



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE QUÍMICA.

"DISEÑO Y OPERACIÓN DE UN SIMULADOR PARA LA EVALUACIÓN  
DE PARTÍCULAS EN UN DUCTO".

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUIMICO.

P R E S E N T A

PEDRO HERNÁNDEZ NIETO.



MÉXICO, D.F.

2007.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Jurado Asignado:**

Presidente	Prof. Josefina Elizalde Torres.
Vocal	Prof. Rodolfo Torres Barrera.
Secretario	Prof. Humberto Bravo Álvarez.
1er. Suplente	Prof. Juana Judith Chávez.
2°.Suplente	Prof. Alfonso Duran Moreno.

Sitio donde se desarrolló el tema:

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM.  
SECCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTA.

Nombre completo y firma del asesor del tema.

**Dr. Humberto Bravo Álvarez.**

---

Nombre completo y firma del supervisor técnico.

**Dr. Rodolfo Sosa Echeverría.**

---

Nombre completo y firma del sustentante.

**Pedro Hernández Nieto.**

---

*A veces pienso que tenemos la suerte de vivir en un planeta que es un paraíso, y a veces también pienso que es un horror el hecho de que este pequeño paraíso está en medio de un océano inmenso donde no hay nada de nada y todo está vacío.*

*Eduard Punset.*

## AGRADECIMIENTOS

*Al Dr. Humberto Bravo Álvarez, Jefe de la Sección de Contaminación Ambiental (SCA) del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, por su apoyo total en la realización de este trabajo de Tesis.*

*Le agradezco de manera muy especial al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría por todo el apoyo, tiempo y trabajo dedicados, sin los cuales hubiera sido imposible terminar este trabajo. También aprecio mucho sus enseñanzas y experiencia que amablemente compartió conmigo.*

*Al personal de la Sección de contaminación Ambiental (SCA): Dr. Rogelio Soto Ayala, Biólogo. Pablo Sánchez y Roberto Galicia, por el apoyo incondicional en la realización de este trabajo.*

*Mi más sincero agradecimiento a los ingenieros en electrónica Wilfredo Gutiérrez López Manuel García Espinoza y Jorge Escalante González por el apoyo brindado en el ensamble del equipo.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México quien medio todo a manos llenas y de quien siempre pondré su nombre en alto.*

*A todos los profesores de la Facultad de Química por transmitirnos sus conocimientos y ética profesional.*

### ***A los Sinodales:***

*Dra. Josefina Elizalde Torres.*

*Prof. Rodolfo Torres Barrera.*

*Dr. Humberto Bravo Álvarez.*

*Prof. Juana Judith Chávez.*

*Dr. Alfonso Duran Moreno.*

*Por la revisión y sugerencias que hicieron a este trabajo.*

*A mis amigos y compañeros de la Sección de Contaminación Ambiental, que hicieron tangible esta tesis.*

*A la Química Ana Luisa Alarcón J, Gabriela Domínguez, Elizabet Cruz, Jorge David Santacruz, Vicente Hernández, Juan Marín, Jorge García.*

## DEDICATORIA

*A mi madre, quien ha estado conmigo en todo momento y a quien le debo mucho más que la vida.*

*A mi padre por ser siempre mi apoyo incondicional. No tengo palabras para agradecerle la paciencia y el sacrificio.*

*A mis hermanos por todo el apoyo moral, incondicional y su solidaridad para poder alcanzar esta meta.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y en particular a la Facultad de Química, por haberme otorgado la oportunidad de ejercer una profesión.*

*Adios, por darme la oportunidad de haber llegado hasta aquí, por poner en mi camino a las personas indicadas y por darme la oportunidad de vivir cosas magníficas.*

*“Finalmente me gustaría reiterar que los ideales se pueden hacer realidad con base en el esfuerzo y persistencia que se forja cada uno de nosotros.*

## TABLA DE CONTENIDO

*i. Lista de Figuras.*

*ii. Lista de Tablas.*

<b>RESUMEN EJECUTIVO</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	2
<b>META Y OBJETIVOS</b> .....	6
<b>ANTECEDENTES</b> .....	8

### **CAPITULO I ..... 15**

#### GENERALIDADES

1.1 Contaminación Atmosférica .....	16
1.2 Partículas.....	16
1.3 Características y Procesos de Formación. ....	18
1.4 Tamaño de Partículas. ....	18
1.4.1 Moda de Nucleación ó Aitken. ....	20
1.4.2 Moda de Acumulación.....	21
1.4.3 Moda Gruesa.....	22
1.5 Procesos de Formación de Partículas. ....	23
1.5.1 Condensación. ....	24
1.5.2 Nucleación.....	24
1.5.3 Coagulación. ....	25
1.5.4 Contaminantes Primarios.....	25
1.5.5 Contaminantes Secundarios. ....	25
1.6 Vida Media de las Partículas.....	27
1.7 Clasificación de las Fuentes de Emisión.....	28
1.8 Factores que afectan la Concentración de los Contaminantes en la Atmósfera. ....	30
1.9 Características Físicas y Químicas de las Partículas Atmosféricas. ....	31
1.9.1 Tiempo de Sedimentación. ....	31
1.9.2 Forma. ....	31
1.9.3 Superficie y Volumen. ....	32
1.10 Efectos producidos por la presencia de Partículas en la Atmósfera. ....	32
1.10.1 Visibilidad. ....	32
1.10.2 Efectos en la Salud. ....	33
1.10.3 Efectos sobre el Clima. ....	35
1.10.4 Efectos en Ecosistemas y otros Materiales. ....	36

### **CAPITULO II ..... 38**

#### **MARCO REGULATORIO EN MEXICO Y EN ESTADOS UNIDOS APLICABLE PARA LA MEDICIÓN DE PARTICULAS EN FUENTES FIJAS.**

2.1 Marco Regulatorio en México. ....	40
2.1.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.....	41
2.1.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.....	41
2.1.3 Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera (Publicado en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 25 de Noviembre de 1998)....	42
2.1.4 Normas Oficiales Mexicanas Vigentes para Contaminantes Atmosféricos (NOM). ....	44
2.1.5 Normas Técnicas Mexicanas (NMX).....	46
2.2 Marco Regulatorio en Estados Unidos. ....	47

<b>CAPITULO III</b> .....	<b>54</b>
<b>MEDICION DE EMISIONES.</b>	
3.1 Monitoreo Atmosférico .....	55
3.2 Medición de Emisiones Contaminantes en Fuente .....	55
3.2.1 Muestreo Manual .....	56
3.2.2 Monitoreos Continuos .....	57
3.2.2.1 Sistemas extractivos .....	57
3.2.2.2 Sistemas In situ .....	58
3.3 Muestreo de emisiones contaminantes en fuentes fijas (Chimenea) .....	59
3.3.1 Método 1: Localización de los puertos y puntos de muestreo .....	61
3.3.3.1 Localización del sitio de medición adecuado .....	61
3.3.3.2 Condiciones del sitio de medición .....	62
3.3.3.3 Requisitos técnicos de medición .....	62
3.3.3.3.1 Plataformas de Trabajo .....	63
3.3.3.3.2 Determinación de los puertos de muestreo y puntos de medición en el ducto .....	63
3.3.2 Método 2: Procedimiento para la determinación de la velocidad y flujo volumétrico de los gases de salida de chimeneas o ductos (tubo pitot tipo "S") .....	67
3.3.3 Método 3: Procedimiento para la determinación de la masa molecular seco de los gases de escape .....	71
3.3.4 Método 4: Procedimiento para la determinación de contenido de humedad de los gases de la chimenea .....	74
3.3.5 Método 5: Procedimiento para la determinación de emisiones de Partículas en Fuentes Fijas .....	77
 <b>CAPITULO IV</b> .....	 <b>82</b>
<b>APARATOS, INSTRUMENTOS Y EQUIPOS</b>	
4.1 Descripción del sistema de muestreo isocinético .....	83
4.2 Tren de Muestreo .....	83
4.2.1 Boquillas .....	84
4.2.1.1 Selección del diámetro de la boquilla de muestreo .....	84
4.2.2 Sondas de Muestreo .....	86
4.2.3 Medios de Colección .....	87
4.2.3.1 Colectores en vía seca .....	87
4.2.3.2 Colectores en vía húmeda (Contenedores) .....	88
4.2.3.3 Trampas de Hielo .....	89
4.2.4 Medios de succión o desplazamiento del gas .....	90
4.2.4.1 Cordón umbilical .....	90
4.2.5 Instrumentos asociados al muestreo .....	90
4.2.5.1 Medidores de flujo .....	90
4.2.5.2 Placas de orificio .....	90
4.2.5.3 Rotámetros .....	91
4.2.5.4 Medidor de gas seco .....	92
4.2.5.5 Medidores de temperatura .....	93
4.2.5.6 Medidores de presión .....	94
4.2.5.7 Medidores de velocidad .....	94
4.2.6 Material y sustancias de laboratorio para la recolección de la muestra .....	97
 <b>CAPITULO V</b> .....	 <b>99</b>
<b>METODOLOGIA DE MUESTREO Y ANÁLISIS.</b>	
5.1 Muestra Representativa .....	100
5.2 Verificación preliminar de las infiltraciones .....	101
5.3 Procedimientos para realizar la prueba de infiltración .....	102
5.4 Prueba de las Infiltraciones durante la corrida de muestreo .....	102
5.5 Prueba de las Infiltraciones al término del muestreo .....	103
5.6 Muestreo Definitivo .....	103
5.7 Colección de la Muestra .....	103



<b>CAPITULO VI</b> .....	<b>105</b>
<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL.</b>	
6.1 Descripción Experimental de la Chimenea.....	106
6.2. Montaje del Sistema (chimenea).....	107
<b>CAPITULO VII</b> .....	<b>109</b>
<b>RESULTADOS</b>	
Datos de Campo .....	110
Memorias de Calculo .....	114
Muestreo Definitivo: .....	114
Diámetro del ducto: .....	114
Determinación del Diámetro de la boquilla. ....	115
Tiempo de Muestreo: .....	115
Peso final obtenido por burbujeadores .....	115
a) Cálculo del Volumen de Gas Muestreado [Vm].....	115
Cálculo del Volumen de Gas Muestreado a Condiciones Normales [Vm(std)]......	115
Volumen de la Muestra Corregido a Condiciones Estándar, [Vw (std)] .....	116
b) Contenido de Húmeda Presente en los Gases, [Bws] .....	116
Porcentaje de Humedad =100xBws .....	117
Base Seca, [Mfd].....	117
c) Peso Molecular de los Gases Base Seca (Md) y Base Húmeda (Ms) .....	117
Peso Molecular Base Húmeda, [Ms]. ....	117
d) Cálculo para Determinar la Velocidad Promedio de la Corriente de Gases, [Vs] .....	117
e) Flujo Volumétrico, (Qa).....	118
Flujo Volumétrico a condiciones normales, [Qs].....	119
Flujo Volumétrico a Condiciones Estándar, [Qsd] .....	119
f) Cálculo para Determinar Diámetro Estimado de la Boquilla de la Sonda, [Dn(est)] .....	119
g) Cálculo de la constante Isocinética ["K"]. .....	121
h) Porcentaje de variación de Isocinétismo, [I] .....	121
i) Concentración de las Partículas a Condiciones Estándar, [C's] .....	122
Concentración de las Partículas a Condiciones de la Chimenea, [Cs] .....	123
j) Emisión de Partículas, [E].....	123
<b>CAPITULO VIII</b> .....	<b>124</b>
DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES. ....	125
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>127</b>
<b>ANEXO (COMPENDIO DE FOTOGRAFIAS)</b> .....	<b>132</b>

***i. Lista de Figuras***

<b>Figura No.</b>		<b>Página</b>
1.	Variación de la temperatura con la altura en la atmósfera .....	10
2.	Procesos que pueden sobrellevar las partículas en la atmósfera .....	17
3.	Mecanismos de formación de las partículas en función del diámetro .....	19
4.	Partícula irregular y sus esferas equivalentes.....	20
5.	Esquema de la distribución de los diferentes tamaños de partículas y de sus principales procesos de formación y eliminación.....	21
6.	Distribución granulométrica de las partículas atmosféricas en función del número de partículas, superficie y la masa .....	23
7.	Procesos de las partículas de los aerosoles .....	26
8.	Mecanismos principales y características de los Aerosoles .....	27
9.	Diferentes formas de las partículas .....	31
10.	Interacción de energía electromagnética visible con un cuerpo .....	33
11.	Representación esquemática de las diversas regiones del aparato respiratorio humano .....	35
12.	Interacción entre las partículas atmosféricas y el clima, considerando la influencia del factor antropogénico .....	36
13.	Representación esquemática de las condiciones óptimas de una chimenea para su muestreo.....	55
14.	Esquema típico de un muestreo manual .....	56
15.	Esquema típico de un muestreo continuo .....	57
16.	Representación esquemática de las tres formas que se pueden realizar un muestreo, (superisocinético, subisocinético y isocinético) .....	60
17.	Representación esquemática de los puntos transversales .....	61
18.	Visualización de los diámetros equivalentes de la chimenea de las perturbaciones de flujo.....	62
19.	Dimensiones y espacio de una plataforma.....	63

20.	Representación de cómo seleccionar los puntos de muestreo por el método del centróide en la sección transversal de la chimenea.....	64
21.	Localización de los puntos de muestreo en secciones rectangulares .....	64
22.	Número mínimo de puntos transversales.....	65
23.	Representación esquemática del Método 2 de la EPA.....	67
24.	Tubos Pitot.....	68
25.	Representación esquemática de las mediciones de las presiones absoluta (Ps), estática (Pe) y la de velocidad ( $\Delta P$ ).....	69
26.	Representación esquemática del Método 3 de la EPA.....	71
27.	Analizador Bacharach 300 NSX .....	72
28.	Aparato Orsat para analizar gases de combustión .....	73
29.	Representación esquemática del Método 4 de la EPA.....	74
30.	Representación esquemática del Método 5 de la EPA.....	77
31.	Diagrama del proceso de muestreo de gases en fuentes fijas .....	78
32.	Representación esquemática de un muestreo isocinético .....	79
33.	Tren de muestreo típico para monitoreo de partículas.....	84
34.	Boquillas típicas de muestreo.....	86
35.	Diseños típicos de sondas.....	87
36.	Tipos de contenedores comúnmente utilizados en un muestreo de partículas .....	89
37.	Diferentes tipos de placas de orificio.....	91
38.	Esquema de un rotámetro típico .....	92
39.	Medidor de gas seco de desplazamiento positivo.....	93
40.	Tubo pitot estándar de nariz elipsoidal y hemisférica .....	95
41.	Tubo Pitot Tipo "S".....	96
42.	Sistema de medición de la presión velocidad con el tubo pitot tipo "S" .....	96
43.	Dimensiones del tubo pitot tipo "S" .....	97
44.	Esquema de cómo se debe realizar una prueba de infiltración .....	102
45.	Representación esquemática del simulador de partículas.....	107

**ii. Lista de Tablas**

<b>Tabla No.</b>		<b>Página</b>
1.	Grandes ciudades a nivel mundial que presentan problemas de calidad del aire por diversos contaminantes .....	11
2.	Contaminantes por fuentes naturales.....	29
3.	Fuentes de contaminación atmosférica.....	30
4.	Efectos observados de las partículas.....	37
5.	Estándares de calidad del aire de PM <sub>2.5</sub> para algunos países y ciudades de América y Europa.....	41
6.	Normas Oficiales Mexicanas de contaminantes criterio.....	42
7.	Normas de protección a la salud de la población por partículas suspendidas .....	44
8.	Normas de protección a la salud de la población.....	44
9.	Normas de emisión de otros contaminantes a la atmósfera .....	44
10.	Normas de emisión en función del tipo de fuente .....	46
11.	Norma Oficial Mexicana referente al monitoreo ambiental .....	46
12.	Normas Técnicas Mexicanas Vigentes para la Contaminación Atmosférica.....	46
13.	Estándares Nacionales de E.U.A. (EPA) de Calidad Aire (NAAQS).....	49
14.	Diagrama de los métodos complementarios para poder utilizar el Método 5 de la EPA.....	50
15.	Distribución de puntos de medición para una chimenea o conducto de sección rectangular.....	66
16.	Ubicación de los puntos de medición en chimeneas o ductos de sección circular .....	66
17.	Clasificación de los medidores de temperatura.....	94

## RESUMEN EJECUTIVO.

La importancia de estudiar la contaminación atmosférica por partículas es por los efectos, como la alteración de la composición natural de la atmósfera como consecuencia de la entrada en suspensión de partículas, ya sean por causas naturales o antropogénicas. La presencia de las partículas en la atmósfera, así como su posterior deposición, puede generar efectos nocivos para la salud de la población.

En la actualidad el estudio de la contaminación atmosférica por partículas es de gran importancia, así como su evaluación en las industrias que las generan, ya que lo requiere la normatividad ambiental vigente.

La contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se hizo evidente desde la década de los años sesenta y ha alcanzado en la actualidad dimensiones considerables, estando bien documentado que nuestra ciudad sufre problemas críticos de contaminación atmosférica tanto por contaminantes gaseosos como aerosoles y partículas que son emitidas y formadas en la atmósfera. Lo anterior también es importante sobre todo en las zonas consideradas críticas.

Con el propósito de vigilar el cumplimiento de la legislación ambiental en cuanto a las emisiones, seleccionar y evaluar la eficiencia de los equipos de control, entre otros, es necesario realizar una correcta evaluación de las emisiones a la atmósfera.

Esta metodología consistió fundamentalmente en evaluar isocinéticamente en una corriente gaseosa de una chimenea a nivel laboratorio a condiciones de temperatura, velocidad y presión similares de los gases en la chimenea. Fueron determinadas mediante una evaluación preliminar para llevar a cabo los ajustes correspondientes en el equipo de monitoreo antes de proceder al muestreo definitivo.

El propósito de este trabajo fue crear la infraestructura a nivel piloto para que el personal de docencia del Centro de Ciencias de la Atmósfera y cualquier otra institución que deseen realizar prácticas de muestreo isocinético en ductos ó chimeneas, puedan determinar las emisiones contaminantes, además también fue posible medir cada uno de los siguientes parámetro estipulados para este tipo de muestreo como son.

- a).-Definir los puertos y puntos de muestreo requeridos.
- a).-Determinar la velocidad promedio y el gasto volumétrico de la corriente de gas del ducto.
- b).-Medir la Temperatura absoluta del gas en el ducto.
- c).-Medir la Presión absoluta en la chimenea.
- d).-Determinar el peso molecular húmedo del gas en el ducto.
- e).-Determinar gravimétricamente y volumétricamente el agua colectada por los burbujeadores.
- f).-Determinar la concentración y las emisiones de los contaminantes.

Dicho propósito se cumplió con total éxito como así lo demuestran los resultados obtenidos, conforme lo estipulan las normas correspondientes para este tipo de trabajo sobre monitoreo en fuente (NMX-AA-009-SCFI-1993, NMX-AA-010-SCFI-2001 y el Método 5 de la EPA).

Lográndose en la practica un isocinétismo del 93%, edemas de existir reproducibilidad en los muestreos.

## INTRODUCCIÓN

La política ambiental debe tener como meta proteger al hombre y al medio ambiente de los riesgos que los amenazan y conservar los recursos naturales y la energía. Esto debería hacerse de una manera costo-efectiva, proporcionando la oportunidad a todas las partes, afectadas e interesadas, de participar en la selección de las opciones de política ambiental. Una vez que se ha seleccionado el camino a seguir convendría dejar el mayor margen de maniobra posible a los participantes que deberán cumplir con los requisitos establecidos en la propia política. La prevención de emisiones y/o transferencias de sustancias químicas potencialmente peligrosas al medio ambiente, puede ser benéfica para todas las partes. El público se beneficia adquiriendo la protección ambiental, mientras que la industria puede beneficiarse mediante el uso más eficiente de los recursos naturales.

En la actualidad, los gobiernos en todo el mundo buscan alcanzar el desarrollo sustentable; esto es, el progreso económico y social conjugado con la protección del medio ambiente. Para estos fines, es esencial la reducción de las emisiones/transferencias de contaminantes, así como la disminución del consumo de recursos naturales y energía por unidad de producción. Los gobiernos están buscando reducir el despilfarro y prevenir tanto la contaminación en la fuente como aplicar principios básicos de política ambiental. Con el objeto de establecer y operar apropiadamente las políticas ambientales en el siglo XXI, los gobiernos deben conocer el estado actual de su medio ambiente nacional y contar con medios consistentes y confiables para medir los cambios que en él se producen.

A tal efecto, muchos gobiernos reúnen información sobre diversas emisiones a los diferentes medios como suelo, aire y agua, así como datos sobre las transferencias de sustancias fuera de los sitios de producción para fines de tratamiento o disposición. Con frecuencia, estos datos son recopilados por múltiples agencias, cada una con programas y proyectos específicos para su utilización. Estas agencias pueden obtener información similar que podría ser recolectada de manera más eficiente en un formato único de reporte. No es desconocida la duplicación de información, por ejemplo, de la derivada de una recopilación de datos para propósitos locales primero y posteriormente utilizado para propósitos nacionales. Existe, con frecuencia, poca coordinación entre los recolectores de información cuando se hacen propuestas de políticas específicas. Además, puede ser que el acceso del público a la información sea limitado o nulo.

La eficiencia de las políticas ambientales está también subordinada a un conocimiento suficiente de los contaminantes. Contar solamente con una parte de la información necesaria deja al gobierno mal preparado para establecer programas claros y competentes. Dentro del tipo de datos necesarios para tener un mayor entendimiento del impacto de las emisiones se encuentran: la identificación de los contaminantes, las cantidades emitidas, los riesgos potenciales involucrados y las fuentes de estas sustancias y en particular su localización exacta. Los gobiernos también deben considerar la manera en la que estos factores pueden variar con el tiempo, lo que hace necesario que esta información se obtenga constante y periódicamente.

Desde la antigüedad la ingeniería se ha orientado ampliamente a cumplir intereses y necesidades de la sociedad. Esta responsabilidad se ha encauzado también a la protección de la salud humana y del medio ambiente. A partir de este interés desarrollado en los últimos años por tratar de estudiar, conocer, medir, evaluar, minimizar y controlar las emisiones de contaminantes atmosféricos, especialmente en las grandes ciudades, debido a los problemas originados en la salud de la población, se han diseñado diferentes criterios para su evaluación, así como desarrollado diversas técnicas de monitoreo para definir las estrategias de control pertinentes, ya sean definidas a corto, mediano o largo plazo considerando factores políticos, sociales y económicos además de los naturales.

La Ciudad de México no es la excepción, y más aún considerando sus grandes inmediaciones, mismas que se ubican en el mismo plano geográfico, denominado como la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). En esta región están establecidas más de 20 millones de habitantes, que originan el movimiento de 3.5 millones de vehículos y 35000 industrias que consumen diariamente 40 millones de litros de combustible. Sumando a lo anterior, las características de altitud de la ZMCM origina que una atmósfera en esta zona presente en 23% en volumen menos de oxígeno que al nivel del mar; esto propicia una mayor inhalación respiratoria por el ser humano obtenga la dosis de oxígeno adecuada para su funcionamiento. Esto implica respirar mayores cantidades de aire contaminado, originados como consecuencia de actividades antropogénicas (Garza, 1996). El mismo fenómeno ocurre con los motores de combustión interna (Beaton, 1992).

En las grandes ciudades que aún no aplican un buen control de sus fuentes de emisión, la contaminación atmosférica ha sido un problema creciente que deteriora la calidad del aire que respiramos. Dicho deterioro se manifiesta ocasionando múltiples problemas respiratorios agudos y crónicos, debido primordialmente a que uno de los contaminantes más frecuentemente encontrados son las denominadas partículas (Partículas Suspendidas Totales,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) (Sepúlveda JD, et. al. 2004).

El crecimiento global de la población, la urbanización, la rápida industrialización, y la destrucción de los recursos naturales de nuestro planeta, han incrementado seriamente la preocupación por el estudio del impacto de las actividades humanas en la composición química de la atmósfera, dada su repercusión en la salud de la población y en el funcionamiento de los ecosistemas.

Existe una mayor conciencia a nivel nacional e internacional, de que el manejo del ambiente urbano requiere de especial atención. El ambiente urbano es donde una gran proporción de la población mundial reside, donde la mayor parte de la energía es consumida, y donde el impacto de la contaminación es más fuerte. En vista de que los trabajadores emigran de las áreas rurales a las ciudades buscando una mejor calidad de vida, las poblaciones urbanas están creciendo más rápido que los promedios nacionales; aumentando así, el establecimiento de unidades habitacionales muchas veces no adecuadas, el desarrollo de infraestructura y contribuyendo a los problemas ambientales severos.

