

Technologie

Todas las teorías son legítimas y ninguna tiene importancia. Lo que importa es lo que se hace con ellas. **Jorge Luis Borges (1899-1986) Escritor argentino**

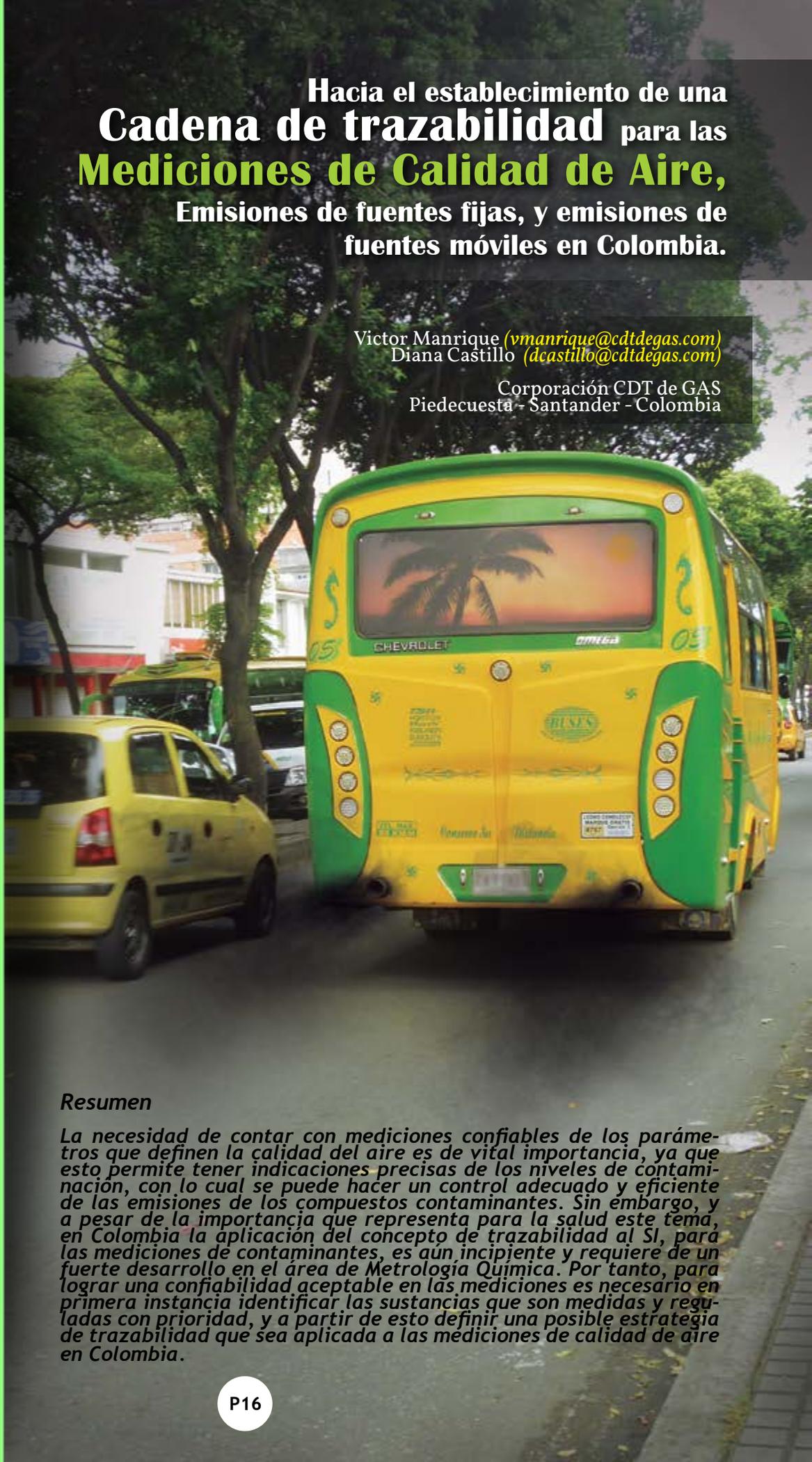
Conjunto de teorías y de técnicas que permiten el aprovechamiento práctico del conocimiento científico, orientados a producir bienes y servicios de utilidad económica, social, y política.

En esta sección, cada semestre, expertos nacionales y/o extranjeros, ofrecerán artículos técnicos que buscan sensibilizar a nuestros lectores, acercándolos con conocimiento, a la aplicación de la metrología en las diferentes actividades de nuestra sociedad.

Hacia el establecimiento de una Cadena de trazabilidad para las Mediciones de Calidad de Aire, Emisiones de fuentes fijas, y emisiones de fuentes móviles en Colombia.

Victor Manrique (vmanrique@cdtdegas.com)
Diana Castillo (dcastillo@cdtdegas.com)

Corporación CDT de GAS
Piedecuesta - Santander - Colombia



Resumen

La necesidad de contar con mediciones confiables de los parámetros que definen la calidad del aire es de vital importancia, ya que esto permite tener indicaciones precisas de los niveles de contaminación, con lo cual se puede hacer un control adecuado y eficiente de las emisiones de los compuestos contaminantes. Sin embargo, y a pesar de la importancia que representa para la salud este tema, en Colombia la aplicación del concepto de trazabilidad al SI, para las mediciones de contaminantes, es aún incipiente y requiere de un fuerte desarrollo en el área de Metrología Química. Por tanto, para lograr una confiabilidad aceptable en las mediciones es necesario en primera instancia identificar las sustancias que son medidas y reguladas con prioridad, y a partir de esto definir una posible estrategia de trazabilidad que sea aplicada a las mediciones de calidad de aire en Colombia.

