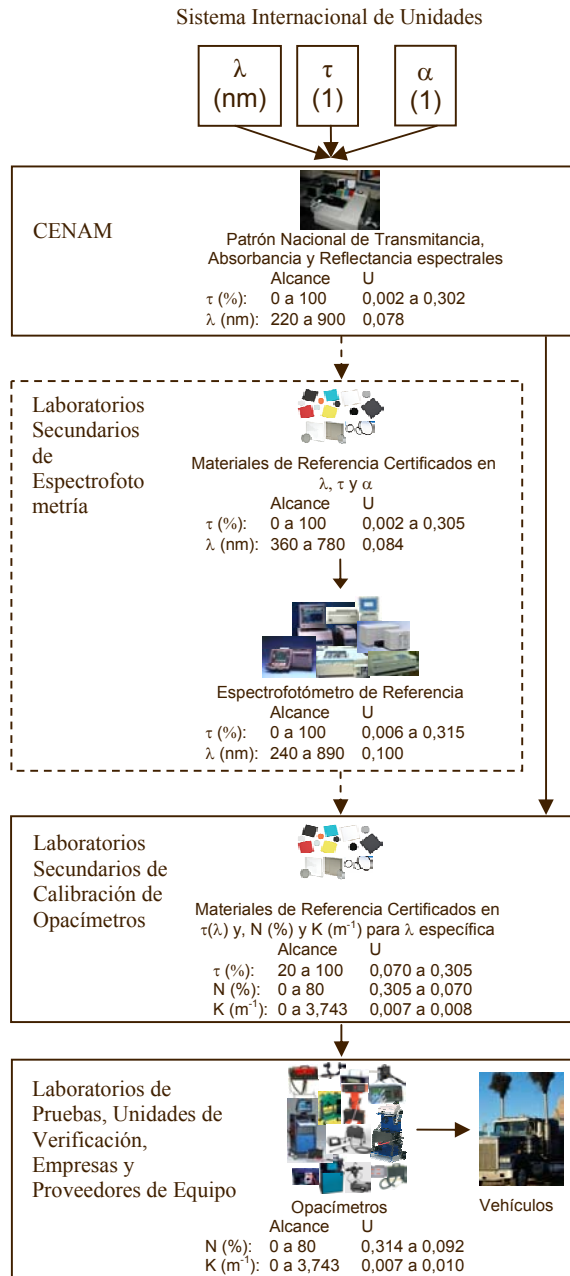


Fig. 5. Trazabilidad en las mediciones de Opacidad.

Las propiedades ópticas de los MRC deben ser del tipo densidad óptica neutra espectralmente, lo cual permite disminuir significativa la influencia de la longitud de onda. Los valores de opacidad y coeficiente de absorción de luz, así como sus

dimensiones, área de uso y forma del material, y tipo de montura dependen del diseño de cada fabricante de los opacímetros, por lo que el alcance que cubren puede no ser muy amplio y por lo general no se pueden emplear los MRC diseñados para una marca comercial en instrumentos de otras marcas comerciales.

Entre los tipos de filtros que suelen ser empleados por los fabricantes de los opacímetros como MRC se encuentran: filtros absorbivos, filtros reflectivos y filtros difusores, los dos últimos no son recomendados por razones que se discuten más adelante.

En la Fig. 6 se presentan los espectros de transmitancia para diversos filtros de densidad óptica neutra, que los fabricantes de los opacímetros llegan a utilizar como MRC y son llamados por los mismos como filtros de opacidad.

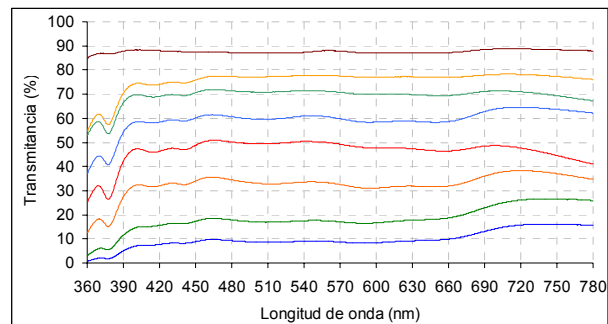


Fig. 6. Espectro de transmitancia para filtros de opacidad.