La mala calidad del aire en muchas áreas urbanas, es el resultado tanto de las elevadas emisiones atmosféricas, como de las desfavorables condiciones meteorológicas, y del estancamiento del aire, lo cual tiende a restringir la dispersión de contaminantes una vez emitidos a la atmósfera. Las fuentes de contaminantes incluyen emisiones de combustibles fósiles procedentes de vehículos de motor y de procesos industriales, de plantas generadoras de energía y de uso doméstico, así como elevados niveles de partículas provenientes de construcciones locales, caminos sin pavimentar y transporte a grandes distancias desde terrenos áridos que se encuentran en los alrededores. En los últimos tiempos, los problemas de contaminación en las ciudades, han sido causados principalmente por contaminantes primarios, tales como  $CO$ ,  $SO_2$  y por los aerosoles. En resumen, los problemas asociados con el desmedido crecimiento urbano, como el tráfico vehicular, están agravando la contaminación del aire en todo el mundo.

En la República Mexicana, no obstante que la actividad industrial no ha alcanzado la magnitud de los países desarrollados, sin embargo este desarrollo también ha ocasionado problemas de contaminación atmosférica.

Todos los países industrializados, y un creciente número de países en vías de desarrollo, han elaborado normas que controlan y limitan las emisiones provenientes de sus industrias y



otras actividades. El monitoreo de emisiones y la verificación de que cumplan con las normas de emisiones nacionales resulta de gran importancia.

Sin embargo, a pesar de estas y otras peculiaridades de la ZMCM, ya las normas vigentes de calidad del aire aprobadas en 1994, los valores máximos permisibles de concentración de contaminantes se establecieron tomando en cuenta los criterios y estándares adoptados en otros países del mundo y recientemente se empiezan a realizar estudios epidemiológicos para conocer la relación dosis y respuesta de los diferentes contaminantes y la salud de la población de la ZMCM.

**META Y OBJETIVOS**

## **META.**

Diseñar y poner en operación un laboratorio piloto para determinar las emisiones de partículas, a través de un ducto.

## **OBJETIVOS.**

- Diseñar, Montar y Poner en Operación el Simulador de Emisiones de Partículas Contaminantes de acuerdo a las Normas Mexicanas y a los Métodos de EPA.
- Calcular y localizar los puertos y puntos de muestreo a lo largo de la sección transversal del ducto, de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-009-SCFI-1993, que establece la determinación de flujo de gases en un conducto por medio de tubo de pitot y el Método 1 de la EPA: Localización de los puntos de muestreo.
- Determinar los principales parámetros de muestreo que caracterizan un monitoreo en fuente.
- Determinar y calcular el flujo volumétrico de la corriente gaseosa en el ducto a la atmósfera por el Método 2 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA).
- Obtener las concentraciones de las partículas emitidas ( $mg / m^3$ ).
- Determinar las emisiones de partículas en fuentes fijas.
- Evaluar la precisión de la metodología de muestreo y análisis.

**ANTECEDENTES**

## Antecedentes.

La **atmósfera** es una capa gaseosa de aproximadamente 10.000 km de espesor que rodea la litosfera e hidrosfera. Está compuesta de gases y de partículas sólidas y líquidas en suspensión atraídas por la gravedad terrestre. En ella se producen todos los fenómenos climáticos y meteorológicos que afectan al planeta, regula la entrada y salida de energía de la tierra y es el principal medio de transferencia del calor, (Manahan, 2000).

La atmósfera terrestre estándar está constituida principalmente por nitrógeno (78%) y oxígeno (21%). El 1% restante lo forman el argón (0,9%), el dióxido de carbono (0,03%), distintas proporciones de vapor de agua, y trazas de hidrógeno, ozono, metano, monóxido de carbono, helio, neón, kriptón y xenón. El aire troposférico también contiene vapor de agua, en cantidades que varían desde 0.01% en las regiones polares hasta 5% en los trópicos húmedos. Estos porcentajes se mantienen estables a través del tiempo, considerando que la atmósfera es un sistema dinámico, cuyos constituyentes gaseosos se encuentran en constante intercambio con la vegetación, los océanos y los organismos vivos, a través de los ciclos geológicos, que involucran un conjunto de procesos físicos, químicos y de actividad biológica (Miller, 1994; Seinfeld y Pandis, 1998).

La atmósfera no tiene un límite superior definido, pero a medida que la distancia desde la tierra aumenta, esta varía, es decir, la cantidad de gases que contiene, va disminuyendo. Se ha propuesto dividir a la atmósfera en cinco niveles diferentes, según sus características, de la siguiente forma:

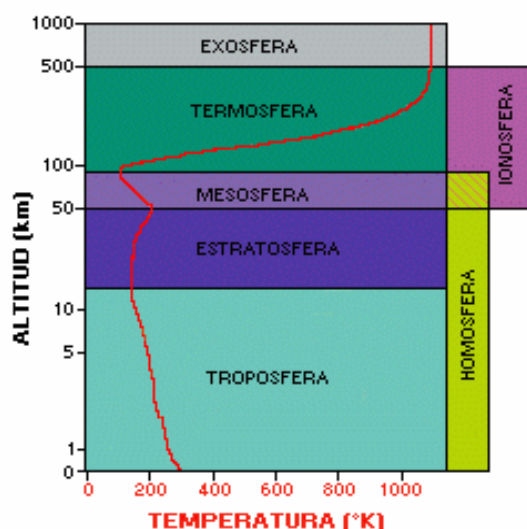
La capa inferior, que puede alcanzar una altura entre los 8 y 18 km, es conocida como la **tropósfera**. En ella se forman la mayoría de las nubes y ocurren gran parte de los fenómenos atmosféricos. Se caracteriza por un descenso gradual de la temperatura con el aumento de altura y por contener la mayoría del aire atmosférico. Su límite superior es conocido como tropopausa.

La capa siguiente es la **estratosfera**, que se extiende por encima del límite superior de la troposfera hasta los 50 km de altura. En su parte inferior, la temperatura varía muy poco y luego aumenta ligeramente hasta su límite superior, conocido como estratopausa. Prácticamente no se observan nubes en este nivel. En esta capa se encuentra la mayor cantidad de ozono, el cual forma una capa entre los 19 y 23 km, de vital importancia para la vida en nuestro planeta, pues actúa como un filtro de los rayos ultravioleta procedentes del sol, que son peligrosos para la salud humana, animal y vegetal.

Enseguida de la estratosfera y entre los 50 y 80 km de altitud se encuentra la **mesosfera**, capa en la que se produce un descenso regular de la temperatura hasta su límite superior o mesopausa. La atmósfera al nivel de la mesopausa tiene una temperatura menor que en cualquier otra capa atmosférica.

El nivel por encima de la mesopausa, llamado **termosfera**, es la región que se caracteriza por un aumento progresivo de la temperatura hasta cerca de los 400 o 500 km de altura.

Por último, encontramos la **exosfera**, la capa más exterior de la atmósfera, en la cual la cantidad de gases es mínima, comparada con las otras capas ver figura 1.



**Figura 1. Variación de la temperatura con la altitud en la atmósfera.**

Se considera un contaminante del aire aquel que altera los niveles de los gases considerados normales del aire, y contaminación cuando estas concentraciones exceden las normas de calidad del aire que puede afectar la salud humana y a los ecosistemas.

En la Ciudad de México esta situación se agrava debido a su ubicación geográfica y las condiciones meteorológicas que lo caracterizan, y a una falta de control adecuada en las emisiones que se generan en la ZMCM.

La ZMCM se encuentra en una cuenca localizada a 19°20' Latitud Norte y 99°05' Longitud Oeste, con una altitud de 2240 m sobre el nivel del mar (Bravo, et. al. 2002a), rodeada por montañas que restringe el transporte de contaminantes fuera de la cuenca, con abundante radiación solar (Fenn, et, al, 2002); y con inversiones térmicas que ocurren también durante la noche todo el año y con mayor frecuencia en la época seca fría (Noviembre a Marzo), en aproximadamente 25 días de cada mes de invierno. Los vientos predominantes soplan hacia el suroeste y sureste de la ciudad transportando hacia estas direcciones los contaminantes primarios emitidos por los productos secundarios (Bravo y Torres, 2002b; Klaus, et. al. 2001).

Como muchas grandes ciudades, especialmente aquellas localizadas en zonas poco ventiladas, y con un alto nivel de radiación solar, como la ZMCM sufre severos episodios de contaminación. Los niveles de contaminación actualmente presentan serios problemas de contaminación que continuamente rebasan las normas de calidad del aire, principalmente por ozono y partículas como producto de las actividades humanas y las condiciones topográficas y meteorológicas de la zona.

La contribución de la ciencia y la tecnología al desarrollo de los países para satisfacer las necesidades humanas han permitido el mejoramiento de la calidad de vida de los individuos pero también se han generado efectos adversos al ambiente que afectan a estas poblaciones y su entorno ecológico y social. Las ventajas que el ser humano ha obtenido con la aplicación de conocimientos científicos en la adquisición de satisfactores tienen un costo que se traduce en la contaminación o incorporación de factores que modifican el ambiente en el que se desarrolla. Estos factores, ajenos a la estructura y composición natural de la atmósfera, tienen efectos importantes tales como la presencia de concentraciones más altas de compuestos ya existentes en la naturaleza, la incorporación de compuestos creados por transformaciones químicas; los cambios físicos que se incorporan a las variaciones climáticas del planeta a nivel global y la generación de ruido; los cambios sociales como el establecimiento de políticas para prevenir y controlar la contaminación ambiental que

anteriormente no eran consideradas; así como cambios funcionales que han modificado el comportamiento del hombre.

A nivel mundial se presentan en las ciudades, grandes problemas de contaminación urbana que pueden afectar inclusive el entorno rural por el transporte de contaminantes hacia áreas con menor nivel de contaminación o consideradas como "limpias. Algunos ejemplos de megaciudades y los problemas de contaminación atmosférica que éstas deben enfrentar para mejorar la calidad del aire en su entorno se presentan en la Tabla 1, en donde muestra que el mayor problema de la contaminación atmosférica en estas ciudades es la presencia de ozono, dióxido de azufre y partículas, de acuerdo a los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization, WHO) que corresponden a 120 ppm en 8 horas para ozono, 125 ppm en 24 horas para dióxido de azufre y, con respecto a las partículas, se estima con base en efecto dosis-respuesta. Estos datos fueron obtenidos con el monitoreo de contaminantes tales como: dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), ozono (O<sub>3</sub>), plomo (Pb) y partículas suspendidas totales (PST). A este grupo de compuestos se les denomina contaminantes criterio (Wark, 2000), debido a que se cuenta con información científica obtenida a través de varios años y con revisiones periódicas por paneles de expertos en los que sustentan los efectos en la salud, los ecosistemas y los materiales sobre cada uno de los contaminantes.

**Tabla 1.** Grandes ciudades a nivel mundial que presentan problemas de calidad del aire por diversos contaminantes (Bravo y Torres, 2000).

Megaciudad	SO <sub>2</sub>	PST	Plomo	CO	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
Bangkok	♣	♣♣♣	♣♣	♣	♣	♣
Beijing	♣♣♣	♣♣♣	♣		♣	♣♣
Jakarta	♣	♣♣♣	♣♣	♣♣	♣	♣♣
Los Ángeles	♣	♣♣	♣	♣♣	♣♣	♣♣♣
Metro Manila	♣	♣♣♣	♣♣			
ZMCM	♣	♣♣♣	♣	♣	♣♣	♣♣♣
New York	♣	♣	♣	♣♣	♣	♣♣
Seoul	♣♣♣	♣♣♣	♣	♣	♣	♣
Shanghai	♣♣	♣♣♣				
Tokio	♣	♣		♣	♣	♣♣♣

\*\*\* Serios problemas: la guía se excede por más que un factor de 2.

\*\* Problemas moderados a pesados: excedencia de la guía WHO por arriba de un factor de 2; excedencia de la guía en periodos cortos.

\* Baja contaminación: La guía WHO puede ser excedida en periodos cortos ocasionalmente.

Desde la década de los años 1960,1970 y mediados de 1980 el principal problema de contaminación en la ZMCM fue dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y partículas suspendidas totales (PST); alcanzando en 1982 una concentración de PST arriba de 450 µg/m<sup>3</sup> promedio anual (la norma indica 260 µg/m<sup>3</sup> una vez al año); Para SO<sub>2</sub> (1984) en algunas áreas arriba de 110 µg/m<sup>3</sup> en un periodo de 24 horas y la concentración de plomo (1983) en algunos lugares mayor que 3 µg/m<sup>3</sup>/ promedio trimestral (la norma para cada uno de ellos es 341 µg/m<sup>3</sup> y 1.5 µg/m<sup>3</sup> respectivamente); mientras que el ozono pocas veces rebasó la norma de calidad del aire (0.11 µg/m<sup>3</sup> no debe exceder 1 h al día, un día del año indicado para la ZMCM que es un área propensa a tener problemas de ozono) (Bravo y Torres, 2000).

Cabe mencionar, que el muestreo de contaminantes tanto en la fuente de emisión como en el ambiente es una parte esencial de toda evaluación ambiental, ya que hacen posible interpretar adecuadamente los resultados analíticos; por lo expuesto, es imprescindible

realizarlo en forma correcta posible. Los resultados analíticos podrán ser sumamente exactos y precisos, pero carecerán de validez si el muestreo no se efectuó adecuadamente.

Un análisis completo en un ducto o chimenea requiere determinar la concentración y las características de cada contaminante(s) de interés, por lo cual es necesario determinar la velocidad del flujo de los gases en el ducto. La mayoría de las restricciones legales requieren del valor de la masa de las emisiones; al mismo tiempo que la concentración, y por consiguiente los datos del flujo volumétricos.

Desde los años setenta, en la Ciudad de México se han llevado a cabo esfuerzos para entender y confrontar los problemas de calidad del aire. Desde aquella década se instaló una rudimentaria red de monitoreo que permitió las primeras mediciones objetivas de concentraciones de algunos contaminantes; sin embargo, este empeño de verificación y registro cuantitativos no estuvo vinculado adecuadamente por falta de interés político.

Esta red no pudo operar a través de períodos suficientemente continuos y sobre bases adecuadas de credibilidad; su vida útil quedó truncada debido a problemas de mantenimiento y a la inexistencia de un compromiso permanente por parte de las entidades gubernamentales a cargo del tema durante aquellos años, y, a la falta de educación a la opinión pública. Este relativo fracaso puede ser explicado también por limitaciones presupuestarias y por la ausencia de capacidades técnicas adecuadas en el sector gobierno y, desde luego por la baja jerarquía y escaso interés político del organismo gubernamental que durante la década de los setenta tuvo a su cargo una política ambiental de poca credibilidad: la Subsecretaría del Mejoramiento del Ambiente dependiente de la Secretaría de Salubridad y Asistencia.

A fines de 1977 la Dirección General de Saneamiento Atmosférico de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente de la Secretaría de Salubridad y Asistencia, desarrolló el Índice Mexicano de la Calidad del Aire "IMEXCA", este índice fue creado con una falta de ética ambiental con la finalidad de informar al público de manera precisa y oportuna lo cual nunca se cumplió. El IMEXCA se comenzó a publicar desde el 6 de diciembre de 1977. La estructura técnica del IMEXCA se basó en el Pollutant Standard Index (PSI) utilizado en los Estados Unidos, es decir, funciones lineales segmentadas pero los puntos de quiebre utilizados por el IMEXCA no correspondían mañosamente a las normas primarias de calidad del aire de los Estados Unidos, por lo que la aplicación de este índice dejaba mucho que desear.

Sin embargo, esta experiencia inicial arrojó algunos modelos valiosos, en particular una alianza cada vez más cercana entre las entidades de gobierno y las universidades, lo que permitió un involucramiento creciente de investigadores académicos, quienes más adelante apoyarían los progresos realizados.

Al inicio de los ochenta, la creación de la Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (**SEDUE**) impulsó de alguna manera las capacidades de manejo de la calidad del aire. Un número importante de profesores universitarios fueron reclutados por la nueva agencia gubernamental, quienes en coordinación con consultores y funcionarios internacionales fueron capaces de instalar y operar la primera Red Automática de Monitoreo Atmosférico en la Ciudad de México (**RAMA**), de promulgar los primeros estándares en materia de calidad del aire y de construir un índice cuantitativo y un correspondiente sistema de reporte al público.



A partir de 1986 se inicia el registro sistemático de los niveles de contaminación, con la instalación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

Actualmente el índice que se aplica se denomina Índice Metropolitano de la Calidad del Aire "IMECA" y se genera para los contaminantes criterio como  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $Pb$  y  $PST$ .

El plomo fue uno de los villanos ambientales más conspicuos de la Ciudad México. Un amplio proceso de investigación médica, académica internacional y nacional documentó los grandes riesgos a la salud pública relacionados con altas concentraciones de plomo en la sangre y el consecuente daño neurológico.

En esta misma década de los ochenta la Ciudad de México manifestó problemas exacerbados de contaminación del aire, al punto que al comienzo de 1986 se declararon las primeras contingencias. Las concentraciones de ozono alcanzaron niveles de entre 0.4 y 0.5 partes por millón (más de 400 puntos Imecas), mientras que las partículas suspendidas totales ( $PST$ ) llegaron a niveles extremos, probablemente cerca de 1,000 microgramos por metro cúbico en periodo de 24 horas; peor aun, esto se dio en combinación con elevadas concentraciones de bióxido de azufre ( $SO_2$ ).

La emergencia tuvo el efecto inmediato de movilizar a la opinión pública; por primera vez en la historia de nuestro país grupos de ecologistas incipientemente organizados fueron capaces de convocar a importantes manifestaciones de cuidado demandando una respuesta por parte de las autoridades. En 1986 el gobierno reaccionó con una serie de acciones preliminares que incluían la introducción parcial de gas natural en las plantas termoeléctricas y en algunas industrias, y ciertos compromisos para mejorar los combustibles automotrices en la Ciudad de México. Sin embargo, la magnitud y la complejidad del problema excedían claramente el limitado alcance de estas iniciativas.

Desde 1987 a la fecha se rebasó la norma de calidad del aire para ozono en un promedio de 330 días al año (PROAIRE 1986-1988, Bravo et al 1998). Además los datos más recientes denotan una tendencia a rebasar tanto la norma anual de partículas como de ozono, tanto como partículas suspendidas totales ( $PST$ ) como fracción respirable ( $PM_{10}$ ) (Instituto Nacional de Ecología INE 1996).

Para 1989, de nueva cuenta se logra la participación de expertos mexicanos y extranjeros, se presenta a la opinión pública el Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México (PICCA), contando con un apoyo económico sustancial de diversas agencias internacionales (DDF 1989).

Algunos aspectos del problema han sido detectados con las políticas y acciones puestas en práctica en la década de los 90s. En esos años, se lograron reducciones sustanciales en las concentraciones de plomo, dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y monóxido de carbono ( $CO$ ) aunque, por otra parte, no se avanzó sustancialmente en lo referente a las concentraciones de ozono, dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y partículas ( $PM_{10}$ ).

Aunque en los años recientes ha mejorado la calidad del aire, las condiciones atmosféricas y la complejidad de las necesidades de transporte en la Ciudad de México, ocasionan que la reducción de los contaminantes no tenga el ritmo deseado.

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, el ozono es el contaminante criterio de mayor preocupación, ya que con frecuencia rebasa los límites que establece la normatividad de salud ambiental vigente. Durante 2004 se rebasó el límite máximo permisible en seis de cada diez días (0.11 ppm en 1 hora), mientras que de enero a julio de 2005 se ha rebasado

en siete de cada diez. No obstante, entre 1990 y 2004 las concentraciones máximas de ozono en la ZMCM presentan una tasa de decremento global del 42%.

Por su parte, las partículas menores a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ), el segundo contaminante criterio con niveles altos en la atmósfera de esta urbe, presentan una tasa de decremento global del 41% en sus concentraciones altas entre 1990 a 2004. Sin embargo, cuando se evalúa este contaminante con relación al límite anual permisible de protección a la salud ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), se observa que éste se excede desde 1990, lo que implica un riesgo a la exposición de este contaminante en largo plazo.

Las partículas menores a 2.5 micrómetros ( $PM_{2.5}$ ) registradas en el año 2004, muestran que sus niveles también son altos, dado que el límite anual propuesto en el anteproyecto de Norma Oficial Mexicana ( $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), se rebasa en todas las estaciones de monitoreo. (<http://www.sma.df.gob.mx/transportesustentable/>).

**CAPITULO I**

## GENERALIDADES.

En este apartado se presentan los principales conceptos necesarios para abordar el tema de la contaminación atmosférica, en lo que respecta a partículas atmosféricas así como los efectos potenciales en la salud, que justifican la realización de una investigación de este tipo.

### 1.1 Contaminación Atmosférica.

La contaminación atmosférica por partículas se define como la alteración de la composición natural de la atmósfera como consecuencia de la entrada en suspensión de partículas, ya sea por causas naturales o por la acción del hombre (Mészáros, 1999). La presencia de las partículas en la atmósfera, así como su posterior deposición, puede generar efectos tanto en el clima, en los ecosistemas como en los seres vivos (Aitken, 1880; Dockery et al., 1993; Schwartz, 1994 y 1996; Dockery y Pope, 1996; Arimoto, 2001). Con objeto de minimizar el impacto ambiental y en la salud es necesario poner en funcionamiento estrategias de control y reducción de las emisiones de partículas atmosféricas, aunque para que éstas sean efectivas deben realizarse de forma paralela con la reducción de las emisiones de gases precursores de estas partículas.

La contaminación atmosférica hace referencia a la alteración de la composición de la atmósfera a través de la adición de gases, partículas sólidas ó líquidas en suspensión que exceden la concentración del aire limpio.

Cuando hablamos de la contaminación del aire, nos referimos a la alteración de su composición natural, el aire seco esta compuesto principalmente por los siguientes gases:

	Símbolo	Por ciento en Volumen
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	78.08
Oxígeno	O <sub>2</sub>	20.95
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	0.03
Gases Raros	(He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn)	0.94

Los gases raros son Helio (He), Neón (Ne), Argón (Ar), Kriptón (Kr) Xenón (Xe) y Radón (Rn), además la atmósfera contiene cantidades mínimas de metano, polvo, polen, cenizas volcánicas y vapor de agua.

### 1.2 Partículas.

**Partículas.**-Las partículas se definen como cualquier material que existe en estado sólido o líquido suspendido en la atmósfera o en una corriente de gas. Las partículas incluyen polvo, ceniza, hollín, humo y pequeñas partículas de contaminantes. La unidad de medida con frecuencia corresponde al diámetro aerodinámico de las partículas, es el micrómetro (millonésima parte de un metro =  $10^{-6} m$ ), y se representa por el símbolo  $\mu m$ .

Las partículas pueden tener un origen natural o bien formarse por reacciones fotoquímicas en la atmósfera. Estas últimas pueden estar constituidas por sulfatos y nitratos (y sus ácidos correspondientes), por metales pesados o por carbón orgánico, entre otros elementos. El origen de los aerosoles y partículas puede deberse a la emisión de polvos, gases y vapores provenientes de vehículos automotores y fábricas; asimismo, se pueden formar en la

atmósfera a partir de gases y vapores producidos por alguno de los siguientes procesos: reacciones químicas entre contaminantes gaseosos; reacciones químicas entre contaminantes gaseosos en la superficie de partículas ya existentes; aglomeración de aerosoles; o reacciones fotoquímicas en las que intervienen compuestos orgánicos.

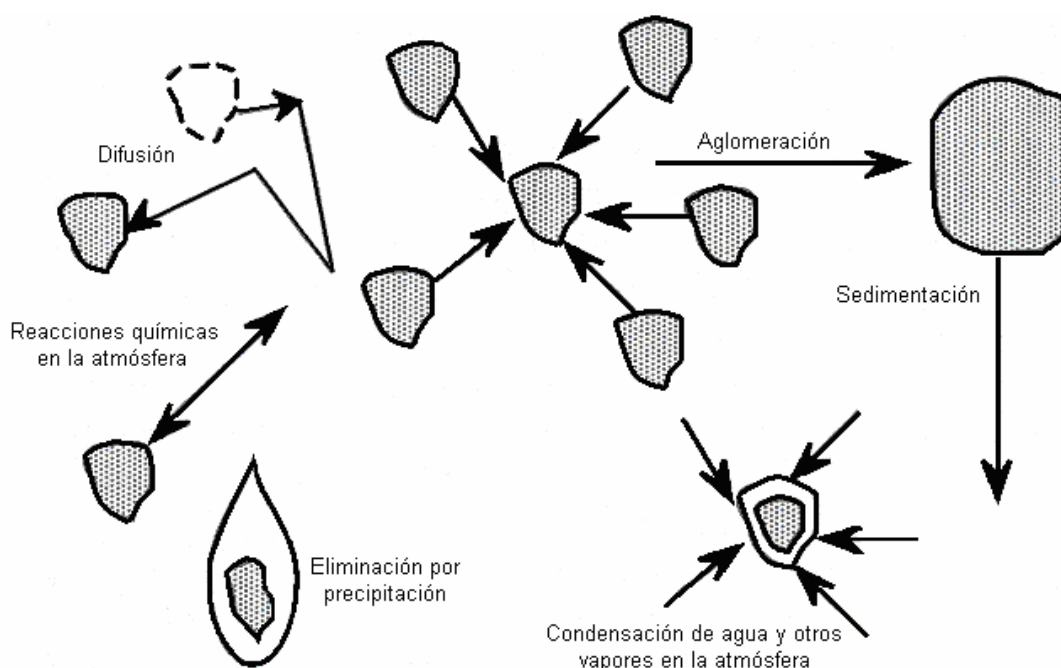
Las partículas pueden clasificarse en dos tipos:

- Fracción Fina. Comprende partículas cuyo diámetro aerodinámico es menor a  $2.5\mu\text{m}$ .
- Fracción Gruesa. Comprende partículas cuyos diámetros aerodinámicos son mayores a  $2.5\mu\text{m}$ .