1. INTRODUCCIÓN.

La Corporación CDT de GAS tiene dentro de sus objetivos institucionales la misión de contribuir a la preservación del medio ambiente a través de la oferta de servicios especializados de metrología de flujo y calidad de gases. Es por esto que se ha planteado con el apoyo de Colciencias, el objetivo de formular un programa estratégico para brindar trazabilidad a las mediciones de calidad del aire atmosférico, que le permita al país contar con herramientas para garantizar la confiabilidad de las mediciones.

Teniendo en cuenta lo anterior se realizó un estudio y un análisis de los distintos aspectos que cubre la calidad del aire, con el fin de tener un panorama claro acerca de los métodos de referencia que permiten dar trazabilidad a los distintos parámetros, y orientar de forma adecuada la formulación del programa estratégico.

Este documento incluye en primera instancia, un análisis de la problemática actual relacionada con las emisiones de contaminantes y continúa con una breve descripción de las principales sustancias que afectan la calidad del aire. Posteriormente, se muestra la normatividad ambiental que aplica en Colombia, donde se observan las sustancias reguladas y los límites de emisión de cada una de ellas.

Finalmente, se expone una propuesta de trazabilidad planteada a partir de los estudios y análisis realizados y las conclusiones y recomendaciones generadas, las cuales pretenden ser el inicio de un programa serio que con el apoyo de instituciones que trabajen estos temas puedan brindarle a Colombia en un mediano plazo la posibilidad de contar con mediciones confiables de los contaminantes del aire, a partir de las cuales se garantice una disminución de los niveles de contaminación ambiental en nuestro país.

2. ALCANCE

El Alcance del Plan involucra las mediciones asociadas a “Calidad de Aire Urbano”, “Emisiones de Fuentes Fijas”, y “Emisiones de Fuentes Móviles (vehiculares)”. No se han considerado los requerimientos de Calidad de Aire en ambientes interiores, en zonas clasificadas (atmósferas peligrosas por sustancias tóxicas, corrosivas, o inflamables),

ni para las mediciones de agentes microbiológicos o de patógenos en el aire. Tampoco se incluye la medición de parámetros físicos asociados al confort, como humedad relativa, temperatura, o velocidad de viento, ni las mediciones de emisión, o de concentración de Gases de Efecto Invernadero -GEI en la atmósfera.

Esto en consideración a la relevancia de la contaminación urbana por sus mayores impactos sociales y ambientales; y que algunas de las otras aplicaciones cuentan con rigurosos protocolos de Control y Aseguramiento de Calidad, debido a la criticidad de sus aplicaciones industriales. Sin embargo, la metodología aplicada en el presente plan fácilmente puede replicarse para generar los requerimientos para otras aplicaciones.

3. PANORAMA ACTUAL DE CALIDAD DE AIRE

El aire está compuesto principalmente por Oxígeno (O₂) y Nitrógeno (N₂), y adicionalmente contiene pequeñas cantidades de otras sustancias como Vapor de Agua, Ozono, Dióxido de Carbono e Hidrógeno. Sin embargo, emisiones provenientes tanto de procesos naturales (como la erupción de volcanes), así como de actividades industriales y de otras asociadas al desarrollo y la supervivencia de los seres humanos han originado la presencia de contaminantes en la atmósfera, deteriorando así la *calidad del aire* y por ende afectando la salud de los seres vivos. El aire constituye la atmósfera terrestre: a nivel troposférico es fundamental para la respiración y la fotosíntesis y en donde ocurren los fenómenos que originan el clima. A nivel estratosférico se encuentra la *capa de ozono*, que protege a la Tierra de los rayos ultravioleta del Sol.

En ambientes exteriores, la calidad del aire se ve afectada principalmente por las emisiones de vehículos (Figura 1) y por aquellas provenientes de la industria como la extracción y procesamiento de combustibles fósiles. Esta situación se evidencia con las altas tasas de morbilidad y mortalidad relacionadas con la mala calidad del aire. Por ejemplo la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011) señala que anualmente mueren más de dos millones de personas por la exposición a sustancias contaminantes en el aire, como el material particulado PM2.5. Por su parte, la Agencia Internacional para la Investigación en Cáncer publicó en 2013 un Informe que considera “*comprobado que la con-*

taminación atmosférica causa cáncer”, teniendo en cuenta que en 2010 se produjeron 223000 muertes por cáncer de pulmón en todo el mundo relacionadas por la contaminación del aire (IARC, 2013).



Figura 1. Emisiones vehiculares del transporte público - Bucaramanga¹

En Colombia, cada año ocurren aproximadamente 6000 muertes prematuras relacionadas con la contaminación del aire ambiente, de las cuales cerca de 1100 muertes están relacionadas con la contaminación al interior de los hogares por el uso de leña y carbón para cocinar. De acuerdo con el estudio “Colombia: Strengthening environmental and natural resources Institutions” realizado por el Banco Mundial en 2012, se estima que los costos en salud que representa este tipo de contaminación ascendieron al 1,1% del PIB en 2009. (IDEAM, 2012).

Contaminantes prioritarios en la medición de la calidad de aire:

Teniendo en cuenta el grado de afectación que tienen los contaminantes en el aire y la frecuencia de sus emisiones, se tienen ciertas sustancias que son consideradas como prioritarias para la medición y control. A continuación, se hace una breve descripción de los principales contaminantes.