La conservación de la propiedad óptica de los filtros de opacidad depende de la calidad de su superficie, por lo que debe evitarse la contaminación y deterioro de la superficie durante su uso, manejo, transporte y almacenamiento. Para evitar contaminar la superficie con grasa o aceite se recomienda que el manejo de los filtros sea por los extremos de la montura empleando guantes y tener una atmósfera libre de partículas tales como polvo, fibras, etc. Si la superficie del filtro de vidrio se contamina no se debe intentar hacer una limpieza, a menos que la limpieza no altere la superficie del filtro que afecten los valores certificados. Para evitar el deterioro de la superficie, se debe evitar el contacto de la superficie del filtro con superficies metálicas, u otros materiales que pudieran rayar y desgastar la superficie. Debido a que los valores de propiedad pueden modificarse por el uso, manejo, transporte y almacenamiento inapropiado; el

usuario, con base en las características, el historial y frecuencia de uso del material; debe definir programas de verificación y re-certificación de los filtros.

**4. DISCUSIÓN**

La Longitud de Onda es una magnitud que influye significativamente en las mediciones de N y K. Sin embargo, su influencia es disminuida delimitando la región del espectro a emplear, de 550 nm y 570 nm, y en la evaluación del correcto funcionamiento del opacímetro, es minimizada con el empleando MRC de densidad óptica neutra. Generalmente, los opacímetros tienen especificadas longitudes de onda de trabajo de 555 nm, cuando utilizan lámpara incandescente y filtro verde, o 565 nm cuando utilizan LED verde. Como se puede apreciar en la Fig. 6, los filtros de opacidad en la región de 550 nm a 570 nm presentan una variación de transmitancia menor a 1,1 %, y entre 555 nm y 565 nm la variación de transmitancia es menor a 0,5 %.

La Longitud Óptica y el Arreglo Óptico influyen fuertemente las mediciones de N y K, lo cual es explicado por la ley de Beer-Lambert, donde el estado de agregación del material que es evaluado, define la trayectoria del haz que atraviesa por el mismo. Razón por la cual, cuando se comparan lecturas de N o K entre opacímetro, ya sea empleando materiales de estado gaseoso o sólido, se obtienen lecturas diferentes.

En la Fig. 7, se muestra la influencia que tiene la Longitud Óptica sobre las escalas de N y K.

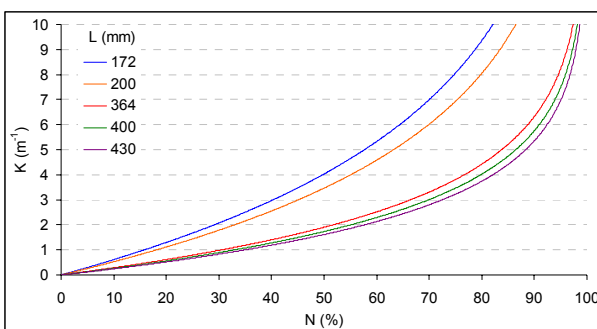


Fig. 7 Comparativo de las escalas entre opacímetros de distinta Longitud Óptica Efectiva.

La Fig. 8, muestra la influencia del Arreglo Óptico sobre las mediciones de opacidad y coeficiente de absorción de luz cuando se emplea un MRC de estado sólido, que tiene forma y dimensiones bien

definidas, como lo son los llamados filtros de opacidad. Donde la N observada será igual y la K observada será diferente cuando se comparen lecturas entre opacímetros con diseños iguales y longitudes ópticas diferentes, ver puntos indicados en Fig. 8. Las N observadas serán diferentes, de tipo exponencial, cuando se comparen lecturas entre opacímetros con diferentes diseños y de longitudes óptica igual, mientras que las K observadas, en opacímetros de doble y triple recorrido, serán múltiplos de la K observada en el opacímetro de un solo recorrido, ver puntos indicados en Fig. 8.

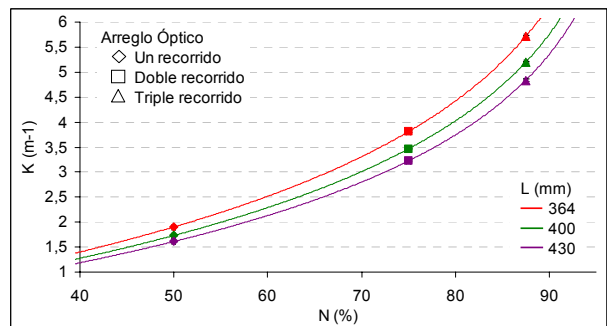


Fig. 8. Comparativo entre lecturas de opacímetros de Longitud Óptica Efectiva distinta y arreglos ópticos distintos.

Cuando se realizan mediciones de opacidad empleando materiales gaseosos, los cuales adoptaran la forma de la cámara, la N observada será diferente y la K observada será igual cuando se compare lecturas entre opacímetros de diferentes longitudes óptica y diseños.