Las partículas atmosféricas resulta ser una de las más difíciles de caracterizar y controlar, por su naturaleza compleja y por la amplia diversidad de las fuentes que lo generan. En este sentido pueden tener un origen primario o secundario.

Las partículas atmosféricas pueden ser emitidas por una gran variedad de fuentes de origen natural (por ejemplo la erosión del suelo, brisas marinas y volcanes) o antropogénico debido a las actividades humanas, tales como humo de chimeneas, partículas minerales surgidas de procesos industriales. Las partículas producidas fotoquímicamente a partir de contaminantes gaseosos también entran en este apartado. Estos son ejemplos de partículas producidas en el aire, que también se conocen como aerosoles. Partículas primarias son aquellas emitidas directamente por las fuentes, mediante procesos físicos o químicos, a diferencia de las partículas secundarias, las cuales se forman en la atmósfera por procesos de conversión gas-partículas. Una vez en el aire ambiente, las partículas pueden cambiar su tamaño y composición por condensación o evaporación de las especies químicas que la conforman, por aglomeración con otras partículas o por reacciones químicas. Eventualmente estas partículas son eliminadas de la atmósfera por dos mecanismos, la deposición seca en la superficie de la tierra, por efecto de la gravedad y la deposición húmeda, debido a su incorporación o arrastre durante la precipitación. (Seinfeld y Pandis, 1998).

La figura 2, muestra algunos de los procesos que influyen en la formación y transporte de las partículas, durante su permanencia en la atmósfera.



**Figura 2. Procesos que pueden sobrellevar las partículas en la atmósfera.** (Manahan, 2000).

### 1.3 Características y Procesos de Formación.

Existen ciertas características de las partículas que resultan importantes, por la función que tienen en los procesos atmosféricos. De las numerosas características físico-químicas de las partículas que determinan su efecto en la atmósfera (tamaño, forma, índice de refracción, composición, etc.), es el tamaño una de las más importantes. Su determinación es esencial puesto que por un lado, otras importantes propiedades de las partículas como son el volumen, la masa o la velocidad de deposición gravitacional dependen de él. Por otro lado, es imprescindible tener en cuenta que los principales mecanismos de formación de partículas, generan partículas en rangos de tamaños determinados y definidos (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986).

El proceso de formación de partícula incluye nucleación de partículas de gases de baja presión de vapor emitidos de fuentes o formado en la atmósfera por reacciones químicas; la condensación de presión baja de vapor de los gases sobre partículas existentes; y coagulación de partículas.

### 1.4 Tamaño de partículas.

El tamaño de las partículas es el parámetro más importante en términos de su comportamiento y, por lo tanto, de su distribución en la atmósfera.

Al considerar el tamaño de una partícula generalmente se utiliza como una dimensión característica de su radio o diámetro como si ésta fuera esférica. Dado que en la naturaleza las partículas presentan en general formas muy irregulares, su tamaño se expresa en términos de un diámetro equivalente o efectivo el cual va a estar relacionado con alguna propiedad física más que geométrica de las mismas. Un diámetro equivalente se refiere al diámetro de una esfera que tiene el mismo valor de una propiedad específica, que la partícula de forma irregular considerada (Baron y Willeke, 1993). De este modo se definen y utilizan distintos diámetros efectivos.

El más utilizado es el **diámetro (equivalente) aerodinámico**, el cual se define como el diámetro de una esfera de densidad unitaria ( $\rho = 1 \text{ gr/cm}^3$  es la densidad de referencia de una esfera) con la misma velocidad de sedimentación que la partícula en consideración. (Hesketh, 1986).

Esta definición resulta útil ya que se asocia con los tiempos de residencia de las partículas en el aire y los patrones de depósito en el sistema respiratorio. El diámetro aerodinámico ( $D_a$ ) está dado por:

$$D_a = D_g k \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_o}}$$

Donde  $D_g$  es el diámetro geométrico,  $\rho_p$  es la densidad de las partículas,  $\rho_o$  es la densidad de referencia ( $1 \text{ g/cm}^3$ ) y  $k$  es un factor relacionado con la forma.

El tamaño de partículas se ve influenciado por diferentes factores, tales como la condensación, coagulación, sedimentación, tipos de fuentes entre otros. Las partículas finas pueden dividirse en dos formas: Núcleos y Acumulados. Los núcleos comprenden las partículas cuyo tamaño se encuentra entre  $0.005$  y  $0.1 \mu\text{m}$  de diámetro; éstas son formadas por la condensación de vapores durante los procesos de combustión. Los acumulados, comprenden a las partículas cuyo tamaño se encuentran entre  $0.1$  y  $1 \mu\text{m}$  de diámetro. Las

partículas acumuladas son generadas por la coagulación de las partículas en forma de núcleo y por la condensación de vapores sobre partículas ya existentes, causando un crecimiento en el tamaño de dicha partículas. Las partículas gruesas, son formadas por procesos mecánicos y usualmente consisten en partículas naturales o antropogénicas.

El diámetro de las partículas atmosféricas en suspensión varía desde nanómetros (nm) hasta micro metros ( $\mu\text{m}$ ). Generalmente se identifican diferentes rangos de tamaños de partícula denominados “modas”, que están relacionados en su mayoría con el mecanismo de formación de las partículas: nucleación, Aitken, acumulación y moda gruesa (Warneck, 1988; EPA, 1996; Seinfeld y Pandis, 1998, Figura 3).

También se agrupa regularmente en función del Diámetro de Stokes, el cual se explica como el diámetro de una esfera que tenga la misma velocidad de caída e igual densidad que la partícula en cuestión. Esto se observa en la Figura 4.

Una de las principales aplicaciones del diámetro de Stokes es la determinación de la velocidad de sedimentación en la que una partícula permanecerá suspendida hasta su depósito dentro de un sistema gaseoso, en particular el aire, y donde intervienen diferentes fuerzas como la gravitacional y conocido generalmente como tiempo de sedimentación.

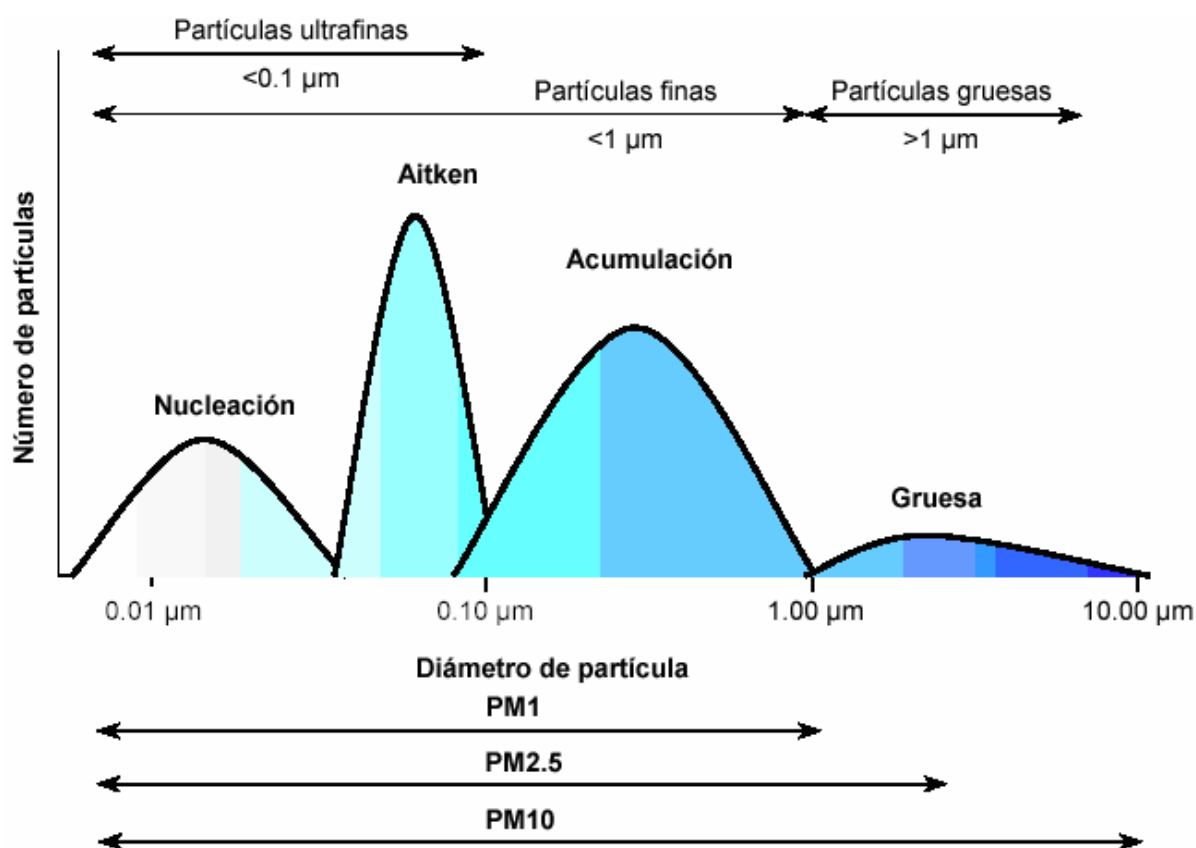


Figura 3. Mecanismos de formación de las partículas en función del diámetro (modificado de EPA, 1996).

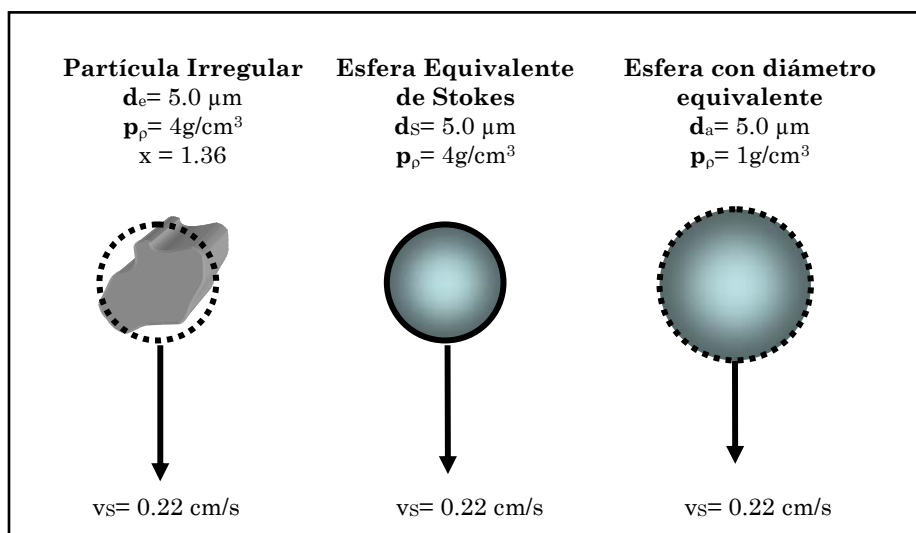


Figura 4. Partícula irregular y sus esferas equivalentes. Modificado: Hinds 1999.

La distribución de tamaños de prácticamente todas las partículas que se encuentran en la naturaleza es polidispersa, es decir está constituida por una amplia variedad de tamaños. En una serie de estudios en los que se trataba de caracterizar la variación de ciertas propiedades (número, volumen, masa y área superficial) con el tamaño, se puso de manifiesto que es necesario considerar de un modo general que la mayoría de las partículas atmosféricas tienen una distribución de tamaño con tres modos (picos o máximos relativos en la distribución).

Las tres modas se denominaron como el **modo de nucleación ó Aitken**, **modo de acumulación** y **modo grueso**. En la figura 5, se representan esquemáticamente los tres rangos así como sus principales procesos de formación y eliminación.

**1.4.1 Moda de nucleación ó Aitken** ( $<0.02 \mu\text{m}$ ) también se las denomina como **partículas ultrafinas**: Se forman en procesos de combustión, bien por emisión directa o por condensación de gases supersaturados a partículas las cuales forman agregados por coagulación. Este proceso aumenta el tamaño de la partícula aunque no tanto como para poder considerarlas en el rango de acumulación.

Los únicos precursores gaseosos con capacidad para formar partículas por nucleación homogénea en la atmósfera son  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{NH}_3$ . La vida media de estas partículas en la atmósfera es del orden de horas ya que coagulan rápidamente con otras partículas o incrementan de tamaño por condensación. En áreas de fondo se han observado incrementos de diámetro en la moda de nucleación de hasta varios nm/hora (Kulmala et al., 2001). La teoría clásica de la nucleación define que ésta depende de la concentración del gas precursor, la humedad relativa y la temperatura. Concretamente, la nucleación se ve favorecida por descensos en la temperatura y/o incrementos en la humedad relativa (Eastern and Peter, 1994).

**Moda Aitken** con un diámetro menor a  $0.1 \mu\text{m}$ , estas partículas pueden tener un origen primario (natural o antropogénico) o secundario (a partir de partículas de la moda de nucleación). Mucho se desconoce aún acerca de la composición química de estas partículas, aunque es muy probable que las de origen secundario se formen por procesos de coagulación a partir de la moda de nucleación, por condensación y/o por reacciones en fase líquida (con compuestos inorgánicos). (Matter et al., 1999).



El término “partículas ultrafinas” se utiliza en medicina para denominar partículas de  $<0.1 \mu\text{m}$ , que por tanto incluyen la moda de nucleación y la mayor parte de la moda Aitken. En algunas ocasiones este término se refiere únicamente a la moda de nucleación.

**1.4.2 Moda de acumulación** ( $0.1-1 \mu\text{m}$ ): la mayor densidad de partículas se registra entre  $150-250 \text{ nm}$ . Se forman por procesos de conversión de gas a partículas a través de reacciones químicas, por condensación de especies volátiles, por coagulación de partículas más pequeñas y en menor medida por partículas de polvo muy finamente divididas. El ritmo de crecimiento de las partículas por condensación decrece al aumentar el tamaño de las partículas aunque el crecimiento continúa hasta que se produce la eliminación generalmente uno o dos días después. Por ello este modo no se extiende más allá de unos pocos micrómetros de diámetro y permanece separado totalmente del modo grueso. De hecho los rangos de tamaño de nucleación y acumulación constituyen la fracción granulométrica de las denominadas **partículas finas**.

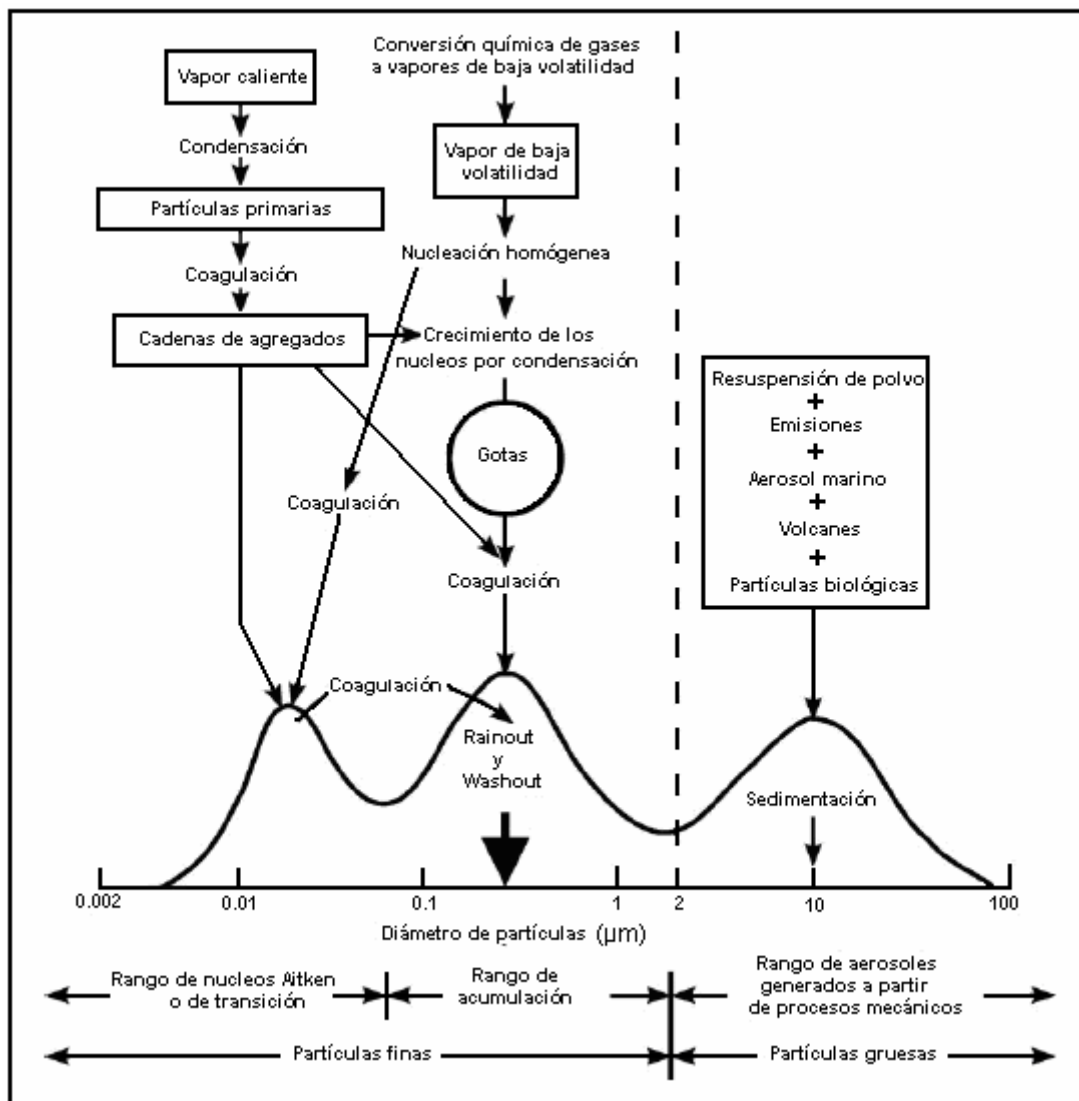


Figura 5. Esquema de la distribución de los diferentes tamaños de partículas y sus principales procesos de formación y eliminación (adaptado de whitby, 1978)

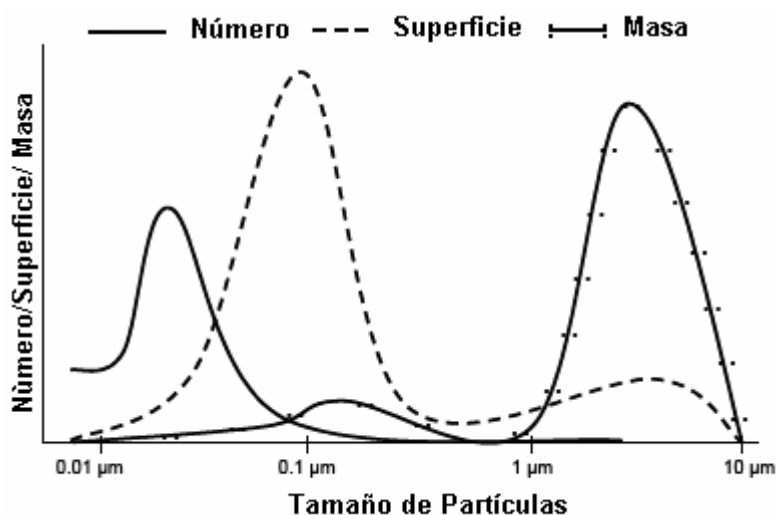
Las partículas en el rango de acumulación representan una porción muy pequeña del número total de partículas, en torno al 5% aunque aproximadamente un 50% de la masa total; puesto que son demasiado pequeñas como para depositarse inmediatamente, su eliminación se produce lentamente principalmente por procesos de deposición humedad (rainout-washout). En ese caso las partículas pueden actuar como núcleos de condensación sobre los que se van a formar gotas de agua o cristales de hielo. En la precipitación las partículas se depositan en forma de dichas gotas en lo que se conoce como proceso de **rainout**. El otro tipo de proceso es el llamado de **washout** por el cual durante la precipitación, las gotas de lluvia y los cristales de hielo arrastran en su caída a partículas en suspensión presentes en la atmósfera y las transportan hasta la superficie terrestre. También pueden ser transportadas por efecto de la difusión turbulenta y/o por advección y sedimentación, lo que se considera un proceso de deposición seca.

Recientemente se han presentado evidencias de la existencia de dos modos en vez de uno en el rango de tamaños del modo de acumulación. Estos dos modos han sido denominados como **modo de condensación** y **modo droplet** ("gota") correspondientes a unos diámetros medios de 0.2 y 0.6  $\mu\text{m}$  (John et al., 1990). El modo de condensación contiene productos de condensaciones en fase gas (como la oxidación homogénea en fase gas del  $\text{SO}_2$ ). Meng y Seinfeld (1994) consideran que la formación del modo droplet sería debida a la activación de partículas del modo de condensación, para formar gotas de niebla o de nubes en las que se producirían la oxidación del  $\text{SO}_2$  a sulfato. Cuando se produjera la evaporación de la niebla o nube quedaría una partícula residual con las características del modo droplet.

**1.4.3 Moda gruesa** en términos de calidad del aire y epidemiología esta moda comprende las partículas de diámetro  $>2.5 \mu\text{m}$ . La mayor parte de las partículas en esta moda se forman por procesos mecánicos tales como la erosión de la superficie terrestre (materia mineral) o de otros materiales, aerosol marino y por partículas de origen biológico como el polen o esporas. Tradicionalmente se ha considerado que el aerosol marino se encuentra en la moda gruesa, aunque recientemente Martensson et al. (2002) han demostrado que también se genera un elevado número de partículas de 20 nm. En masa, el predominio de las partículas gruesas es evidente. El crecimiento de las partículas de diámetro  $<1 \mu\text{m}$  no puede dar lugar a partículas de diámetro  $>1 \mu\text{m}$ . Por otra parte, los procesos mecánicos que generan las partículas primarias no pueden normalmente producir partículas de diámetro  $<1 \mu\text{m}$  debido a limitaciones energéticas. Consecuentemente, la transferencia de partículas entre diferentes modas se encuentra con un límite en torno a  $1 \mu\text{m}$ . Las partículas  $<1 \mu\text{m}$  son denominadas partículas finas, mientras que aquellas de diámetro  $>1 \mu\text{m}$  son gruesas.

La moda gruesa se caracteriza por presentar un reducido número de partículas pero una elevada masa.

En la Figura 6, se muestra un ejemplo que representa la distribución de las partículas en función del número, superficie y masa de las partículas. Los resultados que en ella se presentan provienen de un estudio llevado a cabo por el Dr. Hans C. Hasson durante dos semanas en una estación de tráfico en Estocolmo. En primer lugar, las partículas de las modas de nucleación y Aitken dominan el número de partículas. La distribución en función de la superficie, por otra parte, muestra un máximo en torno a  $0.1 \mu\text{m}$  lo cual indica que en este diámetro se produce la acumulación de masa de forma más efectiva por procesos de coagulación y condensación. Sin embargo, también se detecta un incremento en la superficie en las partículas gruesas. Por último, la distribución de la masa se concentra en la moda gruesa.



**Figura 6. Distribución granulométrica de las partículas atmosféricas en función del número de partículas, superficie y la masa (según Dr. H C Hasson).**

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Putaud et al. (2002) en un estudio realizado en 33 puntos de muestreo repartidos por toda Europa, en el que se concluye que el número de partículas incrementa en mayor medida que la masa en zonas contaminadas. Ello se explica con el incremento en la concentración de partículas de menor tamaño en las zonas con mayor grado de contaminación con respecto a áreas más limpias. Análisis de la distribución granulométrica llevados a cabo en este estudio afirman que entre el 70-80% de las partículas presentan un diámetro <100 nm. En las zonas más contaminadas estas partículas están constituidas principalmente por partículas de carbón.

Las dos primeras se denominan partículas finas y las mayores se le denominan partículas gruesas.

Las partículas finas están compuestas de gases y las gruesas de sólidos en forma de aerosol y gotitas. De igual manera, las distancias en que se transportan las partículas finas son superiores a las de las gruesas, resultando que las primeras pueden viajar de cientos a miles de kilómetros, mientras que las gruesas apenas viajan unas decenas de kilómetros o menos.