- **Material Particulado (PM):**

Es el término usado para denominar una mezcla heterogénea de partículas sólidas y líquidas que se encuentran en el aire, entre las cuales se encuentra el polvo, la suciedad, el hollín, el humo y pequeñas gotas de líquido. Estas partículas pueden estar suspendidas en el aire por largos periodos de tiempo. Algunas partículas son lo sufi-

cientemente grandes u oscuras para ser vistas en forma de hollín o humo, otras son tan pequeñas que individualmente solo pueden ser detectadas con un microscopio electrónico. El material particulado puede ser un contaminante primario o secundario; las partículas “primarias”, tales como el humo o el hollín se emiten directamente al aire y son generados desde una variedad de fuentes tales como carros, camiones, autobuses, fábricas, sitios de construcción, carreteras sin pavimentar, trituración de piedras y quema de madera. Las partículas “secundarias” son formadas en el aire a partir del cambio químico de emisiones gaseosas primarias, éstas se forman indirectamente cuando los gases provenientes de la quema de combustibles reaccionan con la luz del sol y el vapor de agua. El material particulado denominado como PM_{2.5} describe las finas partículas que tienen un diámetro menor o igual a 2,5 µm, por su parte el PM₁₀ se refiere a todas las partículas que son menores o iguales a 10 µm de diámetro.

- **Óxidos de Azufre (SO₂ y SO):**

Son gases incoloros, que se forman cuando se queman combustibles que contienen azufre, tales como el carbón y el petróleo. El dióxido de azufre (SO₂) es el contaminante criterio indicador de las concentraciones de óxidos de azufre en el aire del ambiente. El SO₂ se disuelve en el vapor de agua para formar ácido e interactúa con otros gases y partículas en el aire para formar sulfatos y otros productos que pueden ser perjudiciales para las personas y su ambiente. La mayoría de las emisiones de SO₂ provienen de centrales eléctricas, especialmente en las que se utiliza carbón. Otras fuentes de SO₂ son las industrias que derivan sus productos de materias primas como minerales metálicos, carbón y petróleo crudo, o que queman carbón o petróleo para generar calor. Un ejemplo son las refinerías de petróleo, las cementeras y las empresas de procesamiento de metales.

- **Óxidos de Nitrógeno (NO_x):**

Es el término usado para describir la familia de otros compuestos formados por oxígeno y nitrógeno, específicamente al NO, NO₂. Los NO_x son un grupo de gases altamente reactivos que juegan un papel importante en la formación de ozono. La mayoría de los óxidos de nitrógeno son incoloros e inodoros, sin embargo el NO₂ junto con partículas en el aire puede frecuentemente ser visto como una capa de color marrón rojizo sobre muchas áreas urbanas.

¹ Fuente: Vanguardia.com

Los óxidos de nitrógeno se forman cuando un combustible es quemado a altas temperaturas, como en un proceso de combustión, es por esto que las fuentes primarias de NO_x son los motores de los vehículos, las centrales eléctricas y otras fuentes industriales, comerciales y residenciales que queman combustibles.

- **Monóxido de Carbono (CO):**

Es un gas incoloro e inodoro formado cuando el carbón en un combustible no se quema completamente. Los motores de los vehículos contribuyen con aproximadamente 60% de las emisiones globales de CO, por lo que los más altos niveles de este compuesto se encuentran en las ciudades que presentan altos flujos vehiculares. Otras fuentes de emisión de CO incluyen procesos industriales, quema de madera y fuentes naturales como los incendios forestales. Estufas de leña y de gas, humo de cigarrillos y calentadores de gas y keroseno sin ventilación son fuentes de CO en ambientes interiores.

- **Hidrocarburos:**

Los gases hidrocarburos son conocidos como Compuestos Orgánicos Totales (COT). Este concepto incluye a todos los compuestos carbonados excepto los carbonatos, carburos metálicos, y los óxidos de carbono (monóxido de carbono y dióxido de carbono). En el contexto de la gestión de la

calidad del aire, los COT también son referidos como Hidrocarburos Totales (HCT o HC). Algunos de los COT emitidos a la atmósfera tienen una reactividad fotoquímica muy baja, o bien, carecen de ella. Por otra parte, los compuestos considerados fotoquímicamente reactivos son denominados Compuestos Orgánicos Volátiles (COV). Entonces, por definición, los COV son un subconjunto de los hidrocarburos totales, y son gases fotoquímicamente reactivos que pueden participar en la formación del ozono. Algunos de los compuestos en esta categoría de contaminantes incluyen aldehídos tales como el formaldehído y acetaldehído, además de compuestos aromáticos como el benceno.

4. LEGISLACIÓN AMBIENTAL VIGENTE EN CALIDAD DE AIRE Y EMISIONES CONTAMINANTES

Con la Constitución de 1991, en Colombia se elevó a norma constitucional la “*consideración, manejo y conservación de los recursos naturales y el medio ambiente, en particular el derecho a gozar de un ambiente sano*” (Art. 79). Posteriormente, se ha desarrollado la legislación pertinente con el fin de reglamentar los lineamientos para garantizar que la calidad del aire sea adecuada.

La Tabla 1 muestra un resumen de la legislación vigente en Colombia, que establece las normas de calidad de aire, y los límites permisibles de contaminación.

ALCANCE	RESOLUCIÓN	DESCRIPCIÓN
Calidad de aire	601 de 2006	Establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia
	610 de 2010	Modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006.
	650 de 2010	Adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire
	2154 de 2010	Ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire
Emisiones de Fuentes Fijas	909 de 2008	Establece las Normas y Estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por Fuentes Fijas
	760 de 2010	Adopta el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas
	2153 de 2010	Ajusta el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas, adoptado a través de la Resolución 760 de 2010
Emisiones de Fuentes Móviles	910 de 2008	Reglamenta los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres

Tabla 1. Legislación ambiental colombiana en calidad de aire y emisiones contaminantes

4.1 Norma de Calidad de Aire. Resolución 601 (2006), modificada por la Res. 610 (2010).

Esta resolución contiene los niveles máximos permisibles de contaminantes en la atmósfera; los procedimientos para la medición de la calidad del aire, los programas de reducción de la contaminación del aire y los niveles de prevención, alerta y emergencia, así como las medidas generales para su mitigación, y es una norma aplicable a todo el territorio nacional.