Otros materiales que suelen ser empleados como referencia son los filtros reflectivos, los cuales se tratan de vidrios con película delgada metálica y presentan un espectro de características similares a los filtros de densidad óptica neutra, sin embargo no se recomienda su uso debido a que sino se cuentan con las mismas condiciones de ángulo de incidencia del haz de luz sobre la superficie del filtro, se pueden presentar diferencias significativas en las lecturas de N y K realizadas por el instrumento y los valores certificados. Esta condición se hace evidente cuando el filtro empleado no cuenta con una dimensión, forma y montura compatible con la propia del opacímetro.

Los filtros difusores no son recomendados debido a que, al situar éste en la trayectoria del haz de luz, la radiación será esparcida en todas direcciones,

debido a su propiedad óptica, ocasionando pérdidas en la radiación recibida por el detector. En la Fig. 9 se presentan los espectros de transmitancia para filtros difusores, que los fabricantes de los opacímetros llegan a utilizar como MRC.

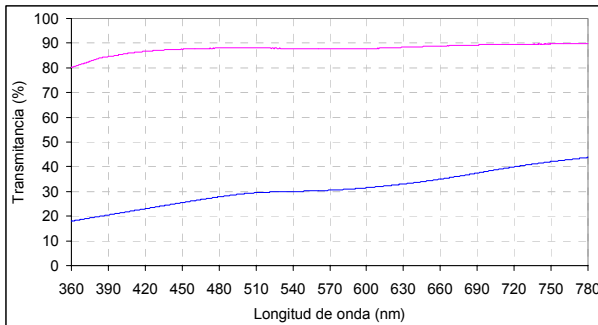


Fig. 9. Espectro de transmitancia para filtros de difusores.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo a la definición de la opacidad y el coeficiente de absorción de luz son magnitudes derivadas de la transmitancia lo que permite dar trazabilidad a las unidades del SI.

La trazabilidad de las mediciones de opacidad se logra a partir de materiales de referencia de tipo absorbivos, certificados en transmitancia, opacidad y coeficiente de absorción de luz, con estos se calibran los opacímetros que se emplean para evaluar el humo proveniente del escape de vehículo automotor.

Respecto a los MRC en estado gaseoso se puede comentar que también podría ser empleados para la evaluar el correcto funcionamiento del opacómetro, sin embargo no se usan con frecuencia debido a que se trata de material consumible, adicionalmente este tipo de MRC es influenciado por condiciones ambientales como la Presión y Temperatura para las cuales habría que realizar las correcciones correspondientes.

Es importante especificar la longitud óptica en lecturas de N y K, tomando en cuenta las consideraciones aquí mencionadas sobre todo cuando se comparan lecturas entre opacímetros.

La especificación dada para Longitud Óptica Efectiva en la NOM-045-SEMARNAT-2006 evita las diferencias de lectura de N y K únicamente cuando se comparan opacímetros que tiene el mismo arreglo óptico.

## REFERENCIAS

- [1] Contaminación del aire y transporte vehicular en la ZMVM; <http://www.sma.df.gob.mx/retrofit/>
- [2] ISO 11614:1999(E) Reciprocating internal combustion compression-ignition engines – Apparatus for measurement of the opacity and for determination of the light absorption coefficient of exhaust gas.
- [3] UNE 82503 Instrumentos de medida. Instrumentos destinados a medir la opacidad y determinar el coeficiente de absorción luminosa de los gases de escape de motores de encendido por compresión (diesel); AENOR 1999.
- [4] NORMA Oficial Mexicana NOM-045-SEMARNAT-2006, Protección ambiental.- Vehículos en circulación que usan diesel como combustible.- Límites máximos permisibles de opacidad, procedimiento de prueba y características técnicas del equipo de medición.
- [5] Environmental Defense Fund; Heavy Traffic, Dirty Air and the Risk to New Yorkers; March 2007.
- [6] Mills et al; "Ischemic and Thrombotic Effects of Dilute Diesel-Exhaust Inhalation in Men with Coronary Heart Disease"; The New England Journal of Medicine; vol. 357; no. 11; 1075 – 1082; September 13, 2007.
- [7] NORMA Oficial Mexicana NOM-CCAT-019-ECOL/1993 (NE), Contaminación atmosférica - fuentes fijas - niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas (PST), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOX), óxidos de azufre (SOX) y humo, así como los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de combustión de calentamiento indirecto utilizados en las fuentes fijas, que usan combustibles fósiles líquidos y gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/214/ccat19.html>
- [8] ISO/CIE 10527:1991 (E); CIE standard colorimetric observers; First Edition.
- [9] Nava et al; El Sistema Internacional de Unidades (SI); CNM-MMM-PT-003; CENAM; Mayo 2001.