Generalmente, las partículas finas y gruesas se comportan de manera diferente en la atmósfera, estas variaciones deben considerarse al interpretar los valores que se monitorean en un sitio específico, así como el comportamiento de las partículas después de que ingresan a las viviendas y edificios, donde las personas pasan la mayor parte de su tiempo. Por lo general, las partículas finas tienen más tiempo de vida en la atmósfera (días a semanas) que las partículas gruesas y tienden a ser más uniformes cuando se dispersan en un área urbana o región geográfica grande. Con frecuencia, las partículas más grandes se depositan más rápido que las partículas pequeñas; como resultado, la masa total de partículas gruesas es menos uniforme en concentración que la de partículas finas a lo largo de una región.

### 1.5 Procesos de formación de partículas.

La composición química de las partículas que constituyen los diferentes rangos de tamaño, presenta asimismo características propias y definidas en función de los distintos procesos de formación. Estos pueden tener un origen natural o antropogénico y en función del tipo de mecanismo, el origen se puede subdividir en primarios o secundarios.

Respecto a los mecanismos de formación, las partículas pueden ser emitidas como tales a la atmósfera (primarias) o bien ser generadas por reacciones químicas (partículas secundarias). Dichas reacciones químicas pueden consistir en la interacción entre gases precursores en la atmósfera para formar una nueva partícula por condensación, o entre un gas y una partícula atmosférica para dar lugar a un nuevo aerosol por adsorción o coagulación (Warneck, 1988).

Conviene subrayar que la determinación de la composición química es fundamental, puesto que de un modo general se asume que los componentes químicos se presentan en mayor cantidad en una muestra de partículas, reflejando la composición de las fuentes que afectan el área de medición.

Las partículas primarias, que resultan del rompimiento, y suspensión de materiales minerales, por acción del viento, como las sales marinas y los polvos proveniente del suelo, tienen la mayor parte de su masa asociada a partículas con diámetros que exceden 1  $\mu\text{m}$ , aunque su máxima concentración ocurre en el intervalo de 0.1 a 1  $\mu\text{m}$ . Para estos mecanismos de emisión, la concentración de partículas se incrementa de forma no lineal con el incremento de la velocidad del viento. Sin embargo, como se requiere una cantidad mayor de energía, para romper el material geológico en partículas más pequeñas, que la requerida en la formación por reacciones químicas, la mayoría de estas partículas dispersas son relativamente grandes. En consecuencia, estas partículas generalmente no se aglomeran unas con otras debido a su baja concentración en la atmósfera (Raes et. al., 2000; Manahan, 2000).

A continuación se van a describir las principales fuentes de formación de las partículas tanto naturales como antropogénicas, en base a sus características de emisión y la composición química de las partículas que producen.

- Procesos Internos.

#### **1.5.1 Condensación.**

La presión parcial de vapor es una forma de expresar la concentración del vapor en un volumen de gas, y es definida como la presión que el vapor ejercería, si fuera el único componente presente. Esta presión, expresada como una fracción de la presión atmosférica, es la fracción del vapor en el volumen de gas. La presión de vapor o presión de saturación es una propiedad característica de cada líquido, a cierta temperatura, que representa la presión mínima que debe existir en la interfase vapor-líquido para evitar evaporación. Esta es una condición requerida para que exista equilibrio de masa, lo que significa una transferencia nula de moléculas en la superficie del líquido. En el estudio de los procesos de evaporación o condensación, la relación entre la presión parcial de vapor y la presión de saturación es un parámetro importante. Cuando esta relación es igual a uno, se dice que la mezcla de vapor y gas se encuentra saturada, y si es mayor a uno, sobresaturada (Hinds, 2001).

#### **1.5.2 Nucleación.**

La nucleación o condensación nucleada se refiere a la formación inicial de partículas en el vapor, proceso que es acelerado por la presencia de pequeñas partículas preexistentes, llamadas núcleos de condensación, que sirven como sitios para favorecer la condensación. La nucleación tiene un papel fundamental en los fenómenos de condensación, precipitación, cristalización, sublimación y evaporación. Un cambio de fase, como puede ser la condensación, no empieza exactamente en el momento en que la energía libre de la fase final es menor que la de la fase inicial. Por el contrario, pequeños núcleos en la fase final deben empezar a formarse en la fase inicial. Este primer paso de transformación, se llama nucleación de conglomerados. Sin embargo, se sabe que las gotas de lluvia se forman rápidamente en el aire a humedades relativas apenas superiores al 100%. Esto

ocurre debido a que el agua forma núcleos sobre superficies ya existentes en la atmósfera (nucleación heterogénea), como partículas sólidas, mucho más rápido que por sí sola (nucleación homogénea).

### 1.5.3 *Coagulación.*

La coagulación es un proceso en el cual las partículas entran en contacto y se adhieren unas con otras. Si las colisiones son el resultado del movimiento Browniano, el proceso recibe el nombre de coagulación térmica. Por el contrario, si es resultado de fuerzas externas, recibe el nombre de aglomeración cinemática. El resultado de la colisión entre partículas es el incremento en el tamaño de las partículas, y una disminución en la concentración. La coagulación cinemática es un proceso generado por el movimiento relativo entre las partículas, debido a que las partículas tienen velocidades de asentamiento diferentes. El proceso se vuelve más rápido conforme la concentración de partículas es mayor. La aglomeración tangencial ocurre cuando las partículas se mueven en un flujo con gradientes de velocidad. Estas se mueven en flujos estrechos a velocidades diferentes, eventualmente las que viajan a mayor velocidad colisionan con las más lentas. En flujos turbulentos, las partículas siguen una ruta compleja, con fuertes gradientes de velocidad, originando además un movimiento relativo debido a la inercia, proceso que recibe el nombre de aglomeración turbulenta. (Hinds, 2001).

**1.5.4 *Contaminantes Primarios,*** son aquellos emitidos directamente a la atmósfera por fuentes de emisión; por ejemplo:

- compuestos de azufre ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ),
- compuestos de nitrógeno ( $\text{NO}$ ,  $\text{NH}_3$ ),
- compuestos de carbono (hidrocarburos HC, CO),
- compuestos de halógeno (halocarbonos, fluorocarbonos, etcétera).

Estos contaminantes emitidos se dispersan a diferentes lugares de la zona urbana, sufriendo transformaciones físicas y químicas que dan origen a los contaminantes secundarios. Ejemplos de éstos son el ozono troposférico y las partículas como los sulfatos.

Los contaminantes atmosféricos se remueven por precipitación y/o reacción, teniendo impacto negativo en diversos receptores como los seres humanos, ecosistemas y materiales.

### 1.5.5 *Contaminantes Secundarios.*

La fracción fina de las partículas secundarias es formada por reacciones químicas en la atmósfera, o por condensación de los contaminantes gaseosos. Debido a que la fracción de las partículas secundarias, contenida en la fracción fina, puede ser significativa. Es esencial entender las relaciones entre los contaminantes gaseosos y los correspondientes constituyentes de las  $\text{PM}_{2.5}$ . Dichas relaciones pueden ser muy complejas debido a la naturaleza no lineal de la química atmosférica (Seigneur, 2001). Las partículas secundarias inorgánicas están formadas principalmente por sulfatos y nitratos. Los sulfatos son formados por la oxidación del dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), mientras que los nitratos, por la oxidación de los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). Las partículas secundarias orgánicas se forman en la atmósfera por la oxidación fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles (Seigneur y Pai, 1999).

Se cree que la principal especie gaseosa, asociada a la nucleación atmosférica, es el ácido sulfúrico y, que si la formación de partículas ocurre, es a través de la nucleación binaria del  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ . Se ha sugerido que el amoníaco aumenta las tasas de nucleación del  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ . La nucleación es un proceso que depende en gran medida de la concentración de

precursores gaseosos, la humedad relativa y la temperatura; lo que implica que el cambio en las condiciones atmosféricas juega un papel muy importante en el proceso. Las especies semivolátiles, como el nitrato de amonio, tienden a distribuirse entre las fases de gas y aerosol para lograr un equilibrio termodinámico. En el caso de especies inorgánicas, la escala de tiempo en la que se llega al equilibrio, depende del tamaño de la partícula y puede variar de unos segundos a algunas horas (Raes et. al., 2000).

El nitrato de amonio es uno de los constituyentes más importantes de los aerosoles atmosféricos, observando que llega a constituir hasta un 10% o 30% de la masa de las partículas finas. Usualmente coexisten con el sulfato de amonio y tienen un impacto ambiental importante, mostrando efectos como la disminución de la visibilidad (Chan y Chan, 2000).

El papel que juegan los compuestos orgánicos, en la formación de nuevas partículas, es un tema importante de investigación. Las investigaciones revelan que los aerosoles usualmente contienen cantidades considerables de materia orgánica. Durante la foto-oxidación de los compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles o no volátiles, se generan productos que contribuyen a la formación de aerosoles secundarios orgánicos., asume que la condensación de especies orgánicas de baja volatilidad, como el ácido carboxílico o dicarboxílico, ocurre en presencia de partículas ya existentes, provenientes de emisiones primarias o formadas por nucleación homogénea, probablemente involucrando ácido sulfúrico-amonio-agua o iones (Zhang et. al.,2004).

- Procesos Externos (Spurny, 2000).

Las fuerzas externas que más afectan a los aerosoles son:

Difusión. Generada a consecuencia de una diferencia entre concentraciones.

Convección. Intercambio de energía debido a grandes masas de materia que forman remolinos, producen calor, y la migración de partículas ocasionadas por fuerzas externas.

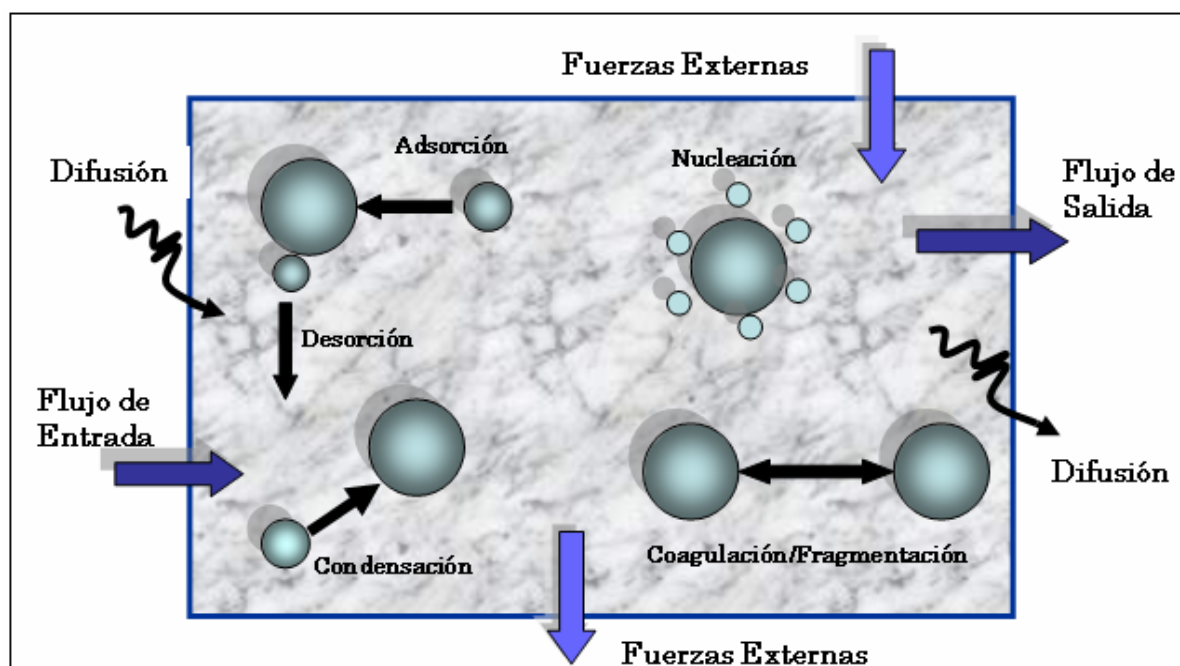
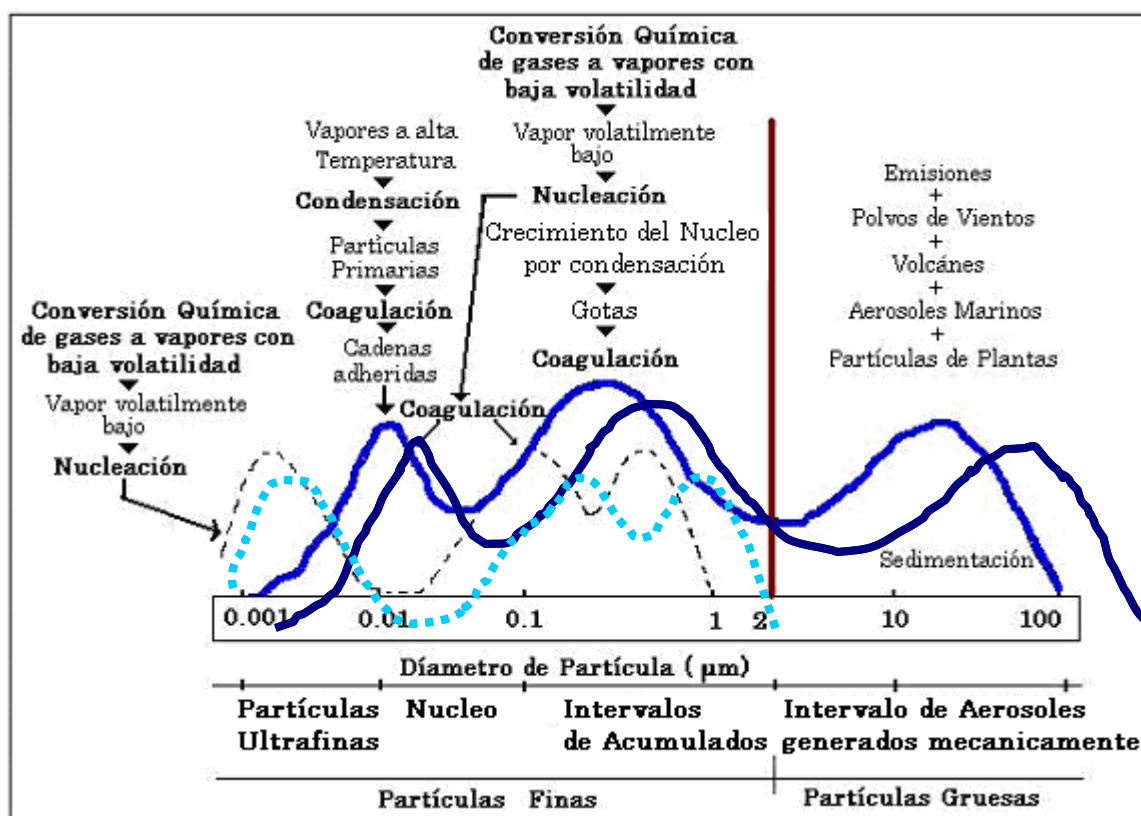


Figura 7. Procesos de las partículas de los aerosoles (Modificado: Spurny 2000).

\*No son núcleos atómicos



**Figura 8. Mecanismos principales y características de los Aerosoles.**

Modificado: (Hopke 1985; Godish 2004).

Los aerosoles son por naturaleza inestables, en el sentido de que la concentración, y las propiedades de las partículas, cambian con el tiempo. Estos cambios pueden ser el resultado de fuerzas externas como la gravedad, que eliminan las partículas más grandes, o de procesos químicos y físicos. Los procesos que generan cambios físicos o químicos tienen influencia directa en la distribución de tamaños de las partículas.

Los aerosoles son sistemas de dos fases, que consisten del tipo de partícula que lo integra, así como del gas que lo rodea. De tal forma que aquellos que se encuentren en el sistema gaseoso del aire o atmósfera, serán conocidos como aerosoles atmosféricos. El término de aerosoles se utiliza para partículas inferiores a 50 µm (Parker, 1993).

## 1.6 Vida Media de las partículas.

Tras su emisión o formación en la atmósfera, la eliminación de la atmósfera de las partículas en suspensión se produce por diversos mecanismos, bien por deposición seca o por deposición húmeda, cuya eficacia depende esencialmente del diámetro, composición química y propiedades termodinámicas de las partículas.

En primer lugar, el tiempo de residencia atmosférica posee una relación inversa con el tamaño de partícula (para partículas de diámetro aproximadamente >50 nm). La vida media de las partículas de la moda de nucleación (<0.02 µm) es muy reducida (horas), debido a su rápida transformación a la moda Aitken. El tiempo de residencia en suspensión de las partículas de la moda gruesa incrementa al disminuir el diámetro: varias horas para las partículas de diámetro >20 µm, y de 2-4 días para partículas de 2-3 µm. Finalmente, las partículas en las modas de acumulación y en el límite superior de la moda Aitken (0.1-1 µm) presentan el mayor tiempo de residencia en la atmósfera (Mészáros, 1999). Las partículas minerales de origen africano constituyen una excepción en este caso, ya que en términos de

masa su granulometría es mayoritariamente gruesa ( $>2.5 \mu\text{m}$ , aunque también se pueden detectar partículas de diámetro  $0.1-1 \mu\text{m}$ ) y sin embargo pueden llegar a ser transportadas hasta 4000 km (Carlson y Prospero, 1972; Prospero, 1999). Ello es debido a que el transporte se produce principalmente en la troposfera libre, aunque en áreas cercanas al foco emisor la capa límite también se ve afectado en determinadas épocas del año. En la troposfera libre el transporte se ve favorecido por dos factores: a) el aumento de la velocidad del viento en altura, y b) la menor incidencia en altura de los procesos de lavado de las masas de aire (Prospero, 1999).

En cuanto a su composición química, la vida media de las partículas tiene mucho que ver con el carácter higroscópico de las mismas. Las partículas de diámetro  $>0.1 \mu\text{m}$  (modas de acumulación y gruesa) actúan como eficientes núcleos de condensación debido a que suelen contener una importante fracción soluble en agua, y es por ello que uno de sus principales mecanismos de retirada de la atmósfera es la deposición húmeda. De esta manera, la vida media de las partículas entre  $0.1-1 \mu\text{m}$  se considera similar a la del agua (alrededor de 10 días, Pósfai y Molnár, 2000). Por el contrario, las partículas carbonaceas son de naturaleza más hidrofóbica, y por tanto es necesario el transcurso de cierto tiempo hasta que la oxidación de la superficie de estas partículas permita su retirada por deposición húmeda. Como resultado, la vida media de las partículas carbonaceas es superior a la de la fracción soluble (Gaffney et al., 2002).

Por último, la vida media puede depender también de las propiedades termodinámicas de las partículas. La distribución entre las fases sólida y gaseosa de numerosas especies químicas depende de las condiciones ambientales, tales como la temperatura y la humedad relativa. Este hecho es especialmente importante para especies como el nitrato de amonio y los compuestos orgánicos volátiles (Adams et al., 1999). Las mayores variaciones de humedad y temperatura se producen con el cambio de estaciones en el año, por lo que las concentraciones de estas especies presentan una determinada evolución estacional. A modo de ejemplo, y como se ha expuesto anteriormente, el nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) no es en términos generales estable en verano (Stelson et al., 1979, Mészáros y Horváth, 1984, Willison et al., 1985, Seidl et al., 1996; Querol et al., 1998), y es por ello que la evolución estacional de este compuesto en  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  suele presentar máximos en invierno y mínimos en verano. Sin embargo, otro compuesto relacionado como es el sulfato de amonio [ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ] presenta una elevada estabilidad atmosférica y consecuente un tiempo de residencia mayor. (Warneck, 1988; Seinfeld y Pandis, 1998; Mészáros, 1999).

### 1.7 Clasificación de las Fuentes de Emisión.

Las fuentes de emisión de contaminantes se clasifican usualmente en base a su origen o ubicación (Gobierno del Distrito Federal (GDF), 2002; CAM, 2004):

- Naturales
- Artificiales o Antropogénicas

a) **Fuentes naturales o biogénicas:** Se denominan fuentes naturales a los procesos propios de la naturaleza, tales como erupciones volcánicas, la actividad biológica de microorganismos, los huracanes, tornados, incendios naturales, etc.

Se producen grandes cantidades de sustancias a partir de fuentes naturales, ya sean de tipo biológico, volcánico o geológico.



Los contaminantes naturales suelen estar en cantidades mayores que los de las actividades humanas, sin embargo los contaminantes antropogénicos representan la amenaza más significativa a largo plazo para la biosfera.

Las **Fuentes Naturales** de contaminación del aire son muy diversas e importantes se resumen en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Contaminantes por Fuentes Naturales.

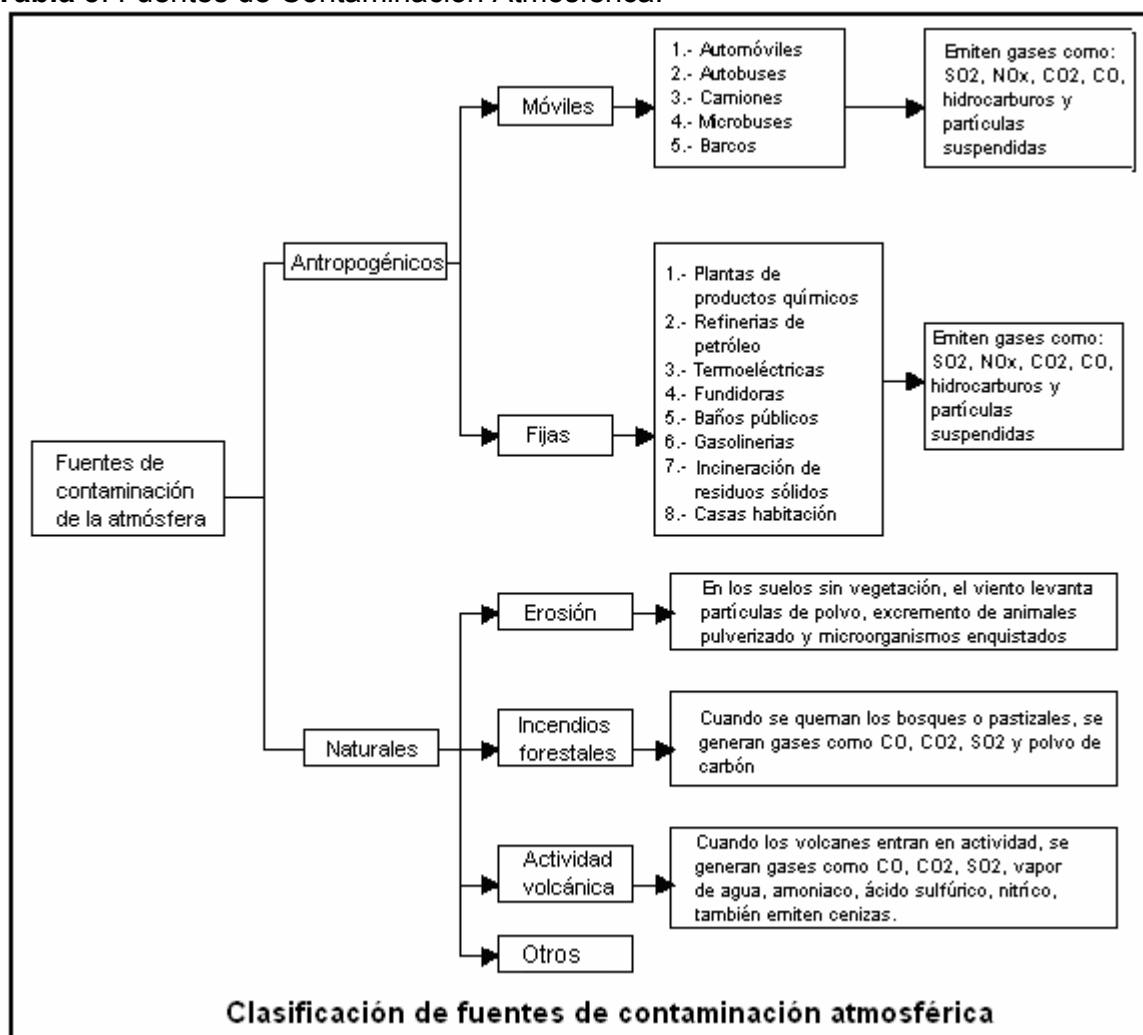
Fuentes Naturales	Contaminantes
Volcanes	SOx, Partículas
Incendios Forestales	CO, CO <sub>2</sub> , NOx, Partículas
Vegetación	Hidrocarburos, Polen
Vegetación en Descomposición	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S
Suelo	Polvo, Virus
Oleaje Marítimo	Partículas de sal

Comparación de los porcentajes de emisión de los contaminantes básicos debida a fuentes naturales y antropogénicas.