La Resolución 601 de 2006 regula varios contaminantes criterio (PM10, SO₂, NO₂, O₃ y CO) y no convencionales: Benceno, Plomo (Pb) y sus compuestos, Cadmio, Mercurio, Hidrocarburos Totales expresados como Metano (CH₄), Tolueno (C₆H₅CH₃) y Vanadio (Vd).

4.2 Emisiones por fuentes fijas. Resolución 909 (2008) modificada por la Res. 1309 (2010).

Esta resolución establece las normas y estándares de emisión admisibles para contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas (Figura 2), tiene como objeto adoptar los procedimientos de medición de emisiones para fuentes fijas y reglamenta los convenios de reconversión a tecnologías limpias. La resolución establece los estándares de emisión admisibles de emisiones de Material Particulado (MP), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos de Flúor inorgánico (HF), compuestos de Cloro inorgánico (HCl), Hidrocarburos Totales, Dioxinas y Furanos, Neblina Ácida (Trióxido de Azufre H₂SO₄), Plomo (Pb), Cadmio (Cd), Cobre (Cu) y sus compuestos para actividades industriales nuevas y existentes en diferentes sectores productivos.



Figura 2. Emisiones de Fuentes Fijas.

4.3 Emisiones por fuentes móviles. Resolución 910 de 2008.

Esta resolución establece los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes que deben cumplir las fuentes móviles terrestres (vehículos automotores). Además reglamenta los requisitos y certificaciones a las que están sujetos los vehículos y demás fuentes móviles, sean importadas o de fabricación nacional.

La resolución establece los límites de emisión de Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarburos Totales (HCT) permisibles para vehículos accionados con gasolina en velocidad de crucero y en condición de marcha mínima, ralenti o prueba estática, y las concentraciones de Oxígeno (O₂) y Dióxido de Carbono (CO₂) requerida para considerar válida la prueba.

5. ANÁLISIS DE LA OFERTA NACIONAL DE SERVICIOS DE MUESTREO Y/O ANÁLISIS DE CONTAMINANTES DEL AIRE (CALIDAD DE AIRE Y EMISIONES POR FUENTES FIJAS) EN LABORATORIOS ACREDITADOS.

5.1 Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire - SVCA

Los Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA) (Figura 3) son estaciones equipadas con instrumentos para monitorear los niveles de contaminación del aire en ciudades y zonas de interés. Varios SVCA conforman una red de *vigilancia de la calidad de aire* en una ciudad o región determinada.

A diciembre de 2013, en el sistema de Información SISAIRE del IDEAM están registrados 131 SVCA



Figura 3. SVCA de la Corporación para la Defensa de la Mesa de Bucaramanga (CDMB)

instalados en todo el país. El 85% de estos SVCA monitorean PM10, el cual es el contaminante más monitoreado en todo el país. El 32% de los SVCA monitorean óxidos de Nitrógeno, el 28% monitorean dióxido de azufre, y el 26% monitorean monóxido de carbono (Ver Figura 4). El PM2.5 es el contaminante menos monitoreado, y solo cuenta con sistemas de muestreo instalados en el 13% de los SVCA registrados.

5.2 Laboratorios Acreditados

En Colombia, según lo estipulado en el Decreto 1600 de 1994 y la Resolución No. 0176 de 2003, es competencia del IDEAM la acreditación de los Laboratorios Ambientales, bajo los lineamientos de la Norma NTC-ISO/IEC 17025 “*Requisitos Generales de Competencia de Laboratorios de Ensayo y Calibración*”. A diciembre de 2013 había 63 Laboratorios acreditados por IDEAM, cuyo alcance incluye específicamente servicios de muestreo y/o análisis de calidad de aire, y de emisiones por fuentes fijas.

- **Calidad de Aire:** De estos 63 Laboratorios, 55 prestan servicios de análisis de calidad de aire. Las sustancias con mayor oferta de servicios de análisis son: PST y PM10 con cerca del 87%; SO₂ y NO₂ con el 73%; y CO y O₃ con oferta de servicios de análisis en el 18% de los Laboratorios acreditados para Calidad de Aire (Ver Figura 5).
- **Fuentes Fijas:** Se identificaron 48 laboratorios acreditados por IDEAM que prestan servicios de muestreo y/o análisis de emisiones de fuentes fijas. Las sustancias con mayor oferta de servicios son: los óxidos de Nitrógeno (NO_x) con el 83% de los laboratorios, material particulado con el 77%, los compuestos de azufre, incluyendo SO₂, SO₃ y niebla de H₂SO₄, con el 73% (Ver Figura 6).
- **Centros de Diagnóstico Automotor:** En Colombia, el *Organismo Nacional de Acreditación* -ONAC es la entidad encargada de acreditar los *Centros de Diagnóstico Automotor* -CDA, para la realización de procedimientos de *revisión técnico mecánica y de emisiones contaminantes* que permiten verificar las condiciones mecánicas, de seguridad y los niveles de emisión de gases contaminantes. El directorio de acreditación

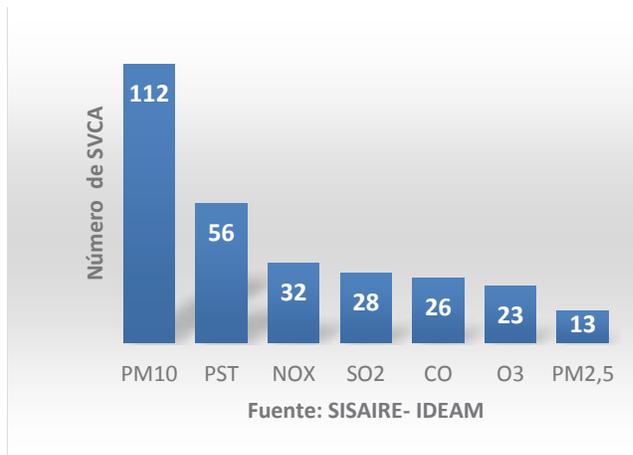


Figura 4. Contaminantes más monitoreados por los Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire SVCA en Colombia (Red SISAIRE)

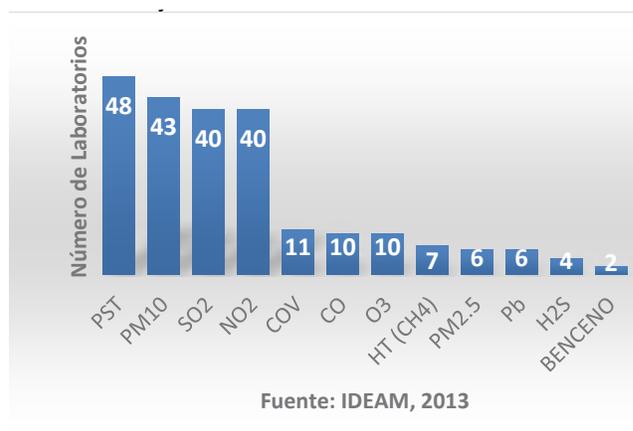


Figura 5. Oferta de servicios de muestreo y/o análisis de calidad de aire en Laboratorios Acreditados por IDEAM

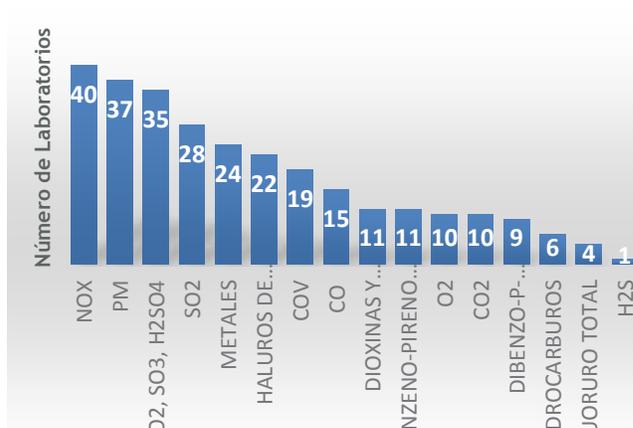


Figura 6. Oferta de servicios de muestreo y/o análisis de emisiones de Fuentes Fijas en Laboratorios Acreditados por IDEAM

de la ONAC registra 267 Centros de Diagnóstico Automotor acreditados a la fecha. En general, prácticamente todos los sistemas de análisis de gases de combustión vehicular utilizados en los CDA muestrean y analizan cuatro sustancias: Oxígeno (O₂), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), e hidrocarburos totales. Algunos analizadores incluyen el muestreo de otras sustancias y el cálculo de índices específicos como por ejemplo la relación aire/combustible.

5.3 Selección de las sustancias de interés y sus intervalos de concentración.

Para cada uno de los ámbitos de aplicación (Calidad de Aire, emisiones por Fuentes Fijas y emisiones por Fuentes Móviles) se seleccionan las sustancias de mayor relevancia dentro de la regulación ambiental vigente, tomando como criterio si la sustancia está incluida dentro de dos o más ámbitos de aplicación, y por otra parte la mayor oferta de servicios de muestreo y/o análisis por parte de laboratorios acreditados y sistemas de vigilancia de calidad de aire SVCA.

Como resultado del anterior ejercicio se seleccionan las sustancias incluidas en dos o más ámbitos de

la regulación ambiental vigente y que cuentan con una oferta representativa de servicios de muestreo y análisis (más de 20 laboratorios, CDA, o SVCA), priorizadas de acuerdo a la mayor oferta de servicios para cada sustancia (ver Tabla 2).

- Material Particulado (PST y PM₁₀)
- Dióxido de Azufre (SO₂)
- Dióxido de Nitrógeno (NO₂)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Hidrocarburos totales (HCT)

5.4 Intervalos de concentración

Los intervalos de concentración de cada sustancia relevantes para las diferentes aplicaciones se determinan de acuerdo a los límites permisibles en la regulación ambiental vigente tanto de calidad de aire como de emisiones (ver Tabla 3).

Estas concentraciones relativamente bajas se pueden obtener mediante la dilución de gases de referencia en concentraciones altas, y se puede realizar de manera estática o dinámica. El método de dilución seleccionado afecta directamente la incertidumbre de la mezcla de gas a obtener, que por supuesto será mayor que la incertidumbre del gas de referencia original.