Gas	Producción Natural	Producción Antropogénica
NOx	88.70%	11.30%
CO	90.60%	9.40%
SO <sub>2</sub>	55.60%	43.70%
HC	84.50%	15.50%

b) **Fuentes antropogénicas:** Las fuentes antropogénicas son debidas a la actividad humana, originándose las principales emisiones por combustión de combustibles fósiles, procesos industriales, tratamientos y eliminación de residuos, etc.  
Clasificación:

- **Fuentes puntuales o Fijas:** cualquier instalación ubicada en un solo sitio con el propósito de ejecutar operaciones o procesos industriales, comerciales o de servicios, o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera, se estima que 130,000 establecimientos industriales la mayoría de los cuales se ubican en el norte y noroeste del Valle del México.
- **Fuentes móviles:** se consideran como fuentes móviles todas aquellas unidades motrices que sirven como medio de transporte y se impulsan mediante un proceso de combustión, donde la energía química del combustible se transforma en energía mecánica y se caracterizan por moverse en diversos sentidos por lo tanto contaminan a lo largo de su recorrido a este grupo pertenecen los vehículos automotores, de los cuales un 82% corresponde autos particulares y un 18% a vehículos oficiales, transporte urbano y de carga en la ZMCM (Díaz, 1999).
- **Fuentes de áreas.** Son todos aquellos establecimientos comerciales, industriales, habitacionales o lugares donde se desarrollan actividades que de manera individual emiten cantidades relativamente pequeñas de contaminantes y que por su tamaño no llegan a considerarse como fuentes puntuales, pero que en conjunto sus emisiones representan un aporte considerable de contaminantes a la atmósfera. La tabla 3 representa esquemáticamente esta clasificación de fuentes de contaminación atmosférica.

**Tabla 3.** Fuentes de Contaminación Atmosférica.

Fuente: National Geographic- Noviembre 2000.

### 1.8 Factores que afectan la concentración de los contaminantes en la atmósfera.

La concentración local de los contaminantes en la atmósfera del aire depende de la magnitud de las fuentes y eficiencia de la dispersión. Las variaciones cotidianas en las concentraciones afectadas por las condiciones meteorológicas o por los cambios en la magnitud de las fuentes emisoras. El viento es un elemento clave en la dispersión de los contaminantes del aire y de las emisiones, la concentración de los contaminantes tiene una relación inversa con la velocidad del viento. La turbulencia también es un factor importante.

La descripción de una fuente de emisión refleja las características, físicas y químicas, de las emisiones específicas y debe ser única para cada tipo de fuente. La descripción de una fuente de emisión de partículas puede incluir, una distribución de tamaño de partículas específica, un conjunto específico de compuestos orgánicos, un conjunto específico de compuestos de elementos, una proporción específica de compuestos de diversas características. De forma general, la descripción de la fuente de emisión puede clasificarse dependiendo sus características de actividad tanto físicas como químicas (Mitra et. al., 2002).

## 1.9 Características físicas y químicas de las partículas atmosféricas.

Cada partícula es diferente en forma, tamaño, composición, y al mismo tiempo tiene su historia particular en base a su origen, crecimiento, interacción y desaparición. El proceso de generación de partículas y su posterior eliminación es continuo y depende de las fuentes contaminantes en específico, ya sean naturales o antropogénicas, interviniendo de manera importante la meteorología y la topografía de la zona en estudio.

**a) Características físicas** (Tamaño, modo de formación y propiedades de sedimentación y ópticas): se relacionan principalmente con las propiedades físicas de la masa de partículas. Las principales características físicas son la distribución de tamaños, la masa, la densidad y la forma de las partículas.

**b) Características químicas** (Composición inorgánica y orgánica): se refiere principalmente a los constituyentes químicos o especies de la masa de partículas como elementos, compuestos orgánicos o combinación de ellos.

**c) Características biológicas** (Bacterias, virus, esporas, polen, etc.).

### 1.9.1 Tiempo de Sedimentación.

El tiempo de sedimentación de las partículas que se encuentran en el aire depende del tamaño, densidad y forma de las partículas. Aquellas partículas que midan más de 50  $\mu\text{m}$  se depositan rápidamente. Mientras más pequeñas sean, su tiempo de permanencia en la atmósfera será mayor y sus riesgos para la salud se incrementarán por tener mayor penetración en el sistema respiratorio.

### 1.9.2 Forma.

Para propósitos prácticos se considera a las partículas como esféricas a pesar de que la mayoría de estas presentan formas irregulares que depende de la naturaleza del material de que proceden y de la manera en que se han formado. Sus formas pueden ser prismáticas, esféricas, cúbicas, escamosas, fibrilares, de bastón, floculares o agregadas como se muestra en la figura 9.

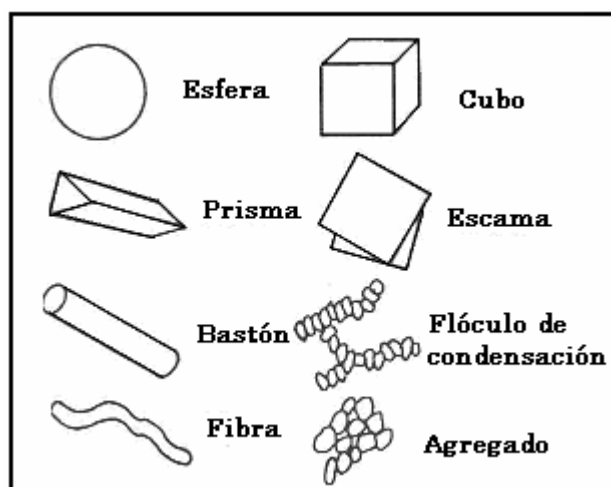


Figura 9. Diferentes Formas de las Partículas (OMS, 1992).

### 1.9.3 Superficie y Volumen.

La forma de una partícula determina la relación entre su superficie y su volumen. Cuanto más se aleje la partícula de la forma esférica mayor superficie tendrá por relación al volumen, esto influye en su velocidad de caída. La superficie de adsorción de una partícula comprende toda la superficie de ésta, incluida la de los poros accesibles desde el exterior. La reactividad de una partícula está íntimamente relacionada con su extensión superficial, pues a medida que el tamaño disminuye, la reactividad aumenta por aumentar rápidamente la superficie relativa. **Fuente:** World Health Organization, 2000.

La composición química y su tamaño de las partículas tienen una influencia directa en los efectos sobre la salud. Un estudio detallado de la composición química de partículas ha demostrado que algunos de sus componentes están asociados con daños específicos a la salud, principalmente algunos compuestos orgánicos, metales pesados y una gran variedad de especies químicas.

La superficie total (incluidos los poros accesibles desde el exterior) y la naturaleza fisicoquímica de una partícula determinan su capacidad para adsorber gases y vapores y retener cargas eléctricas.

Las propiedades de las partículas relacionadas con el área externa específica son: (1) adhesión, (2) fotodispersión, (3) carga electrostática, (4) capacidad de adsorción, (5) solubilidad y (6) velocidad de evaporación.

❖ **Propiedades de superficie.** Son muy importantes, ya que las partículas atmosféricas pueden participar en reacciones de adsorción o funcionar como catalizadores con gases reactivos. Asimismo, este tipo de reacciones pueden ocurrir en el sistema respiratorio una vez que han sido inhaladas.

❖ **Propiedades de movimiento.** Las partículas menores a  $0.1 \mu m$  presentan movimiento Browniano que se origina por colisiones entre moléculas individuales, ejemplo de ellas son las esporas y el polen. Las partículas entre  $0.1$  y  $1 \mu m$ , tienen velocidades de sedimentación muy pequeñas, las mayores de  $1 \mu m$  ya tienen una velocidad de sedimentación importante y varía en forma significativa dependiendo de las condiciones atmosféricas. Las partículas mayores a  $10 \mu m$  son removidas por gravedad y otros procesos inerciales en las cercanías de las fuentes donde se producen.

❖ **Propiedades ópticas.** Las partículas dependiendo de su tamaño y su composición pueden dispersar o absorber radiación solar. Con ello reducen la visibilidad provocando que se utilice más iluminación artificial cuya generación ocasiona la producción de más partículas en las plantas de generación de energía. Se ha propuesto la siguiente relación entre la concentración de las partículas y reducción de la visibilidad.

## 1.10 Efectos producidos por la presencia de partículas en la atmósfera.

Algunos de los efectos provocados por la presencia de partículas en la atmósfera se describen a continuación.

### 1.10.1 Visibilidad.

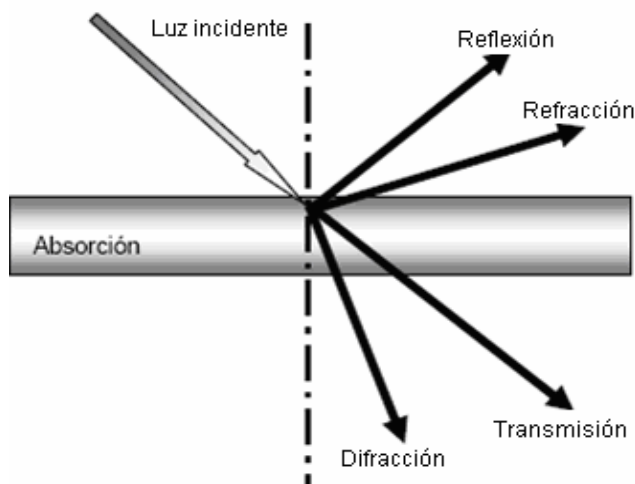
Entendiendo el concepto de visibilidad atmosférica como la máxima distancia a la cual un objeto es claramente perceptible en el horizonte, esta puede verse afectada por interferencias en el medio existente entre el objeto y el observador. La presencia de partículas en dicho medio provoca una reducción de la luz transmitida debido a los procesos de absorción y dispersión (scattering) asociados a las mismas. La absorción de luz visible es muy efectiva en partículas de tamaño similar al de su longitud de onda, en torno a  $1 \mu m$ ,

mientras que en el proceso de scattering lo es en un rango de tamaño de partículas más amplio, entre 0.1-1 $\mu$ m, que correspondería al modo de acumulación.

La degradación de la visibilidad es ocasionada por partículas finas que absorben o que dispersan la luz en una dirección diferente a la de la luz incidente. Algunas de estas partículas (partículas primarias) se emiten directamente a la atmósfera; otras (partículas secundarias) se forman en la atmósfera a partir de precursores gaseosos. (Pitchford et al., 1981; Farber et al., 1994; Horvath, 1995).

Las partículas reduce la visibilidad atmosférica ya que interactúa con la luz. Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo, la energía electromagnética puede interactuar con el sólido (o líquido) de las formas mostradas en la figura 10. Las interacciones ópticas asociados a este fenómeno, de las que puede ocurrir una, varias o todas las interacciones simultáneamente son:

- Reflexión (Rl)
- Refracción (Rf)
- Difracción (D)
- Absorción (A)
- Transmisión



**Figura 10. Interacción de energía electromagnética visible con un cuerpo.**

Cuando alguno de estos fenómenos sucede, la energía electromagnética intercambia parte de su contenido energético con el cuerpo y esta pérdida de energía se manifiesta como un cambio de longitud de onda. Físicamente este fenómeno se traduce en distorsiones a la visibilidad. La absorción aumenta la energía interna del cuerpo y los demás fenómenos se pueden agrupar en un único término denominado dispersión.

Las partículas que se encuentran suspendidas en el aire reducen la visibilidad al dispersar y absorber la luz que reflejada de un objeto y de su fondo, aminorando el contraste de ambos.

### **1.10.2 Efectos en la Salud.**

La exposición a contaminantes del aire puede causar efectos agudos (corto plazo) y crónicos (largo plazo) en la salud. Usualmente, los efectos agudos son inmediatos y reversibles cuando cesa la exposición al contaminante. Los efectos agudos más comunes son la irritación de los ojos, dolor de cabeza y náuseas. A veces los efectos crónicos tardan en manifestarse, duran indefinidamente y tienden a ser irreversibles. Los efectos crónicos en la salud incluyen la disminución de la capacidad pulmonar y enfermedades o afectaciones al

sistema respiratorio debido a un prolongado período de exposición a contaminantes tóxico del aire.

Las partículas sólidas impactan las paredes de la tráquea, bronquios y bronquiolos. La mayoría de estas partículas se eliminan en el sistema respiratorio mediante la acción de limpieza (barrido) de los cilios, pequeños filamentos de las paredes de los pulmones.

Las partículas sumamente pequeñas pueden alcanzar los alvéolos, donde a menudo toma semanas, meses o incluso años para que el cuerpo las elimine y producir efectos indeseables a la salud.

El sistema respiratorio constituye la principal vía de entrada de partículas en el organismo. La deposición de las partículas en diferentes partes del cuerpo depende del tamaño, forma y densidad de las partículas, así como de la respiración del individuo (nasal u oral). Posteriormente, los efectos que pueden inducir las partículas en el organismo dependen de la granulometría, la morfología y la composición química de las partículas, el tiempo de exposición y la susceptibilidad de cada persona. Todas las partículas de diámetro  $<10 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ , partículas torácicas) tienen un tamaño suficiente para penetrar en la región traqueobronquial (Figura 11), pero sólo aquellas de diámetro  $<2.5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ , partículas alveolares) pueden alcanzar la cavidad alveolar y, por tanto, provocar mayores afecciones.

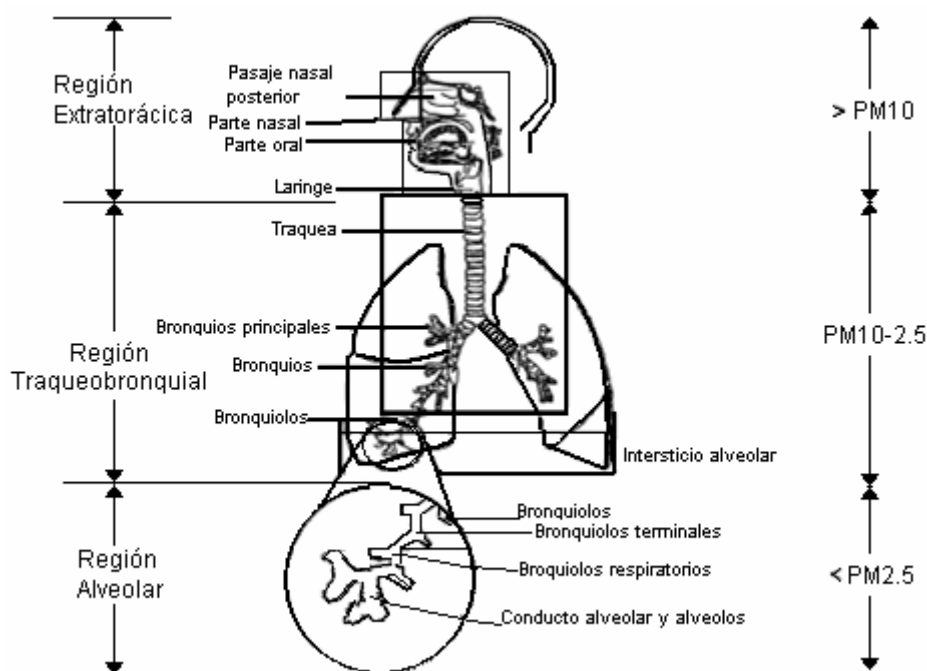
La epidemiología y toxicología de las partículas en el ambiente es un área activa de investigación, en la que se intensifican esfuerzos para encontrar efectos adversos a la salud. La evidencia, encontrada en los estudios, sugiere que la concentración de masa es uno de los parámetros más apropiados para medir los efectos adversos a la salud, pero los estudios necesitan considerar otros aspectos como el número de partículas, la morfología de ellas y una especificación química detallada (Lighty et. a., 2000).

Gran parte del conocimiento sobre los efectos de la contaminación atmosférica en la salud proviene de estudios que analizan las fluctuaciones diarias en el número de muertes, las admisiones a hospitales, y los síntomas respiratorios, estudiados a la par con las fluctuaciones diarias en los niveles de contaminación del aire en las grandes ciudades (por ejemplo Filadelfia, Londres, la Ciudad de México) alrededor del mundo.

Los hallazgos más claros y consistentes de estos estudios se relacionan con los incrementos en mortalidad debidos a partículas  $\text{PM}_{10}$ . Se estima que por cada incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en los niveles de  $\text{PM}_{10}$ , se puede esperar un aumento de 1% en la mortalidad diaria. La mayor parte de estas muertes adicionales se debe a causas cardiovasculares, y ocurre probablemente en gente relativamente mayor que sufre de enfermedades coronarias. Existe sin embargo, alguna evidencia reciente (aunque sin confirmar) que indica que algunas de estas muertes prematuras pueden registrarse en infantes. Con una población del tamaño de la que tiene la ZMCM, cercana a los 20 millones, y con una tasa anual de muertes de aproximadamente 5/1000, estudios implican que una reducción de 10 % en las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  podrá reducir el número de muertes prematuras en la ZMCM en hasta 1000 muertes cada año.

Tal vez lo más preocupante es la posibilidad de que la exposición de largo plazo a  $\text{PM}_{10}$  pueda incrementar la mortalidad crónica debida a causas respiratorias y cardiovasculares (esto es, la mortalidad no relacionada día a día con la contaminación). Dos grandes estudios desarrollados en los Estados Unidos sugieren que información existe. Estos resultados no han sido confirmados en México, pero de ser reales en las conclusiones de ZMCM, provocarían impactos en salud (en términos de disminución en la esperanza de vida) que podrían ser varias veces mayores que los impactos de la mortalidad aguda (esto es, la relacionada con las fluctuaciones diarias en la contaminación).

Dentro de las  $PM_{10}$ , las partículas de mayor impacto en la salud son las menores a  $2.5\mu m$  ( $PM_{2.5}$ ). Las  $PM_{2.5}$  han cobrado particular interés ya que puede penetrar hasta los alvéolos de los pulmones donde se depositan las partículas pudiendo causar la muerte por exposición crónica. Las  $PM_{2.5}$  no se mide regularmente y no existe una Norma Oficial Mexicana, pero se estima que está última será de 60 a  $65\text{ mg/m}^3$  promedio en 24 horas. Aun más, considerando la norma anual promedio de  $PM_{10}$  de  $50\text{ mg/m}^3$  se estima que en la ZMCM ha violado esta norma los últimos años.



**Figura 11. Representación esquemática de las diversas regiones del aparato respiratorio humano (Según EPA, 2002).**

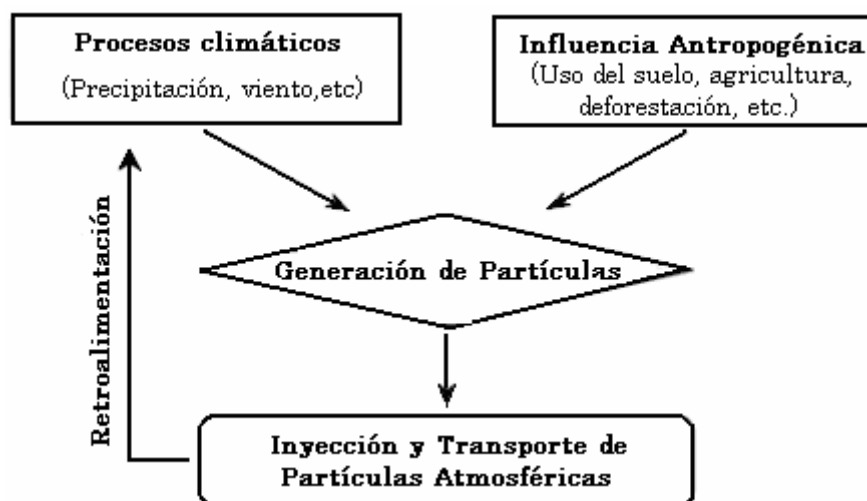
### 10.3 Efectos sobre el clima.

Las partículas atmosféricas a nivel troposférico ejercen un importante papel en el balance radiactivo terrestre y por consiguiente sobre el clima global de la tierra. Pese a que en un principio no se habían tomado en cuenta en el cambio climático, actualmente se considera que su influencia es tan importante como la de los gases de efecto invernadero (Preining, 1991) si bien en una escala más pequeña, por efecto del tiempo de residencia en la atmósfera de los mismos.

En cualquier caso la presencia de partículas en la atmósfera, afecta de dos maneras distintas al balance reactivo terrestre. Por un lado actúa directamente sobre la radiación solar incidente a través de procesos de reflexión, dispersión y absorción de la misma mientras que por otro lo hace de un modo indirecto modificando las características de la cobertura nubosa (Arimoto, 2001, Figura 12).

Esto es debido a que las gotas de nube se forman preferentemente sobre pequeñas partículas giroscópicas, que facilitan la condensación de vapor de agua sobre su superficie. Se denominan núcleos de condensación y ejemplos de las mismas son las partículas de sal de origen marino o de ácido sulfúrico y nítrico entre otras, sin la presencia de las cuales serían necesarias condiciones de sobresaturación muy por encima del 100% de humedad

relativa. Por ello determinan la distribución de tamaños de las gotas y el espesor y tiempo de vida de las nubes. (IPCC, 2001).



**Figura 12.** Interacción entre las partículas atmosféricas y el clima, considerando la influencia del factor antropogénico (según Arimoto, 2001).

#### 1.10.4 Efectos en Ecosistemas y otros materiales.

Los ecosistemas también sufren los efectos directos o indirectos de la exposición de las partículas atmosféricas, tanto por deposición seca como húmeda. Estos efectos adversos se producen bajo la acción de las partículas atmosféricas pero también cuando éstas actúan como soporte para otros contaminantes atmosféricos. Las partículas de mayor diámetro (moda gruesa) tales como el polvo mineral, al depositarse sobre las hojas de las plantas pueden reducir la capacidad de intercambio gaseoso así como afectar a la fotosíntesis, lo cual limita el crecimiento (WBG, 1998). Cuando las partículas se depositan sobre la superficie terrestre, las concentraciones de metales presentes en las partículas pueden afectar a las características edáficas e inhibir funciones como la toma de nutrientes por parte de las plantas. Asimismo, la deposición de las partículas atmosféricas puede suponer la acidificación, eutrofización de suelos y aguas superficiales, lo cual a su vez puede repercutir sobre la composición de las aguas subterráneas. En el área Mediterránea la acidificación de los suelos y agua puede ser contrarrestada por la alcalinidad de los suelos, pero este efecto puede ser importante para el desarrollo de la vegetación.

Al margen de estos efectos, en los entornos urbanos las partículas pueden contribuir a la alteración de los materiales de construcción y recubrimientos, debido al depósito de las partículas en la superficie de los materiales y su interacción con ellos. La transformación de estos materiales puede estar relacionada tanto con las partículas atmosféricas como con los principales gases asociados ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , Alastuey, 1994). Una de las formas más frecuentes de alteración de los materiales de construcción es la formación de costras de yeso (denominadas costras negras) como resultado de la interacción en medio acuoso entre  $\text{SO}_2$  y el carbonato cálcico presente en los materiales pétreos (Laurenzi Tabasso y Marabelli, 1992). La formación de estas costras negras se produce esencialmente en zonas protegidas del lavado en las que se favorece la acumulación de humedad, ya que bajo estas condiciones la velocidad de reacción es máxima (Camuffo, 1998). Además del oscurecimiento de estas superficies, la reacción de las partículas depositadas con el substrato puede dar lugar a graves problemas de corrosión de los materiales, especialmente en el caso de estructuras metálicas. Todo ello puede redundar en la reducción de la vida útil de las edificaciones y pérdidas importantes para los enclaves de interés histórico.



Finalmente, la alteración de los materiales de construcción conlleva importantes gastos económicos en las intervenciones necesarias para disminuir o evitar estos efectos adversos.

**Tabla 4.** Efectos Observados de las Partículas.

Concentración	Tiempo de Medición	Efectos
60-180 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	Media geométrica anual, con $\text{SO}_2$ y humedad	Aceleración en la corrosión de las laminas de acero y zinc
75 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	Media anual	Norma de calidad del aire ambiente
150 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	Humedad relativa menor del 70 porciento	Visibilidad reducida a 5 millas
100-150 $\mu\text{m}/\text{m}^3$		Luz solar directa reducida en un tercio
80-100 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	Con niveles de sulfatación de 30 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$	Puede ocurrir un aumento en la tasa de mortalidad de personas mayores de 50 años
100-130 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	Con $\text{SO}_2 > 120 \mu\text{m}/\text{m}^3$	Es posible que los niños experimenten un aumento en la incidencia de las enfermedades respiratorias
300 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	Máximo de 24 h y $\text{SO}_2 > 630 \mu\text{m}/\text{m}^3$	En los pacientes con bronquitis crónica puede que se presente empeoramiento agudo de los síntomas
750 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	Promedio de 24 h. y $\text{SO}_2 > 715 \mu\text{m}/\text{m}^3$	Puede ocurrir un número excesivo de muertes y un considerable aumento en las enfermedades

**Fuente:** Compendió de datos presentados en el Air Quality for Particulate Matter de la National Air Pollution Control Administration AP-49, Washington, D.C.:HEW, 1969.

**CAPITULO II**

## **MARCO REGULATORIO EN MEXICO Y EN ESTADOS UNIDOS APLICABLE PARA LA MEDICIÓN DE PARTICULAS EN FUENTES FIJAS.**

Es importante aclarar que no existen criterios únicos a nivel internacional para definir las situaciones de contingencia ambiental, ya que cada país determina distintos estándares considerando los factores particulares y la situación ambiental específica del país.

A continuación presentamos muy brevemente el caso de México y Estados Unidos.

Los cambios producidos en el medio ambiente debido a los contaminantes son diversos, y en el caso de los contaminantes del aire, no existe excepción; por eso es necesario delimitar sus efectos con respecto a posibles cambios que produzcan. Como se sabe, la contaminación del aire se deriva a partir de sustancias que cuando están presentes en ciertas cantidades en la atmósfera, que afectan de manera adversa a un sistema, o interfieren con el uso pleno del mismo.

La identificación de los efectos de la contaminación del aire condujo a la clasificación de los contaminantes principales que reciben el nombre de contaminantes criterio, que sirven de referencia para la medición de la calidad del aire. El conjunto de límites de concentración basados en los efectos en la salud se llama estándares primarios. Otro conjunto de límites diseñado para prevenir daños ambientales o a la propiedad se llaman estándares secundarios. Por esta razón, se han ido regulado desde hace mucho tiempo mediante normas, que pueden variar de un país a otro (EPA, 2005).

En lo que respecta a los contaminantes del aire, el control jurisdiccional esta en manos de los diversos niveles gubernamentales de cada país, basados en instituciones especializadas. Un organismo con reconocimiento internacional es la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA), que se encarga de analizar información reciente sobre los efectos en la salud, ecosistemas y en los materiales de los contaminantes en el medio ambiente. Este análisis conduce a revisiones del National Ambient Air Quality Standards (US-NAAQS), que aporta indicadores o normas de calidad del aire que permitan regular los contaminantes en el aire ambiente así como sus fuentes de emisión. Un ejemplo de esto, en el caso de partículas, resulto en la inclusión reciente de un nuevo indicador para medir las concentraciones de las partículas respirables, las llamadas  $PM_{2.5}$ , definidas como partículas menores o iguales que a 2.5 micrómetros de diámetro aerodinámico medio (DAM).

Las políticas de control de la contaminación atmosférica tiene como base fundamental el cumplimiento con las normas de calidad de aire. Estas establecen las concentraciones máximas permisibles de contaminantes para asegurar el bienestar y la protección de la salud de la población, aunque en ocasiones existen otras normas, llamadas secundarias, que tienen como base otros criterios como son efectos en la fauna, flora o aun en materiales específicos del sitio de estudio (Nevers et al., 1977).

## 2.1 MARCO REGULATORIO EN MÉXICO.

México, la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) fija los límites en la Norma de Calidad del Aire a nivel federal.

### **Legislación Ambiental Mexicana Referente a la Contaminación Atmosférica en Fuentes Fijas.**

Las características geográficas y climáticas de la ZMCM y sus emisiones a la atmósfera, son consideradas como los principales factores que condicionan la acumulación o dispersión de los contaminantes.

La contaminación atmosférica es un fenómeno que responde a múltiples factores, lo que hace compleja una gestión exitosa de la política ambiental. Por esta razón resulta importante legislar cada componente que pueda resultar desfavorable a la salud humana. Así entonces, los esfuerzos han sido dirigidos desde hace décadas a la regulación de cada uno de dichos factores, como pueden ser; fuentes fijas, combustibles, etc. Considerando un basto numero de factores como los mecanismos económicos, institucionales, normativos y regulatorios, capaces de llevar a la práctica estas posibilidades, cada una de ellas conlleva distintas opciones tecnológicas, con un determinado costo-beneficio y un impacto social y económico diferente siendo la principal consideración la salud publica (Serrano, 1996).

De esta manera, las alternativas fundamentales para una política de gestión de la calidad de aire incluyen:

- La salud publica,
- Educación ambiental, comunicación y participación ciudadana así como en la clase política,
- Mejoramiento de los combustibles empleados,
- La racionalización y reestructuración del transporte urbano,
- Modernización de las tecnologías de producción,
- La instalación de sistemas de control de emisiones vehiculares e industriales,
- El rescate de áreas ecológicas sensibles o deterioradas,
- El manejo conveniente de los residuos sólidos.

Estas alternativas son consideradas en los diferentes sectores causantes de la contaminación y se aplican en función de su pertinencia tecnológica, económica e impacto en la reducción de emisiones, pero ante todo la salud de la población.

Unos de los aspectos que resaltan en el caso de las normas de calidad del aire de partículas suspendidas es que los Estados Unidos, la Organización Mundial de la Salud y la Unión Europea han dejado de usar a las PST como indicador de los efectos sobre la salud y las han remplazado por  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . En el caso de México así como otros países mantienen a las PST como indicador de la norma de calidad del aire. Recientemente, en septiembre de 2005 se publico en el Diario Oficial de la Federación la modificación a la Norma Oficial Mexicana 025 en materia de salud para Partículas Suspendidas en la cual se indagó el indicador de  $PM_{2.5}$ . Los cambios más sobresalientes son: La forma como evalúan los indicadores para el promedio de 24 horas de las fracciones PST,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . La restricción a los estándares de 24 horas de PST y  $PM_{10}$  quedó en 210 y 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Los nuevos estándares de  $PM_{2.5}$  de 24 horas y anual (65 y 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente) los cuales son similares en otras Ciudades (tabla 5). La exclusión del indicador anual de PST y finalmente reporta a condiciones actuales los estándares de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  (NOM-025, 2005).

**Tabla 5.** Estándares de calidad del aire de PM<sub>2.5</sub> para algunos países y Ciudades de América y Europa.

Pais o Ciudad	Estándar anual (Media aritmética)	Estándar de 24 horas
Ciudad de Buenos Aires	15 µg/m <sup>3</sup>	65 µg/m <sup>3</sup> (**)
Chile	20 µg/m <sup>3</sup>	40 µg/m <sup>3</sup> (**)
Canada	15 µg/m <sup>3</sup>	30 µg/m <sup>3</sup> (**)
EE.UU.	15 µg/m <sup>3</sup>	65 µg/m <sup>3</sup> como percentil 99
Los Ángeles	12 µg/m <sup>3</sup>	65 µg/m <sup>3</sup> como percentil 99
<b>México</b>	15 µg/m <sup>3</sup>	65 µg/m <sup>3</sup> como percentil 98
Reino Unido	15 µg/m <sup>3</sup>	65 µg/m <sup>3</sup> (**)

\* Todas las provincias excepto Québec.  
\*\* No se puede comprobar si el valor corresponde a un percentil.

### 2.1.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece en sus **Artículos 4, 25 y 27** lo siguiente:

**Artículo 4.** Este artículo establece el derecho a la protección a la salud que comprende de manera parcial el derecho a un medio ambiente sano, en los términos de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Es decir, incluye la idea de la protección de la salud humana ante los efectos adversos del ambiente.

**Artículo 25.** Bajo criterios de equidad social y productividad se apoyará e impulsará a las empresas de los sectores social y privado de la economía, sujetándolos a las modalidades que dicte el interés público y al uso, en beneficio general, de los recursos productivos, cuidando su conservación y el medio ambiente.

**Artículo 27.** Otorga un sustento legal a la protección de los recursos naturales al disponer que la nación tendrá el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación.

### 2.1.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

Esta ley tiene como antecedentes a la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental y la Ley Federal de Protección al Ambiente.

El Título Cuarto de esta ley se refiere a la Protección Ambiental. Dentro de este título, el Capítulo Segundo se aboca a la Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, previendo la regulación de las Normas Oficiales Mexicanas en materia de los Contaminantes Criterio.

**Tabla 6.** Normas Oficiales Mexicanas de Contaminantes Criterio.

Contaminante NOM	Principio de Detección	Valores Limite Permisibles		
		Exposición Aguda		Exposición Crónica
		Concentración y tiempo promedio	Frecuencia Máxima Aceptable	Concentración y tiempo promedio
Ozono, (O <sub>3</sub> ) NOM-020-SSA1-1993	Químico-luminiscente. Fotometría de luz UV.	0.11 ppm (216 µg/m <sup>3</sup> ) (1 hora)	1 vez al año en 3 años	
Monóxido de Carbono (CO) NOM-021-SSA1-1993	Infrarrojo No dispersivo (NDIR).	11 ppm (12595 µg/m <sup>3</sup> ) (8 horas)	1 vez al año	
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ) NOM-022-SSA1-1993	Fluorescencia Pulsante.	0.13 ppm (341 µg/m <sup>3</sup> ) (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm (79 µg/m <sup>3</sup> ) promedio anual
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) NOM-023-SSA1-1993	Químico-luminiscente.	0.21 ppm (395 µg/m <sup>3</sup> ) (1 hora)	1 vez al año	
Partículas Suspendidas Totales (PST) NOM-024-SSA1-1993	Gravimétrico.	260 (µg/m <sup>3</sup> ) 24 hrs.	1 vez al año	75 (µg/m <sup>3</sup> ) Promedio anual.
Partículas menores a 10 µm (PM <sub>10</sub> ). NOM-025-SSA1-1993	Gravimétrico.	150 (µg/m <sup>3</sup> ) 24 hrs.	1 vez al año	50 (µg/m <sup>3</sup> ) Promedio anual.
Partículas menores a 2.5 µm (PM <sub>2.5</sub> ). NOM-025-SSA1-1993	Gravimétrico.	65 (µg/m <sup>3</sup> ) 24 hrs.	1 vez al año	15 (µg/m <sup>3</sup> ) Promedio anual.
Proyecto de NOM. Plomo (Pb). NOM-026-SSA1-1993	Espectroscopia de Absorción atómica			1.5 (µg/m <sup>3</sup> ) Promedio anual.

\*SEMARNAT, 1998.

### 2.1.3 Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera (Publicado en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 25 de Noviembre de 1998).

Representa la última instancia jerárquica en materia del control de la contaminación de la atmósfera. Dentro de este Reglamento el apartado segundo se refiere a la emisión de contaminantes a la atmósfera, generada por fuentes fijas se contemplan en los **Artículos 16 y 17**.

**Artículo 16.-** Las emisiones de olores, gases, así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera que se generen por fuentes fijas, no deberán exceder los niveles máximos permisibles de emisión e inmisión, por contaminantes y por fuentes de contaminación que se establezcan en las normas técnicas ecológicas que para tal efecto expida la Secretaría en coordinación con la Secretaría de Salud, con base en la determinación de los valores de concentración máxima permisible para el ser humano de contaminantes en el ambiente que esta última determina.

**Artículo 17.-** Los responsables de las fuentes fijas de jurisdicción federal, por las que se emitan olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera estarán obligados a:

- I. Emplear equipos y sistemas que controlen las emisiones a la atmósfera, para que éstas no rebasen los niveles máximos permisibles establecidos en las normas técnicas ecológicas correspondientes;
- II. Integrar un inventario de sus emisiones contaminantes a la atmósfera, en el formato que determine la Secretaría;

- III. Instalar plataformas y puertos de muestreo;
- IV. Medir sus emisiones contaminantes a la atmósfera, registrar los resultados en el formato que determine la Secretaría y remitir a ésta los registros, cuando así lo solicite;
- V. Llevar a cabo el monitoreo perimetral de sus emisiones contaminantes a la atmósfera, cuando la fuente de que se trate se localice en zonas urbanas o suburbanas, cuando colinde con áreas naturales protegidas, y cuando por sus características de operación o por sus materias primas, productos y subproductos, puedan causar grave deterioro a los ecosistemas, a juicio de la Secretaría;
- VI. Llevar una bitácora de operación y mantenimiento de sus equipos de proceso y de control;
- VII. Dar aviso anticipado a la Secretaría del inicio de operación de sus procesos, en el caso de paros programados y de inmediato en el caso de que éstos sean circunstanciales, si ellos pueden provocar contaminación;
- VIII. Dar aviso inmediato a la Secretaría en el caso de falla del equipo de control, para que ésta determine lo conducente, si la falla puede provocar contaminación, y
- IX. Las demás que establezcan la Ley y el Reglamento.

Los **Artículos 23 y 24** se refieren a las características de las chimeneas que emiten los contaminantes.

**Artículo 23.-** Las emisiones de contaminantes atmosféricos que se generen por las fuentes fijas de jurisdicción federal, deberán canalizarse a través de ductos o chimeneas de descarga.

Cuando por razones de índole técnica no puedan cumplirse con lo dispuesto por este artículo, el responsable de la fuente deberá presentar a la Secretaría un estudio justificativo para que ésta determine lo conducente.

**Artículo 24.-** Los ductos o las chimeneas a que se refiere el artículo anterior, deberán tener la altura efectiva necesaria, de acuerdo con la norma técnica ecológica correspondiente, para dispersar las emisiones contaminantes.

Los **Artículos 25 y 26** adjudican a las Normas Técnicas Ecológicas y a las Normas Oficiales Mexicanas los procedimientos de muestreo y de calibración de los equipos de medición, así como los requerimientos de las plataformas y los puertos que permitan realizar el muestreo.

## 2.1.4 Normas Oficiales Mexicanas Vigentes para Contaminantes Atmosféricos (NOM).

**Tabla 7.** Normas de Protección a la Salud de la Población por Partículas Suspendidas.

Norma de emisión	Regulación
NOM-024-SSA1-1993	Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a partículas suspendidas totales (PST). Valor permisible para la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
NOM-025-SSA1-1993	Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a partículas menores que 10 $\mu\text{m}$ ( $\text{PM}_{10}$ ) y 2.5 $\mu\text{m}$ ( $\text{PM}_{2.5}$ ). Valor permisible para la concentración de partículas de 10 $\mu\text{m}$ ( $\text{PM}_{10}$ ) y 2.5 $\mu\text{m}$ ( $\text{PM}_{2.5}$ ) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
NOM-CCAT-006-ECOL-1993	Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.

**Tabla 8.** Normas de Protección a la Salud de la Población.

Norma de emisión	Regulación
NOM-020-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al Ozono. Valor permisible para la concentración de Ozono en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
NOM-021-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a Monóxido de Carbono. Valor permisible para la concentración de Monóxido de Carbono en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
NOM-022-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a Dióxido de Azufre. Valor permisible para la concentración de Dióxido de Azufre en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
NOM-023-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a Dióxido de Nitrógeno. Valor permisible para la concentración de Dióxido de Nitrógeno en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
NOM-026-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al Plomo. Valor permisible para la concentración de Plomo en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.

**Tabla 9.** Normas de Emisión de otros Contaminantes a la Atmósfera.

Norma de emisión	Regulación
NOM-039-ECOL-1993	Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido y trióxido de Azufre y neblinas de Ácido sulfúrico, en plantas productoras de Ácido sulfúrico.
NOM-040-ECOL-1993	Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas así como los requisitos de control de emisiones fugitivas, provenientes de las fuentes fijas dedicadas a la fabricación del cemento.
NOM-041-ECOL-1999	Limites permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.
NOM-042-ECOL-1999	Niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas provenientes del escape de vehículos automotores nuevos en planta, así como los hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel del mismo, con peso bruto vehicular que no exceda los 3, 857 kgs.



NOM-043-ECOL-1993	Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.
NOM-044-ECOL-1993	Niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas totales y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular que no exceda los 3, 857 kgs.
NOM-045-ECOL-1996	Niveles máximos permisibles de opacidad de humo proveniente del escape de vehículos automotores en circulación que usan diesel o mezclas que incluyan diesel como combustible.
NOM-046-ECOL-1993	Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido de Azufre, neblinas de trióxido de Azufre y Ácido sulfúrico, provenientes de procesos de producción de Ácido Dodecilbencensulfónico en fuentes fijas.
NOM-048-ECOL-1993	Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.
NOM-050-ECOL-1993	Establece los niveles máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de vehículos automotores en circulación que usan gas licuadote petróleo, gas natural, u otros combustibles alternos como combustible.
NOM-051-ECOL-1993	Establece los niveles máximos permisibles en peso de azufre en el combustible líquido gasóleo industrial que se consuma por las fuentes fijas en la zona metropolitana de la Ciudad de México.
NOM-075-ECOL-1995	Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles provenientes del proceso de los separadores agua-aceite de las refinerías del petróleo.
NOM-076-ECOL-1995	Establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno provenientes del escape, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural, y otros combustibles alternos y que se utilizan en la propulsión de vehículos automotores, con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kgs. Nuevos en planta.
NOM-085-ECOL-1994	Establece para Fuentes Fijas, que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de Azufre y óxidos de nitrógeno, los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de Azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.
NOM-097-ECOL-1995	Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas y óxidos de nitrógeno en los procesos de fabricación de vidrio en el país.
NOM-105-ECOL-1996	Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas totales y compuestos de azufre reducido total proveniente de los procesos de recuperación de químicos de las planta de fabricación de celulosa.
NOM-121-ECOL-1997	Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles provenientes de las operaciones de recubrimiento de carrocerías nuevas en plantas de automóviles, unidades de uso múltiple, de pasajeros y utilitarios; carga y camiones ligeros, así como el método para calcular sus emisiones.
NOM-123-ECOL-1998	Establece el contenido máximo permisible de compuestos orgánicos volátiles, en la fabricación de pinturas de secado al aire base disolvente para uso doméstico y los procedimientos para la determinación del contenido de los mismos en pinturas y recubrimientos.

**Tabla 10.** Normas de emisión en función del tipo de fuente.

Fuente Fija Afectada		
Tipo de Fuente	Contaminantes regulados	Norma de Emisión
Fuente Fija. Planta de cemento	Partículas.	NOM-039-ECOL-1993
Fuente Fija. Planta Carboeléctrica	Partículas, NO, SO <sub>2</sub> y CO.	NOM-PA-005-93
Fuente Fija. Plantas con sistemas de combustión indirecta y directa operadas con combustibles líquidos y gaseosos.	Partículas, Opacidad, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO.	NOM-085-ECOL-1994
Fuente Fija. Cualquiera con equipos de proceso con emisiones potenciales de partículas sólidas.	Partículas.	NOM-043-ECOL-1993
Fuentes Móviles. Vehículos automotores	Partículas, Opacidad, HC, NO <sub>x</sub> , CO.	NOM-044-ECOL-1993

**Tabla 11.** Norma Oficial Mexicana referente al monitoreo ambiental.

Monitoreo Ambiental	Regulación
NOM-035-ECOL_1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición.

### 2.1.5 Normas Técnicas Mexicanas (NMX).

**Tabla 12.** Normas Técnicas Vigentes para Contaminación Atmosférica.

Normas Técnicas que enuncian los procedimientos para la caracterización de emisiones provenientes de fuentes fijas en ductos.	
NMX-AA-023-1986	“Terminología”.
NMX-AA-035-1976	“Determinación de bióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno en los gases de combustión”.
NMX-AA-054-1978	“Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto” Método Gravimétrico.
NMX-AA-055-1979	“Determinación de Bióxido de Azufre en gases que fluyen por un conducto”.
NMX-AA-056-1980	“Determinación de Bióxido de Azufre y neblinas de ácido sulfúrico en los gases que fluyen por un conducto”.
NMX-AA-069-1980	“Determinación de Ácido Sulfhídrico en gases que fluyen por un conducto”.
NMX-AA-070-1980	“Determinación de Cloro y Cloruros en los gases que fluyen por un conducto”
NMX-AA-090-1986	“Determinación de Neblina de Ácido Fosforito en los gases que fluyen por un conducto”.
NMX-AA-097-1986	“Determinación de Amoníaco en los gases que fluyen por un conducto”.
NMX-AA-098-1986	“Determinación de la concentración de Tricloro Etileno en los gases que fluyen por un conducto”.
NMX-AA-107-1988	“Calidad del Aire. Estimación de la altura efectiva de chimenea y de la dispersión de contaminantes-Método de Prueba”

NMX-AA-009-1993	“Determinación del flujo de gases en un conducto por medio del tubo pitot”
NMX-AA-010-2001	“Determinación de la emisión de partículas contenidas en los gases que fluyen por un conducto. Método Isocinético”.

## 2.2 MARCO REGULATORIO EN ESTADOS UNIDOS.

En Estados Unidos, la Agencia de Protección al Ambiente (EPA, por sus siglas en inglés) fija límites llamados Estándares Ambientales Nacionales de la Calidad del Aire (NAAQS).

En los países desarrollados, las normas de calidad del aire se revisan periódicamente con base en estudios epidemiológicos, toxicológicos, y de exposición en animales y en humanos. Estos estudios tratan de identificar el nivel más bajo de contaminación que es capaz de causar un impacto detectable en la salud de un grupo de la población sensible. Por ejemplo, la concentración más baja de ozono que es capaz de producir una disminución medible (por pequeña que esta sea) en la capacidad respiratoria de individuos susceptibles, como los asmáticos. Una vez identificado este límite, se añade un margen de seguridad para proporcionar mayor certeza de que la inmensa mayoría de la población, si no es que toda, estará protegida si no se rebasa el límite de contaminación así establecido.

Es importante aclarar que no existen criterios únicos a nivel internacional para definir las situaciones de contingencia ambiental específica ya que cada país determina distintos estándares considerando los factores particulares y la situación ambiental específica del país.

De esta manera, se tiene el enfoque en el caso del control de la contaminación del aire, de lograr un control de emisiones hasta el nivel más bajo posible congruente con la tecnología disponible y dentro de los límites de un costo razonable.

Las normas national ambient air quality standards (NAAQS), normas nacionales para la calidad del aire ambiental para partículas fueron establecidas por primera vez en 1971. Estos estándares aplicados a las partículas suspendidas totales (PST) tal como se mide mediante un muestreador de altos volúmenes. El diseño de muestreador favoreció la colección de partículas con diámetros aerodinámicos hasta de 50  $\mu\text{m}$ . En 1987, la EPA cambió el indicador para las PST a la  $\text{PM}_{10}$ . Los niveles de la norma NAAQS para las  $\text{PM}_{10}$  fueron establecidos para promedio de 24 horas de 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (con no más de un sobrepeso anticipado por año), y un promedio anual de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (promedio aritmético anticipado). En 1997, la EPA revisó la forma de la norma NAAQS para las  $\text{PM}_{10}$  de 24 horas (diaria) y estableció la  $\text{PM}_{2.5}$  como un nuevo indicador de partículas finas.

Previo a la revisión, la norma NAAQS para las  $\text{PM}_{10}$  de 24 horas fue cumplida cuando el número anticipado de días por año de calendario con una concentración promedio de 24 horas por encima de 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  fue menor o igual a uno (promediada durante 3 años de calendario). La norma revisada para las  $\text{PM}_{10}$  de 24 horas se cumple cuando el porcentaje es de 99% de la distribución de las concentraciones de 24 horas en cada monitor en una zona por un período de un año (promediado sobre 3 años de calendario) no supere los 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La norma anual para  $\text{PM}_{10}$  no fue impactada por las revisiones de 1997.

Las nuevas NAAQS para la  $\text{PM}_{2.5}$  están establecidas en una concentración promedio anual menor o igual a 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y una concentración de 24 horas (diaria) menor o igual a 65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El estándar anual se cumple cuando el promedio de tres años del promedio aritmético anual

de las concentraciones de 24 horas durante un período de un año (promediado sobre 3 años de calendario) no excede los  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en cada monitor dentro de una zona.

En EE UU, la mayoría de los reglamentos que rigen los muestreos de aire, agua y residuos sólidos se pueden encontrar en la ley de de Aire Limpio y sus enmiendas (CAA), Ley de Agua Limpia (CWA) y la ley de Conservación de Recurso y Recuperación (RCRA).

Ley de Aire Limpio. La prueba de chimeneas y de la contaminación ambiental se especifica con los subtítulos CAA (Ley de Aire limpio) como las Nuevas Normas de Operación para Fuentes y las Normas Nacionales de Emisiones de los Contaminantes peligrosos del Aire (NESHAPS). Cada uno de estos subtítulos contiene sus propias exigencias para los muestreos y los análisis de aire.

Recientemente la EPA revisó los estándares para ozono y  $\text{PM}_{10}$ , modificando el primero a un valor promedio de 8 horas, y propuso el uso de un nuevo estándar para  $\text{PM}_{2.5}$ . El 18 de julio de 1997, la EPA publicó las reformas a estos dos estándares; la revisión de las concentraciones fijadas en ellos obedeció principalmente a los efectos importantes que tienen sobre la salud de la población. Los estándares Mexicanas son en su mayoría similares a las Estadounidenses.

La EPA estima que con el cambio en los valores de estos contaminantes se estará protegiendo de efectos en la salud a 125 millones de habitantes, producto de la contaminación del aire, incluyendo la prevención de aproximadamente 15 mil muertes prematuras y 350 mil casos de asma por año.

En nuestro país, la Secretaría de Salud se encuentra actualmente revisando la normatividad sobre partículas suspendidas y evaluando la pertinencia de adoptar una norma de  $\text{PM}_{2.5}$  en un futuro próximo.