				Calidad de Aire	Fuentes Fijas	Fuentes Móviles
				Res. 601/10 y 610/10	Res. 909/08 y 1309/10	Res. Res. 910/08
Contaminantes Convencionales	Contaminantes "Criterio"	Monóxido de carbono	CO	Si		Si
		Dióxidos de azufre	SO ₂	Si	Si	
		Óxidos de Nitrógeno	NO _x	Si	Si	Si
		Ozono	O ₃	Si		
		Plomo	Pb	Si	Si	
		Material Particulado	MP	Si	Si	Si
Contaminantes Convencionales	Compuestos Orgánicos	Hidrocarburos	CxHy	Si	Si	Si
		Tolueno		Si		
		Benceno		Si		
		Dioxinas y Furanos			Si	
	Compuestos Inorgánicos	Trióxido de Azufre	H ₂ SO ₄		Si	
		Compuestos de Cloro	HCl		Si	
		Compuestos de Flúor	HF		Si	
	Metales	Cobre	Cu		Si	
		Cadmio	Cd	Si	Si	
		Mercurio	Hg	Si		
Vanadio		Vd	Si			

Tabla 2. Sustancias contaminantes y emisiones incluidas en la regulación ambiental vigente.

SUSTANCIAS	INTERVALOS DE CONCENTRACIÓN DE CANTIDAD DE SUSTANCIA, DE INTERÉS PARA CADA APLICACIÓN		
	CALIDAD DE AIRE ¹	EMISIONES FUENTES FIJAS ²	EMISIONES FUENTES MÓVILES
PM	50 - 500 µg/m ³	50 - 250 mg/m ³	NA
SO ₂	30 - 600 nmol/mol	140 - 200 µmol/mol	NA
NO ₂	50 - 1000 nmol/mol	-	NA
NO _x (NO ₂)	-	260 - 300 µmol/mol	
NO _x	-	500 - 1800 mg/m ³	
CO	8 - 40 µmol/mol	NA	1-5 cmol/mol (%)
HCT	NA	40 mg/m ³	-
HCT (CH ₄)		56,6 µmol/mol	200-10000 µmol/mol

NOTA: Los intervalos de concentración de interés están expresados en unidades del SI para fracción de cantidad de sustancia: cmol/mol (%), µmol/mol (ppm) y nmol/mol (ppb) para las sustancias puras, y en µg/m³ para las diluciones de mezclas de sustancias (material particulado y óxidos de nitrógeno).

Tabla 3. Intervalos de concentración para cada aplicación

5.5 Incertidumbres objetivo

La legislación ambiental colombiana no establece criterios de calidad de las mediciones de contaminantes de aire, en términos de los errores máximos permisibles, la incertidumbre de las mediciones reportadas por las entidades de control y vigilancia.

En ese sentido, la confiabilidad de las declaraciones de “cumplimiento” o “incumplimiento” de un límite de inmisión, puede verse comprometida cuando el valor reportado esta cercano a los límites, con una diferencia menor a la incertidumbre objetivo. La Directiva Europea 2008/50/CE establece objetivos de calidad de los datos de concentración de contaminantes en el aire, obtenidos por mediciones continuas, mediciones indicativas, modelaciones o por estimaciones. La Tabla 4 resume las incertidumbres objetivo de las mediciones de calidad de aire para los contaminantes definidos anteriormente.

Hay que considerar además que la estimación de la incertidumbre sobre una medición puntual de concentración de un contaminante en el aire, no involucra únicamente la incertidumbre del equipo de medición, o del gas de referencia utilizado para su calibración y ajuste. Otros factores que añaden incertidumbre a la medición, y que se deben controlar son:

- Las condiciones meteorológicas
- La selección del punto de monitoreo
- La topografía del lugar
- Las variaciones diarias de emisión
- Las características metrológicas del equipo
- El método de referencia utilizado

La incertidumbre debida a estos factores se puede reducir con una adecuada selección de los puntos de monitoreo, y la implementación de medidas de control y aseguramiento de la calidad (QA/QC) de la red de vigilancia de calidad de aire que involucre el aseguramiento metrológico de todas las

INCERTIDUMBRE OBJETIVO	CONTAMINANTE	
	NO _x /NO ₂ CO SO ₂	PM ₁₀ PM _{2,5}
Mediciones continuas	15%	25%
Mediciones indicativas	25%	50%
Modelamiento (Diaria)	50%	-
Modelamiento (media anual)	30%	50%
Estimación	75%	100%

Tabla 4. Incertidumbres objetivos según el método de cuantificación para cada contaminante

¹ A condiciones de referencia 298,15 K y 101,325 kPa.

¹ A condiciones de referencia 298,15 K y 101,325 kPa con oxígeno de referencia del 11%.

¹ Límite superior (1800 mg/m³) establecido por la Res. 1309 de 2010 para motores nuevos o existentes de capacidad igual o superior a 1MW, medido a condiciones de referencia y con oxígeno de referencia de 15%.

magnitudes de influencia del proceso de medición de contaminantes.

6. PROPUESTA DE TRAZABILIDAD PLANTEADA

El estudio realizado por la Corporación CDT de GAS y descrito en los puntos anteriores, permitió realizar una evaluación cualitativa de la infraestructura, los recursos y la experiencia con que cuenta Colombia en el tema de trazabilidad de las mediciones de Calidad de Aire. La Figura 7 muestra un esquema de como se da la jerarquía de trazabilidad y su relación con los recursos disponibles actualmente en el país, lo que permite establecer una probable técnica de trazabilidad para ser implementada.

Por su parte, la Figura 8 muestra la diseminación de la trazabilidad en las mediciones de calidad de aire por medio de estándares para análisis de gas.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La trazabilidad de las mediciones es una condición necesaria para establecer de forma confiable las indicaciones de Calidad del Aire, y de emisiones contaminantes, y por lo tanto, para asegurar la calidad de las medidas de monitoreo y control, y la efectividad de las políticas en este sentido.