Los muestreos isocinético en ductos requieren de un entendimiento básico y minucioso de los primeros cinco métodos de prueba publicados en el CFR 40 Apéndice A de la Parte 60. Mientras que el Método 5 de la Agencia de Contaminación Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) proporciona el protocolo general para operar el tren de muestreo y así obtener una muestra representativa. Los Métodos 1-4 de la USEPA prescriben las técnicas básicas de muestreo asociadas con el Método 5. Estos métodos conjunta el protocolo básico para determinar las concentraciones de partículas así como la clasificación de las emisiones.

El reporte más reciente de la EPA sobre las tendencias en las concentraciones ambientales cubre a la  $\text{PM}_{10}$  entre los años 1988 y 1996. Se pueden obtener datos completos sobre las concentraciones ambientales de  $\text{PM}_{10}$  de 900 sitios de monitoreo con localizaciones urbanas, suburbanas y rurales. La concentración aritmética anual promedio de  $\text{PM}_{10}$  para todos los sitios (el promedio nacional) durante 1988 fue de  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para 1996, la concentración aritmética anual promedio había disminuido a  $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , una mejoría del 25 por ciento sobre los niveles de 1988. La tendencia de las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  en los sitios urbanos y suburbanos fue esencialmente la misma con el promedio anual disminuyendo desde alrededor de  $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 1988 hasta alrededor de  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 1996. El promedio aritmético anual en sitios rurales en 1988 fue de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El promedio disminuyó en un 20 por ciento a  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 1996.

La Ley del Aire Limpio, cuál fue enmendado por último en 1990, requiere EPA fijar los estándares de calidad del aire para los contaminantes considerados dañosos a la salud pública y al ambiente. La Ley del Aire Limpio estableció dos tipos de estándares de calidad aire nacionales. Estándares Primarios fijan los límites para proteger la salud pública,

incluyendo la salud de poblaciones "sensibles" tales como asmáticos, niños, y ancianos. Los estándares secundarios fijan los límites para proteger el bienestar público, incluyendo la protección contra la disminución de la visibilidad, daños a los animales, cosechas, vegetación, y edificios.

La oficina de planeación y estándares de la calidad del aire de la EPA (OAQPS) ha fijado los estándares de calidad del aire para los seis agentes contaminadores principales, los cuáles son llamados contaminantes "criterios". Se enumeran abajo. Las unidades para los estándares son partes por millón (ppm) para unidades volumétricas, miligramos por el metro cúbico del aire ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), y microgramos por metro cúbico de aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**Tabla 13.** Estándares Nacionales de Calidad Aire (NAAQS) en EE.UU. (EPA).

Contaminante	Valores limite (Concentración y tiempo promedio)	Criterios de cumplimiento
Ozono ( $\text{O}_3$ )	0.12 ppm* (1 hora)	1 excedencia en promedio sobre 3 años
	0.08 ppm (8 horas)	La 4ª mayor excedencia diaria, promedio sobre tres años
Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ )	9 ppm (8 horas)	1 vez al año
	35 ppm (1 hora)	1 vez al año
Bióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ )	0.14 ppm (24 horas)	1 vez al año
	0.03 ppm (Promedio anual)	
Bióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ )	0.053 ppm (Promedio anual)	
Plomo (Pb)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Promedio trimestral)	1 vez al año
Partículas fracción inhalable (PM10)	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas)	99% percentil de la distribución anual, promedio sobre 3 años
	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Promedio anual)	Promedio sobre 3 años
Partículas fracción respirable (PM2.5)	65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas)	98% percentil de la distribución anual, promedio sobre 3 años
	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Promedio anual)	Promedio sobre 3 años

Fuente: National Ambient Air Quality Standards.

\* Continúa vigente en las áreas de "no-cumplimiento", hasta que cumplan con este estándar.

## MÉTODOS DE REFERENCIA Y COMPLEMENTARIOS AL MÉTODO 5.

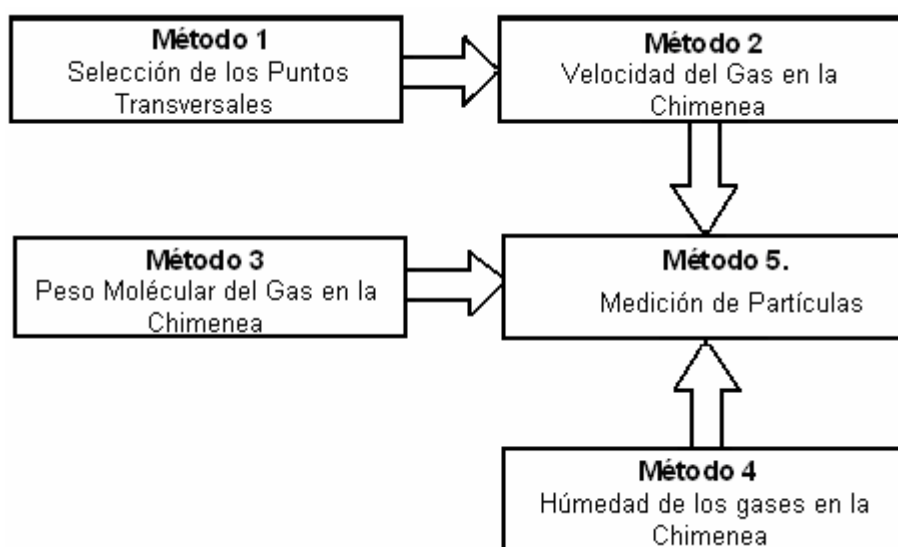
Las siguientes secciones describen los Métodos de Prueba (Test Methods) de la EPA para el muestreo y análisis de partículas que incluyen los métodos de medición de partículas totales.

El Método de Prueba 5 de la EPA, que mide las partículas totales proveniente de fuentes estacionarias, es el procedimiento de prueba predominante usado para medir las emisiones de partículas. El tren de muestreo y los procedimientos de descritos en el Método 5 también son la base para muchos otros métodos de prueba de la EPA. El tren y los procedimientos también han sido modificados y adaptados para obtener métodos de prueba que son diseñados para medir otros componentes gaseosos, tales como los compuestos semivolátiles, en gases de escape en donde es probable que las partículas también existan.

En algunos casos, las partículas se colectan de tal manera que se remueve la interferencia para la medición de los compuestos designados.

El Método 5 y otros métodos de medición para fuentes estacionarias descritos a continuación dependen en el uso de los Métodos de Prueba del 1 a 4 de la EPA. Estos métodos describen las técnicas apropiadas para utilizarse en fuentes estacionarias, y también las técnicas usadas para obtener los datos necesarios sobre las características químicas y físicas de los gases de emisión los cuales son necesarios para calcular las emisiones de las partículas.

**Tabla 14.** Diagrama de los métodos complementarios par poder utilizar el Método 5.



### Métodos de Referencia de EE.UU. Seleccionados por la EPA.

- 1 Este método provee los procedimientos para definir el número y ubicación de los puertos de muestreo, así como de los puntos de medición al interior de la chimenea.
- 1A Muestreo y velocidades transversales para fuentes estacionarias con chimeneas pequeñas y otros ductos.
- 2 Método para la determinación de la velocidad y flujo volumétrico en chimeneas (tubo pitot tipo "S").
- 2A Método para determinar una medición directa de volúmenes de un gas en ductos.
- 2C Determinación de la velocidad de gases de chimenea y flujos volumétricos en ductos pequeños y ductos mayores (Tubo Pitot Estándar).
- 2D Mediciones de flujos de volúmenes gaseosos en ductos pequeños y ductos mayores
- 3 Determinación de los Pesos Moleculares en base seca de los gases de chimenea.
- 3A. Método para determinar las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono en gases de combustión (Procedimiento de Análisis Instrumental).

- 3B Método de análisis de bases para la determinación del factor de corrección de la tasa o exceso de Aire (Orsat).
- 3C Determinación de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> de fuentes estacionarias.
- 4 Determinación del contenido de humedad en los gases de chimenea.
- 5 Determinación de emisiones de partículas contenidas en los gases que fluyen por un ducto.
- 5A Método para determinar las emisiones de las partículas para los procesos de asfalto y las industrias de asfalto.
- 5B Determinación de partículas suspendidas totales que excluyen a la niebla de ácido sulfúrico.
- 5D Método para determinar las emisiones de partículas para presiones positivas en la fabricación de filtros.
- 5E Determinación de emisiones de las partículas provenientes de la industria de fabricación de aislamiento, de lana de fibra de vidrio.
- 5G Determinación de Partículas provenientes de calentadores de leña. Túnel de Dilución.
- 5H Determinación de Partículas provenientes de calentadores de madera. Chimenea.
- 5F Determinación de partículas no sulfatadas provenientes de fuentes fijas.
- 6 Determinación de emisiones de dióxido de azufre en fuentes estacionarias.
- 6A Determinación de dióxido de azufre, humedad y dióxido de carbono de fuentes de combustión de combustibles fósiles.
- 6B Determinación de SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en promedio diario de fuentes de combustión de combustibles fósiles.
- 6C Determinación de emisiones de SO<sub>2</sub> para fuentes estacionarias (Procedimiento de Análisis Instrumental).
- 7 Determinación las emisiones de NO<sub>2</sub> en fuentes estacionarias.
- 7A Determinación las emisiones de NO<sub>2</sub> en fuentes estacionarias (Método de cromatografía iónica).
- 7B Determinación de las emisiones de NO<sub>2</sub> para fuentes estacionarias (espectrofotometría ultravioleta).
- 7C Determinación de las emisiones de NO<sub>2</sub> para fuentes estacionarias (Método calorimétrico: Permanganato Alcalino).
- 7D Determinación emisiones de NO<sub>2</sub> para fuentes estacionarias (Método: Cromatografía iónica / Permanganato Alcalino).

- 7E Determinación de emisiones de NO<sub>2</sub> de fuentes estacionarias (Método de Análisis Instrumental).
- 8 Determinación simultánea de bióxido de azufre, trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico en un gas que fluye por un conducto.
- 9 Determinación visual de opacidad por emisiones en fuentes fijas. (Método 1 alternativo).
- 10 Método para determinar las emisiones de CO en fuentes estacionarias.
- 10A Determinación de emisiones de CO en sistemas de monitoreo continuos certificados en emisiones de refinerías de petróleo.
- 11 Determinación de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) contenido en el flujo de gases de refinerías de petróleo.
- 12 Método para determinar el plomo inorgánico en emisiones de fuentes fijas (Método de SPADNS Zirconium Lake).
- 13A Método para determinar las emisiones totales de fluoruros en fuentes estacionarias.
- 13B Método para determinar las emisiones totales de fluoruros de fuentes estacionarias por ión electrón.
- 15 Determinación del contenido de ácido sulfúrico, sulfato carbónico y disulfuro carbónico en fuentes estacionarias.
- 15A Método para determinar las emisiones total-reducidas de azufre en plantas de recuperación de azufre ó refinerías de petróleo.
- 16A Método para determinar las emisiones total-reducidas de azufre en fuentes estacionarias.
- 17 Método para determinar las emisiones de partículas en fuentes estacionarias (Método de filtración interna).  
Medición de componentes orgánicos en emisiones gaseosas por cromatografía de gas.
- 18 Método para determinar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles por cromatografía de gas.
- 19 Método para determinar la eficiencia y la emisión en partículas de SO<sub>2</sub> y de NO<sub>x</sub>.
- 20 Método para determinar NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> de emisiones de turbinas de gas en fuentes estacionarias.
- 21 Determinación de compuestos orgánicos volátiles (VOC) en derrames petroleros.
- 23 Procedimiento de muestreo para la determinación de dioxinas y furanos en los gases que fluyen por un conducto.
- 24 Determinación del contenido de materiales volátiles contenido de humedad, densidad, volumen de sólidos, peso de sólidos en superficies de revestimiento (pintadas).



- 24A Determinación de material volátil y densidad en pinturas o tintas de imprenta y revestimientos afines.
- 25 Determinación de hidrocarburos totales metano/no metano.
- 25A Método para determinar la concentración de compuestos orgánicos totales (Detector de ionización de flama).
- 25B Determinación de la concentración total de gases orgánicos usando un analizador infrarrojo no-dispersivo.
- 25D Determinación de orgánicos volátiles en muestras residuales sólidas.
- 26A Determinación de haluros y halógenos de hidrógeno provenientes de emisiones de fuentes fijas.
- 27 Determinación de la hermeticidad al escape de vapores en tanques de gasolina, usando pruebas de presión al vacío.
- 29 Determinación de la concentración de metales que fluyen por un conducto (Cr, Cd, As, Ni, Mn, Co, Be, Cu, Zn, Pb, Se, Fe, Tl, Ag, Sb, Ba, Hg, P) en los gases que fluyen por un conducto.
- 201 Determinación de emisiones de PM<sub>10</sub>. Procedimiento de recuperación de gas de escape (RGE).
- 201A Determinación de emisiones de PM<sub>10</sub>. Procedimiento de la razón constante de muestras (VCM).
- 202 Método para medir partículas condensables en fuentes fijas.

**CAPITULO III**

## MEDICION DE EMISIONES.

### 3.1 Monitoreo Atmosférico.

Se define como monitoreo atmosférico a todas las metodologías diseñadas para muestrear, analizar y procesar en forma continua las concentraciones de sustancias o de contaminantes presentes en el aire en un lugar establecido y durante un tiempo determinado. Su importancia radica en que es necesario para: a) formular los estándares de calidad de aire, b) llevar a cabo estudios epidemiológicos que relacionen los efectos de las concentraciones de los contaminantes con los daños en la salud, c) especificar tipos y fuentes emisoras, d) llevar a cabo estrategias de control y políticas de desarrollo en relación con los ecosistemas locales, y e) desarrollar programas racionales para el manejo de la calidad del aire, se requiere de una base de datos que aporte información para la realización de todos estos estudios la cual se genera a partir del monitoreo atmosférico.

La medición de emisiones contaminantes se realiza generalmente con fines específicos:

- 1) Determinar si un proceso existente cumple con las normas de emisión aplicables.
- 2) Confirmar que la operación de una planta nueva cumple las especificaciones contractuales y los permisos operativos.
- 3) Contar con información para la especificación de equipos de control.
- 4) Disponer de información o bibliografías para los factores de emisión, para procesos o contaminantes que no pueden ser estimados de otra manera.
- 5) Verificar la precisión de los monitoreos continuos de emisiones.

### 3.2 Medición de Emisiones Contaminantes en Fuente.

El método es clave en el análisis de emisiones. Los métodos de muestreo y las herramientas para su ejecución varían en complejidad de acuerdo con el tipo de análisis a realizar. Para obtener resultados confiables se requiere tener conocimientos técnicos relacionados con los procesos involucrados y conocimientos en metrología asociados a las variables que involucran el método de muestreo, ver la figura 13.

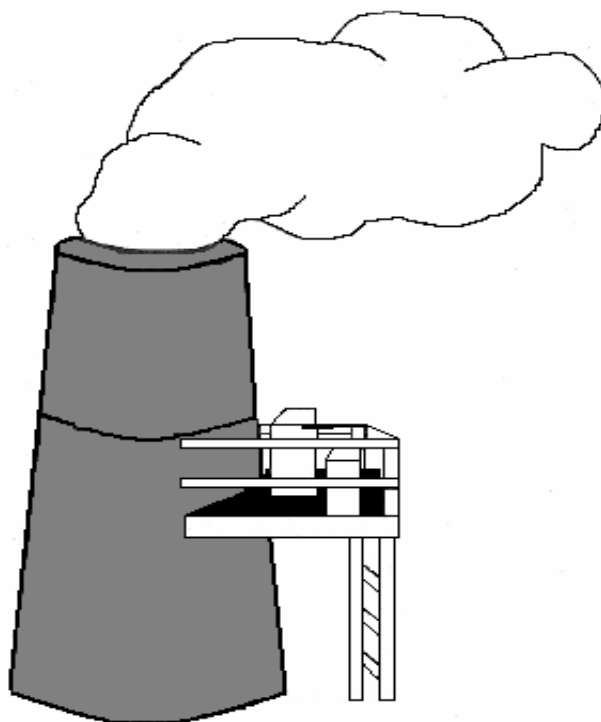


Figura 13. Condiciones óptimas de una chimenea para su muestreo.

Los métodos que se utiliza para muestrear y analizar los contaminantes del medio ambiente son muchos y muy variados.

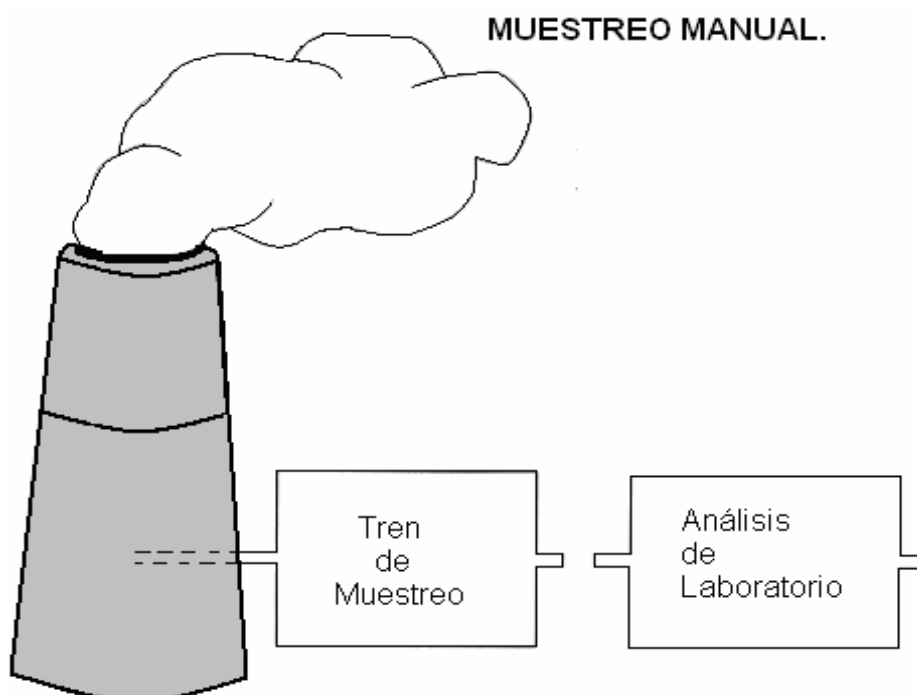
Los procedimientos para hacer los muestreos en fuente se encuentran en diversos métodos de referencia (p.ej., Normas Mexicanas NMX, Métodos de la EPA, etc.). Los métodos de muestreo que describen procedimientos para tomas de muestra en tiempos cortos se conocen como métodos manuales. Éstos, en general, son específicos para un tipo de fuente (p.ej., fuentes de combustión con combustibles fósiles, corrientes de gas combustible en refinerías de petróleo y generadores eléctricos de vapor) y para un contaminante (p.ej., partículas, ácido sulfhídrico, plomo) o para una clase de compuestos (p.ej., dioxinas, COVs). Los equipos o sistemas de muestreo de estos contaminantes consisten, por lo general, de una solución o un medio absorbente para capturar el contaminante, una bomba para succionar la muestra de gas a través de la solución o del medio, y un medidor de gas seco para medir el volumen de la muestra gaseosa. En la Figura 14, se muestra un sistema manual de muestreo utilizado para determinar las emisiones de partículas de una fuente estacionaria (conocido como tren de muestreo del Método 5 de la EPA).

De acuerdo a la manera en que se extraen las emisiones contaminantes, los monitoreos de fuentes fijas pueden ser:

- ❖ **Muestreo Manual.**
- ❖ **Monitoreo Continuo.**
  - Extractivo.
  - In-situ.
- ❖ **Método de Percepción Remota.**

### 3.2.1 Muestreo Manual.

- Son, en términos generales como lo muestra la figura 14, métodos manuales para los cuales la toma de muestra en el lugar y el análisis en el laboratorio, son dos pasos separados.



**Figura 14** Esquema típico de un muestreo manual.

Puede haber mediciones discontinuas que pueden realizarse con equipos automáticos tanto en la toma de muestra como en el análisis de laboratorio.

- Extrae la muestra de varios puntos de la chimenea.
- El análisis de las muestras se realizan en el laboratorio.

### 3.2.2 Monitoreos Continuos.

Típicamente involucran equipos automáticos en un lugar fijo que realiza ambos procesos, toma de muestra y análisis. Estos métodos son fundamentales cuando existen regulaciones que determinan niveles de pre-alerta y diferentes grados de alerta como se muestra en la figura 15.

Existen dos tipos de monitoreos continuos, identificados por la forma de obtención de la muestra, se puede extraer para su determinación o hacer la determinación directamente en la fuente eliminando así la necesidad de análisis en laboratorio.

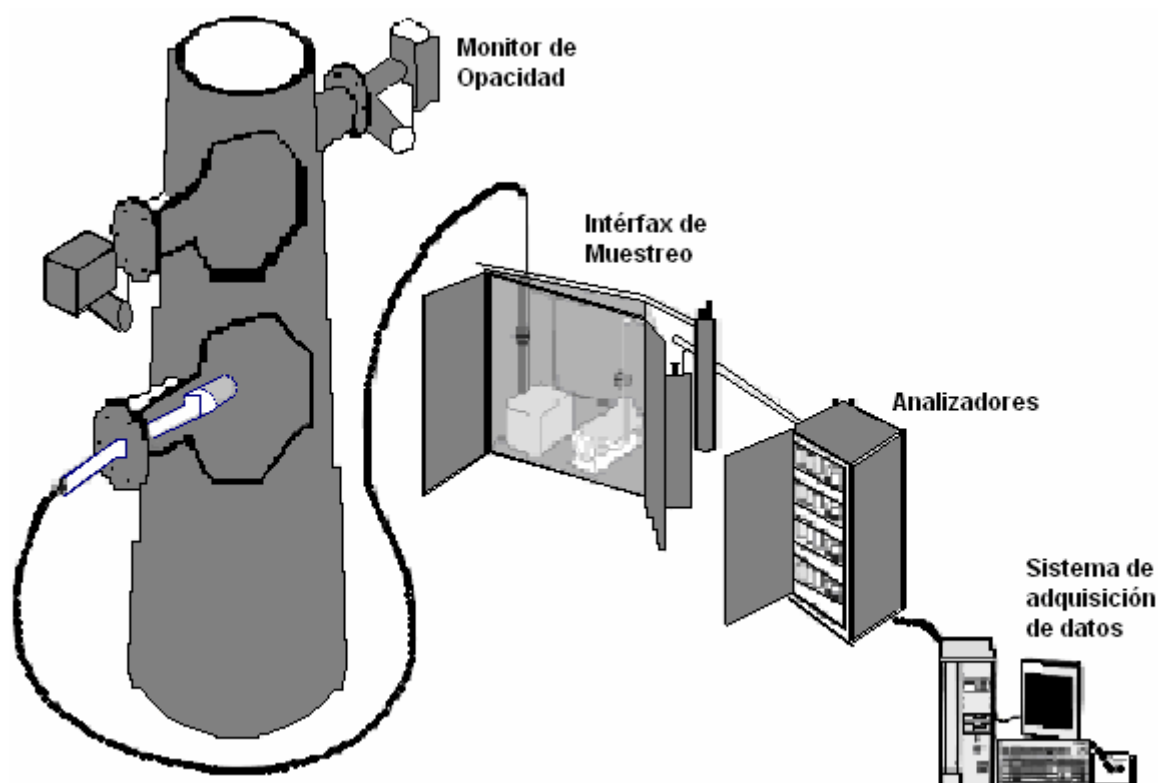


Figura 15. Esquema típico de un muestreo continuo.

#### 3.2.2.1 Sistemas extractivos.

En los sistemas extractivos, la muestra de los gases de chimenea es extraída, acondicionada y transportada en forma continua al analizador(es), donde se determina la concentración de los componentes de interés. El analizador es calibrado usando mezclas de gases comprimidos y, las mediciones son registradas automáticamente en un papel o en un sistema electrónico de adquisición de datos. Los sistemas extractivos son generalmente sencillos de operar y mantener pero, requieren mantenimiento continuo. La clave de su funcionamiento es el diseño y construcción del sistema de transporte y acondicionamiento de la muestra. Los sistemas extractivos de monitoreo de gases son preferentes bajo las siguientes circunstancias:

- a) Temperaturas muy altas.
- b) Gases saturados de humedad.
- c) Para monitorear secuencialmente dos o más fuentes aledañas.

En los sistemas extractivos clásicos, la recolección de la muestra se realiza en filtros previamente acondicionados y pesados.

Otros sistemas extractivos evitan la condensación de humedad por medio de la dilución controlada de la muestra usando aire puro y seco. Estos sistemas están basados en analizadores de aire ambiente ( $SO_2$  y  $NO_x < 10$  ppm) y no permiten la medición de oxígeno en la misma muestra. Generalmente son complementados con un analizador separado de oxígeno.