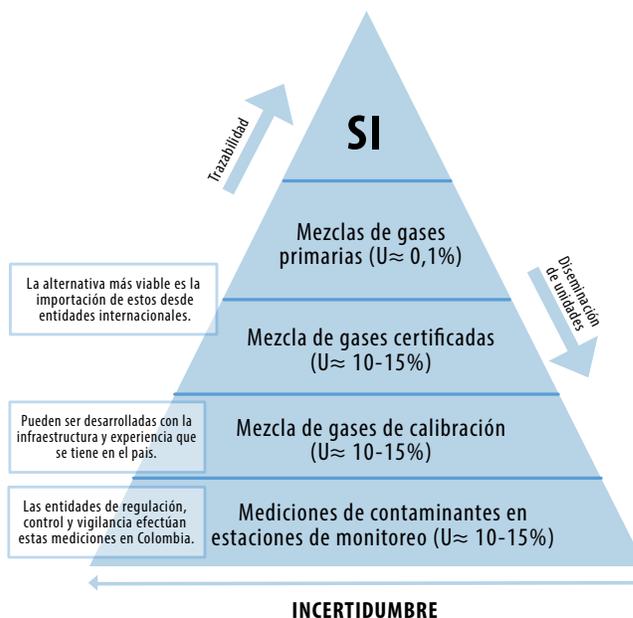
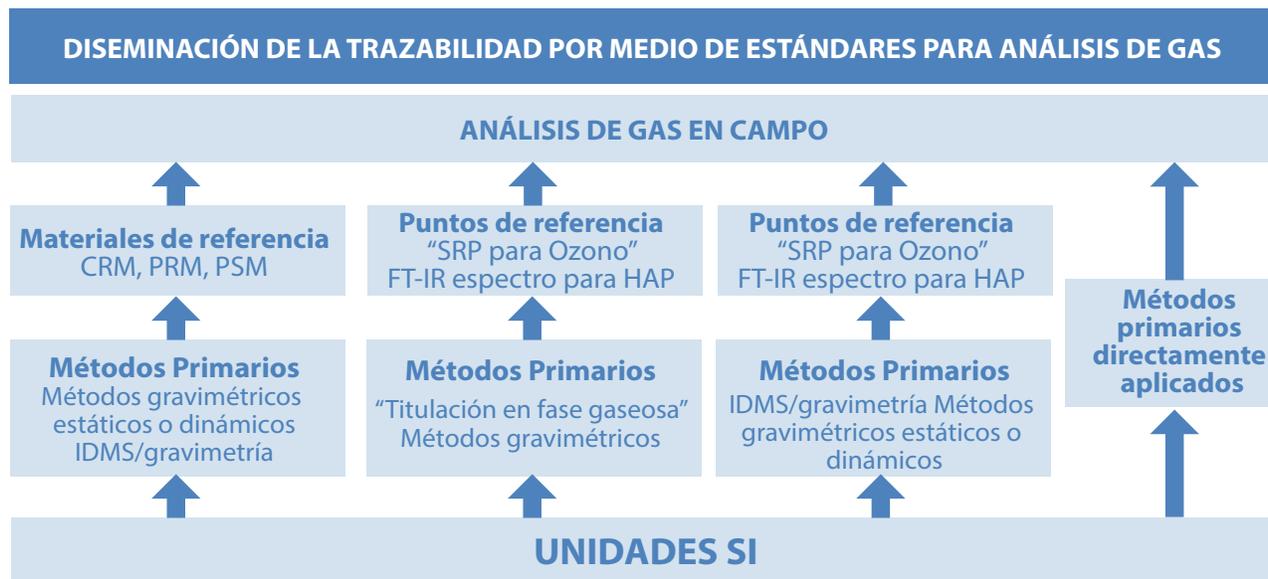


Figura 7. Jerarquía de trazabilidad y su relación con los recursos disponibles en Colombia

Actualmente, Colombia cuenta con una completa normatividad legal que establece los límites de calidad de aire (Res. 601 de 2006 y Res. 610 de 2010) y los límites permisibles de emisiones de fuentes fijas (Res. 909 de 2008 y Res. 1309 de 2010) y de fuentes móviles (Res. 910 de 2008), más una red de



CRM = Material de Referencia Certificado, PRM = Material de Referencia Primario, PSM = Mezcla Estándar Primaria
 IDMS = Espectroscopia de masas por dilución isotópica, SRP = Fotómetro de referencia estándar, HAP = Contaminante peligroso del aire

IRMM = Institute for Reference Materials and Measurements, BIPM = Bureau International des Poids et Mesures,
 FT-IR = Espectroscopia infraroja por transformada de Fourier

Figura 8. Diseminación de la trazabilidad por medio de estándares para análisis de gas

sistemas de vigilancia de la calidad de aire (SISAIRE), y una red de laboratorios y centros de diagnóstico automotor acreditados.

A pesar de los avances logrados por el Sistema Nacional de Metrología, el país no cuenta aún con las capacidades tecnológicas y científicas para brindar trazabilidad metrológica a las mediciones de estos contaminantes, en los intervalos de concentración e incertidumbres requeridas.

Como resultado del presente estudio, se recomienda a las entidades del SNCTI, laboratorios acreditados, Instituto Nacional de Metrología y entidades de Control y Monitoreo, emprender los estudios y esfuerzos de I+D+i necesarios, que le permitan al país en el corto plazo contar con trazabilidad en las mediciones de:

- Material Particulado (PM)
- Dióxido de Azufre (SO₂)
- Dióxido de Nitrógeno (NO₂)
- Monóxido de carbono (CO)
- Hidrocarburos totales (HCT)

Estos contaminantes registran las mayores excedencias en los sistemas de vigilancia de la calidad de aire (como el CO y el PM) en las ciudades, o son especialmente peligrosos (como el SO₂ y NO₂), o son precursores de otros contaminantes (como los Hidrocarburos totales). Además, tienen la mayor oferta de servicios de muestreo y/o análisis, y por lo tanto, una mayor demanda de servicios de calibración.

Debido a que estos gases son monitoreados en diferentes aplicaciones, cada una de éstas establece requerimientos particulares en cuanto a concentración. Por ejemplo, el CO es monitoreado en los ámbitos de (1) control de calidad de aire, y (2) de control de emisiones de fuentes móviles. Sin embargo, las concentraciones requeridas varían notablemente, desde 8-40ppm para los SVCA, hasta 10000-50000ppm (1-5%) para los sistemas de diagnóstico de emisiones

vehiculares. Por lo tanto las tecnologías para la obtención (y verificación) de los gases de referencia, sus diluciones y su proceso de aseguramiento y control de calidad deben escogerse e implementarse cuidadosamente dependiendo de la aplicación.

La segunda parte de este informe presentará los métodos de referencia (y equivalentes) y tecnologías de medición aplicables en cada ámbito de aplicación, y la tercera parte presentará la propuesta de trazabilidad y sus requerimientos tecnológicos.

8. REFERENCIAS

- [1] REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. *Resolución 909 de 2008. "Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones"*
- [2] REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. *Resolución 910 de 2008. "Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones"*.
- [3] REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. *Resolución 610 de 2010. "Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia."*
- [4] REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. *Resolución 760 de 2008. "Por la cual se adopta el Proto-*

colo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas”.

- [5] REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 650 de 2010. *“Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire”*
- [6] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES -IDEAM. Listado de Laboratorios acreditados por el IDEAM, bajo los lineamientos de la norma NTC-ISO/IEC 17025, y según lo estipulado en el Decreto 1600 de 1994 y la Resolución No. 0176 del 31 de octubre de 2003. [En línea] Disponible en <http://institucional.ideam.gov.co/>
- [7] ORGANISMO NACIONAL DE ACREDITACIÓN DE COLOMBIA -ONAC. Directorio Ofical de Acreditaciones - Listado de Centros de Diagnóstico Automotor Acreditados. [En Internet] Disponible en <http://www.onac.org.co/>
- [8] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES -IDEAM. Sitio web del Subsistema de Información sobre Calidad de Aire - SISAIRE. Listado de Redes y Estaciones [En Internet] Disponible en <http://www.sisaire.gov.co:8080/faces/redesEstaciones/redesEstaciones.jsp>
- [9] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS ICONTEC. NTC/ISO/IEC 17025 *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. 2005*
- [10] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. Estado de la Calidad del Aire en Colombia. 2007-2010 ISBN.978-958-8067-56-8. Bogotá, 2012. [En Internet] Disponible en <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/022433/CALIDADDELAI-REWEB.pdf>
- [11] INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER -IARC. Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Press release No. 221. Octubre de 2013. [En Internet]. Disponible en: http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/pr221_E.pdf
- [12] WORLD HEALTH ORGANIZATION -WHO. Regional Office for Europe. Review of evidence on health aspects of air pollution -REVIHAAP Project. First Results. 2013. [En Internet] Disponible en: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0020/182432/e96762-final.pdf
- [13] WORLD HEALTH ORGANIZATION -WHO. Nota descriptiva N° 313 Calidad del aire y salud. 2011. [En Internet] Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- [14] THE WORLD BANK. SUSTAINABLE DEVELOPMENT DEPARTMENT LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN REGION - COLOMBIA AND MEXICO COUNTRY MANAGEMENT UNIT. Colombia: Strengthening Environmental and Natural Resources Institutions. Study2: Environmental Health in Colombia: An Economic Assessment of Health Effects. 2012.
- [15] NATIONAL AIR QUALITY REFERENCE LABORATORIES AND THE EUROPEAN NETWORK-AQUILA. Roles and Requirements for Measurement Traceability, Accreditation, Quality Assurance/ Quality Control, and Measurement Comparisons, at National and European Levels.2009.

- [16] KOELLIKER Delgado, Jorge. La calidad del aire y su relación con la metrología. Centro Nacional de Metrología. CENAM 2011.
- [17] ISO 6145-1, Gas Analysis - Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods - Part 1: Methods of calibration.
- [18] NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-035-SEMARNAT-1993. Métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
- [19] EEA Report No 4/2012. Air quality in Europe – 2012 Report. ISSN 1725-9177 Disponible en <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2012>.
- [20] ESPINOSA Rubio, Matilde. Manuales de monitoreo atmosférico. 2007.
- [21] BAYARRI Miró, José V. Gestión Integral de la Contaminación, “Gestión en la atmósfera”.
- [22] ISO 14111 - Guidelines to traceability in analysis
- [23] Ph. QUEVAUVILLER. O.F.X. Donard. Stated References for ensuring traceability of chemical measurements for long-term environmental monitoring. Francia 2001.
- [24] ISO GUIDE 35 - Reference Materials—General and statistical principles for certification.
- [25] Dr. DE BIÈVRE, Paul; Dr. Günzler Helmut. Traceability in Chemical Measurement. 2005
- [26] P. FISICARO, R. Champion, G. Labarraque, B. Lalere, T. Mace, C. Sutour. Strategies implemented at LNE to establish the traceability of environmental measurements.
- [27] RICHTER Wolfgang, Gettler Bernd. A national traceability system for chemical measurements. 2003.
- [28] KORC ME, Farías F, Cevala R. El proceso de fijación y revisión de normas de calidad del aire. Lima: CEPIS; 2000. (CEPIS)