### 3.2.2.2 Sistemas *In situ*.

Este tipo de monitoreo proporciona la medición de concentraciones directamente en la chimenea o el conducto donde está instalado, evitando así la extracción (posible contaminación) y la obtención de la muestra fuera de las condiciones normales, es decir, no es producto de la operación normal de un proceso.

Con respecto a la forma de obtención de la muestra, puede ser puntual a lo ancho de la chimenea. Para el primer caso, la medición de concentraciones se efectúa en un punto de la chimenea, en el segundo caso, la medición se basa en la absorción de un rayo de luz a lo ancho de la chimenea o conducto.

Los monitores in-situ requieren menos mantenimiento que los sistemas extractivos; usados en aplicaciones apropiadas. Por otro lado, si son instalados en condiciones desfavorables, serán irremediablemente incapaces de producir información adecuada. Las siguientes condiciones operativas son desfavorables para la instalación de monitores in situ, especialmente los de absorción de rayo de luz.

- a) Temperaturas mayores de  $260^\circ C$ .
- b) Gases saturados de agua.
- e) Considerable opacidad en la chimenea.
- d) Presión en exceso de 10 cm de columna de agua.

Una importante consideración en la selección de sistemas *in-situ* es la calibración periódica del sistema. Todos los sistemas de monitoreo de gases deben ser periódicamente calibrados. Es importante que esta calibración pueda ser efectuada con métodos de referencia que sean susceptibles de comparación con estándares primarios, p. ej. Mezclas de gases comprimidos. De otro modo, la verificación de la calibración debe ser efectuada por comparación con un método de referencia (muestreo de chimenea).

Numerosos sistemas *in-situ* utilizan sistemas de medición ópticos ya descritos (espectrofotometría no-dispersiva), en los que la chimenea o conducto sustituye a la celda de muestra.

En los sistemas para monitoreo de partículas de paso simple, la fuente de luz y el detector están colocados en lados opuestos de la chimenea por lo que el aparato no puede ser calibrado a menos que la chimenea esté libre del contaminante que se desea medir. Este tipo de aparato es potencialmente aplicable a procesos que se arrancan y paran diariamente.

En los sistemas de doble paso, la fuente de radiación y el detector están colocados del mismo lado de la chimenea y la luz es reflejada por un cubo reflector de vidrio.

Generalmente, estos sistemas están equipados con un espejo móvil que sustituye temporalmente al reflector ubicado en el lado opuesto de la chimenea durante la calibración periódica del aparato. En algunos casos, una celda de gas es insertada en el camino óptico durante la calibración para producir una señal de referencia correspondiente a un nivel dado del contaminante a medir.

En los sistemas semipuntuales, las paredes de la celda de medición son semipermeables y permiten la entrada de los gases de chimenea. Durante periodos de calibración, el sistema óptico es inundado con aire puro o gas de calibración que así sustituye a la muestra y permite la calibración del aparato.

### **3.3 Muestreo de emisiones contaminantes en fuentes fijas (chimeneas).**

Esté método consiste en tomar una muestra de la emisión que permita determinar la concentración del contaminante y el flujo del gas portador, con el fin de calcular el flujo másico del contaminante.

La muestra de gas que contiene a las partículas se succiona isocinéticamente del ducto o chimenea por el cual se emite a la atmósfera, haciendo uso de una sonda acoplada a un tubo pitot.

El tubo pitot tiene como propósito medir la presión de velocidad y así, calcular la velocidad de los gases en la chimenea o ducto donde se éste haciendo el muestreo.

La boquilla de muestreo puede variarse, para así modificar la velocidad de succión de tal modo que se pueda garantizar la condición de isocinétismo.

La sonda consta de dos tubos concéntricos y entre los dos va una resistencia eléctrica para calentar la sonda y evitar condensación de los gases cuando se succionan a través de la tobera.

El modulo de muestreo consta de la caja caliente donde se coloca el ciclón y el filtro para colectar las partículas, y la caja fría donde se colocan en un baño de hielo los burbujeadores que retienen la humedad del flujo gaseoso.

Los gases luego de pasar por la sonda entran al ciclón, donde se quedan las partículas más grandes, y luego pasan por el filtro, en el cual se quedan las partículas más finas. Esto sucede en la caja caliente, la cual se mantiene así por medio de una resistencia, para impedir la condensación de los gases en el filtro, lo que ocasionaría taponamiento del mismo. Las partículas recolectadas en los filtros se determinan gravimétricamente.

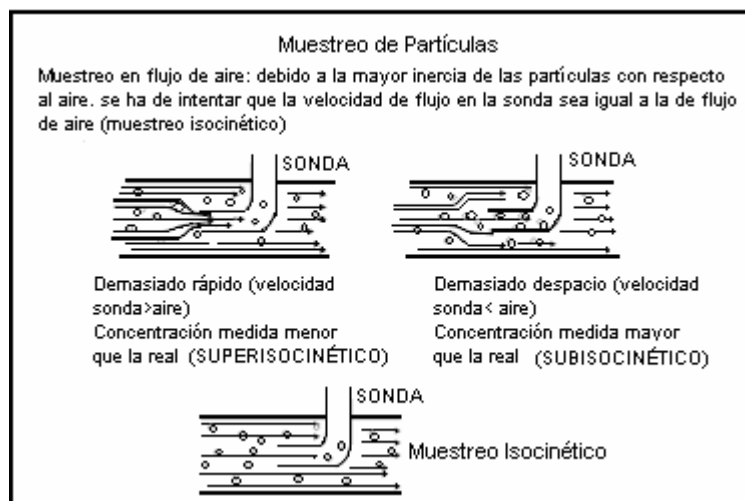
Los gases cuando salen del modulo de muestreo pasan a través del cordón umbilical o línea de vacío al modulo de control. El cordón umbilical está compuesto de cables eléctricos, línea de succión y conexiones.

El modulo de control es la unidad que controla las operaciones del muestreo y está compuesto por dos manómetros (para determinar la presión de velocidad en el tubo pitot y la caída de presión en la placa de orificio), un medidor de gas seco, una bomba de vacío, válvulas de ajuste grueso y fino (solamente en equipos manuales) e interruptores para controlar el sistema.

Cuando se presentan condiciones no isocinéticas:

- Las partículas mayores tienden a moverse en la misma dirección inicial.
- Las partículas menores tienden a seguir las líneas de flujo.
- Las partículas intermedias sufren alguna deflexión.

Cuando la captura de partículas es menor, debido a que la velocidad de los gases de la chimenea es mayor a la de muestreo, se llega al subsocinétismo; si la captura de partículas es mayor, debido a que la velocidad de los gases de la chimenea es menor a la de muestreo, se llega al supersocinétismo. Lo anterior se ilustra en la figura 16.



**Figura 16. Representación esquemática de las tres diferentes tomas de muestra (supersocinético, subsocinético e isocinético).**

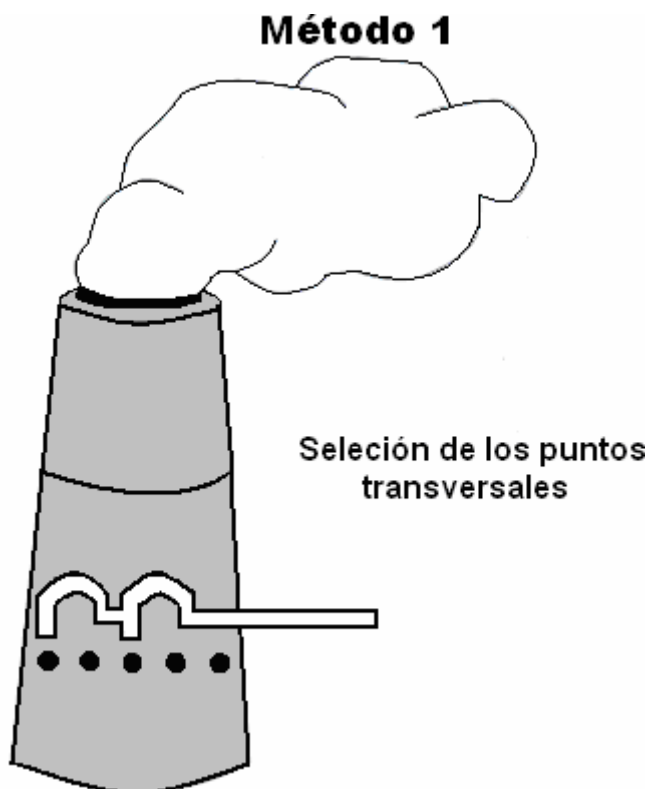
Para lograr que la toma de muestra se realice en forma isocinética, requiere la adopción de una estrategia de muestreo que incluye los siguientes métodos definidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

**Agencia de Protección Ambiental (Métodos de Referencia).**

- Se utiliza para el cumplimiento de muestreos en fuente.
- Describe los procedimientos de muestreo reales.
- Es sustentado por el Código Federal de Regulaciones.



### 3.3.1 Método 1: Localización de los puertos y puntos de muestreo figura 17.



**Figura 17. Representación esquemática de los puntos transversales**

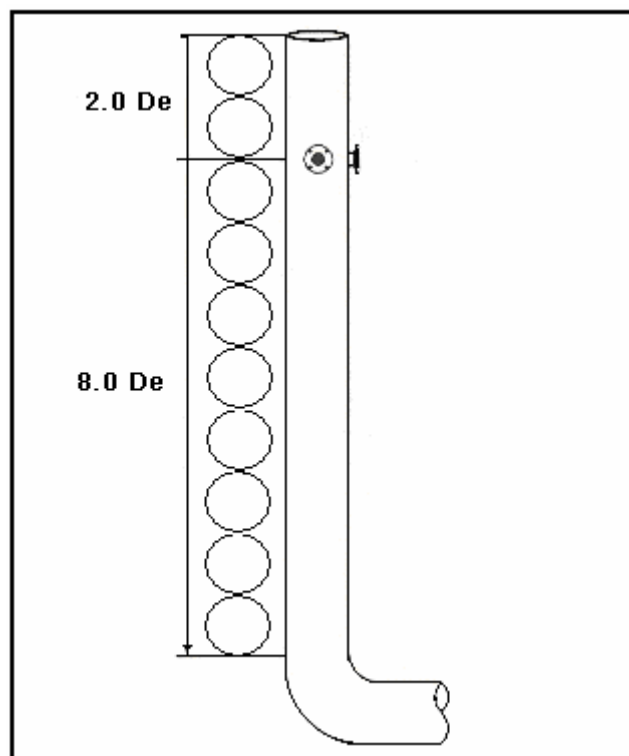
Definición de puertos de muestreo y de puntos de medición en chimeneas. Este método provee los procedimientos para definir el número y ubicación de los puertos de muestreo, así como de los puntos de medición al interior de la chimenea.

Este método es aplicable para corrientes de gas que fluyen en ductos y chimeneas. El método no puede ser usado cuando:

- 1).- El flujo es ciclónico o turbulento,
- 2).- El diámetro de la chimenea es inferior a 0.30 m ó tiene un área transversal inferior a  $0.071 \text{ m}^2$ ;
- 3) El sitio de medición tiene menos de dos diámetros de chimenea o ducto corriente abajo o menos de medio diámetro corriente arriba después de una perturbación.

#### 3.3.3.1 Localización del sitio de medición adecuado.

La toma de muestra o la medición de velocidad se realiza en un sitio localizado al menos ocho (8) diámetros de chimenea "arriba" (en el sentido del flujo) y dos (2) diámetros corriente "abajo" (en el sentido del flujo) de cualquier perturbación tal como una curva, una expansión o contracción, con el propósito de aumentar el número de puntos de muestreo en la sección transversal y obtener un muestreo más representativo como se muestra en la figura 18.



**Figura 18. Visualización de los diámetros equivalentes de la chimenea de las perturbaciones de flujo.**

Se considera que la franja del ducto que cumple la condición de 8 diámetros después de una perturbación y 2 diámetros antes de la siguiente es la adecuada para realizar el muestreo, ya que en esta franja se encuentra un flujo laminar. Cuando lo anterior no puede cumplirse, se debe localizar el sitio de muestreo por lo menos a dos diámetros de chimenea o ducto corriente abajo y por lo menos a medio diámetro corriente arriba después de una perturbación, con el propósito de aumentar el número de puntos de muestreo en la sección transversal y obtener un muestreo más representativo.

Para ductos rectangulares se usa el término diámetro equivalente, el cual se define así:

$$De = \frac{2LW}{(L+W)}$$

En la cual L y W son las dimensiones (largo y ancho) de la sección transversal de la chimenea como se muestra en la figura 21.

### **3.3.3.2 Condiciones del sitio de medición.**

Una vez elegido el sitio se adecua cumpliendo los siguientes requisitos:

Que la plataforma sea amplia y resistente.

Que sea de fácil acceso.

Que cuente con suministro de energía eléctrica (110 V C.A.).

Que cuente con protección necesaria para evitar los cortos circuitos y choques eléctricos.

### **3.3.3.3 Requisitos técnicos de medición.**

A fin de permitir la medición de emisiones de contaminantes del aire en fuentes fijas de combustión, estas deberán contar con los siguientes requisitos técnicos mínimos:

### 3.3.3.1 Plataformas de Trabajo.

Las plataformas deberán ser circulares, rectangulares o de media luna con escalerilla de ascenso y descenso de alta seguridad, preferentemente la de tipo marino y ser capaces de soportar una carga de 400kg. (881.89lb) como lo muestra la figura 19.

Dimensiones y espacios apropiados de la plataforma para maniobrar adecuadamente en los muestreos.

Cuando la suma del diámetro interno del conducto, más el espesor de la pared, más la extensión del puerto sea mayor a 2.50m (8.20ft), será necesario instalar una plataforma circular y cuatro puertos.

Se deberá contar con un contacto para suministro de la corriente eléctrica monofásica (60Hz C.A. 127V y 15A) y la protección necesaria para evitar cortos circuitos.

Deberá tener suficiente iluminación y protección necesaria.

Se deberá colocar argollas a la altura de aproximadamente dos metros desde los puertos de muestreo y en línea vertical con respecto al mismo.

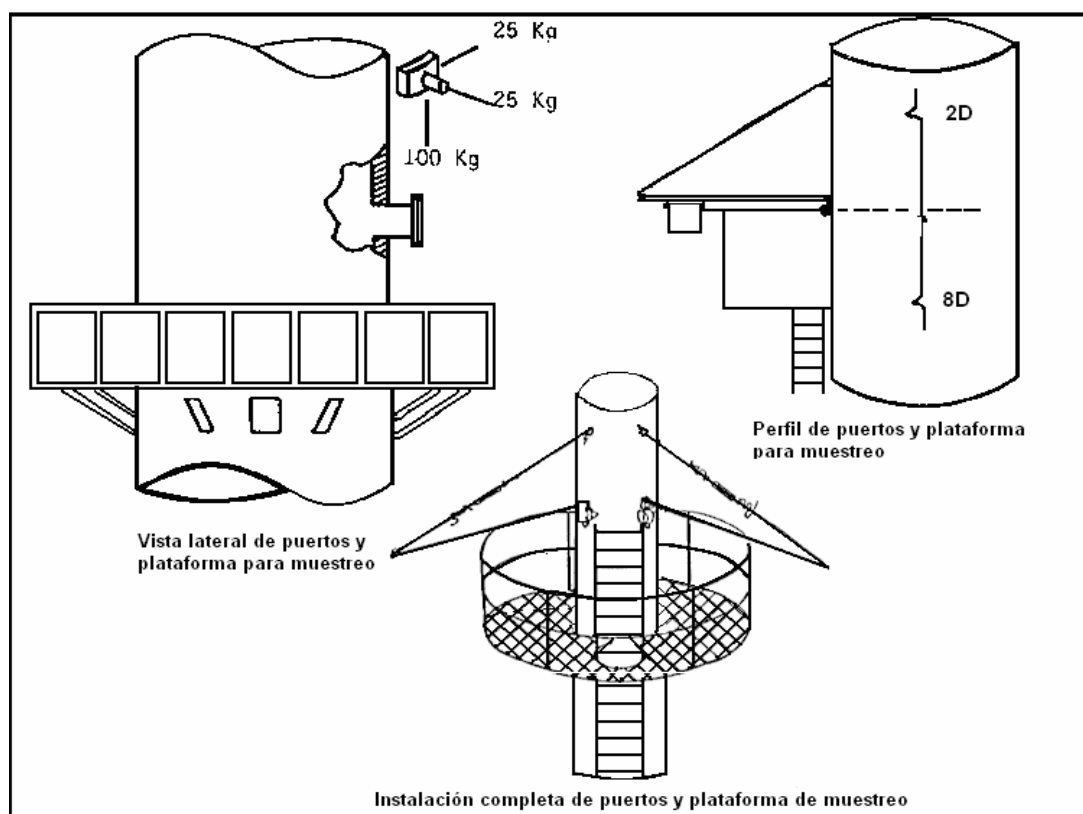
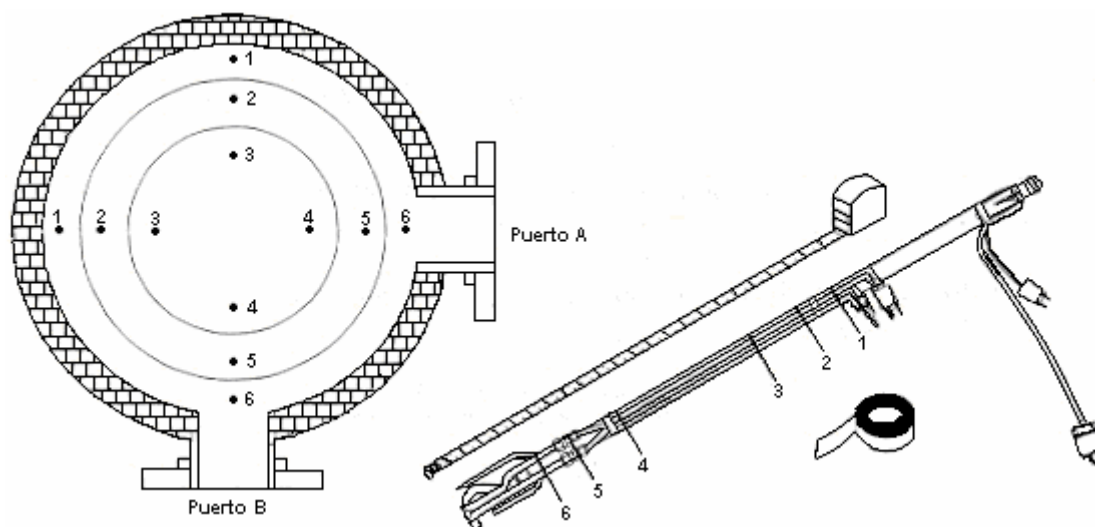


Figura 19. Dimensiones y espacio de una plataforma.

### 3.3.3.3.2 Determinación de los puertos de muestreo y puntos de medición en el ducto.

Para lograr una medición representativa de las emisiones contaminantes y/o del caudal o flujo volumétrico total de una fuente fija, se selecciona un sitio de toma de muestra o medición donde la corriente del efluente está fluyendo en una dirección conocida y se divide la sección de las chimeneas en áreas iguales.

Se localizan luego un punto en el centróide de cada una de las áreas predeterminadas donde se harán la toma de muestra como se muestra en la figura 20.



**Figura 20. Representación de como seleccionar los puntos de muestreo por el método del centróide en la sección transversal de la chimenea.**

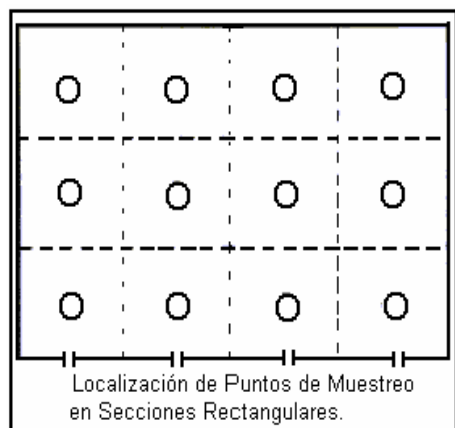
En conductos de sección rectangular, se utilizará el mismo criterio, salvo que la ubicación de los puertos de muestreo se definirá en base al diámetro equivalente del conducto.

Número de puertos de muestreo.- El número de puertos requeridos se determinará de acuerdo al siguiente criterio:

Dos (2) puertos para aquellas chimeneas o conductos de diámetro menor 3.0 metros,

Cuatro (4) puertos para chimeneas o conductos de diámetro igual o mayor a 3.0 metros. Para conductos de sección rectangular, se utilizará el diámetro equivalente para definir el número y la ubicación de los puertos de muestreo.

Ubicación de los puntos de medición en chimeneas de sección rectangular. Para el número de puntos de medición determinado, se dividirá la sección transversal de la chimenea o conducto en un número de áreas rectangulares igual al número de puntos de medición determinado. Luego, cada punto de medición se ubicara en el centro de cada área rectangular definida en figura 21.



**Figura 21. Localización de puntos transversales en secciones rectangulares.**

Número de puntos de medición.- Cuando la chimenea o conducto cumpla con el criterio establecido en el párrafo anterior, el número de puntos será el siguiente:

- a. Calcular el diámetro equivalente.
- b. Doce (12) puntos de medición para chimeneas o conducto con diámetro real o equivalente, respectivamente, mayor a 0.61 metros,
- c. Ocho (8) puntos de medición para chimeneas o conducto con diámetro, o diámetro equivalente, respectivamente, entre 0.30 y 0.60 metros, y,
- d. Nueve (9) puntos de medición para conductos de sección rectangular con diámetro equivalente entre 0.30 y 0.60 metros.

Para el caso de que una chimenea no cumpla con el criterio establecido en el párrafo anterior, el número de puntos de medición se definirá de acuerdo a la figura 22. Al utilizar esta figura, se determinará las distancias existentes tanto corriente abajo como corriente arriba de los puertos de muestreo, y cada una de estas distancias será dividida entre el diámetro de la chimenea o conducto, esto a fin de determinar las distancias en función del diámetro. Se seleccionara el mayor número de puntos de medición indicado en la figura, de forma tal que, para una chimenea de sección circular, el número de puntos de medición sea múltiplo de cuatro.

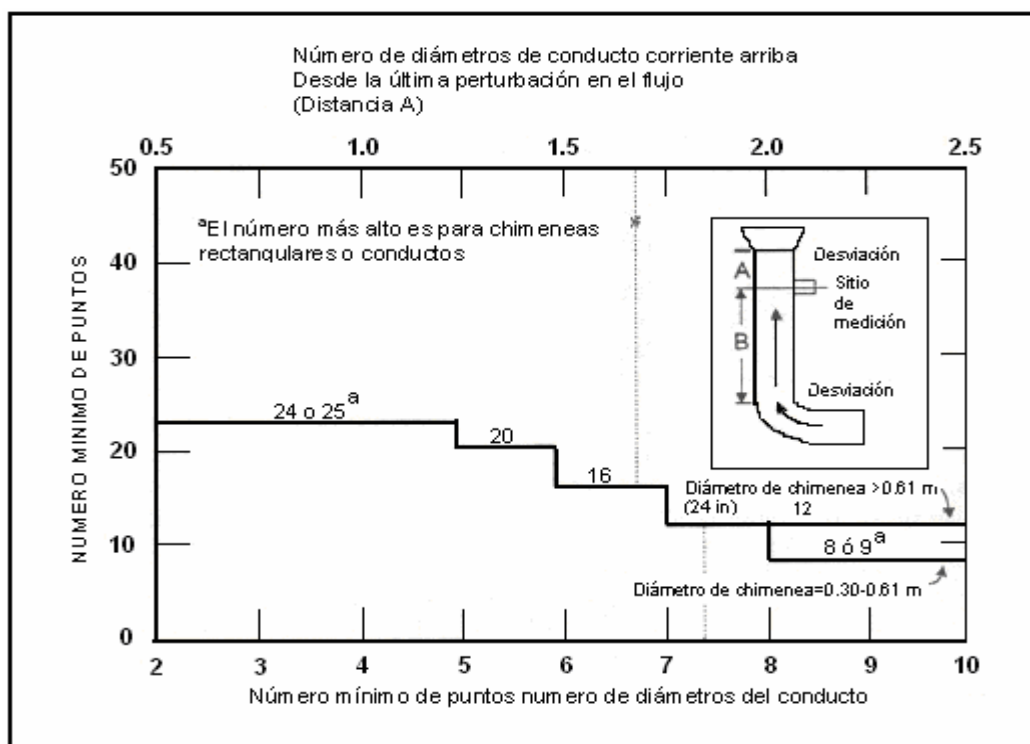


Figura 22. Número mínimo de puntos transversales.

Para chimeneas rectangulares, se debe dividir la sección transversal en tantas áreas rectangulares como puntos de muestreo, con el propósito de obtener el arreglo de las matrices de la tabla 15. La relación entre la longitud y el ancho de cada área elemental debe estar entre uno y dos.

**Tabla 15.** Arreglo de la sección transversal para chimeneas rectangulares.

Numero de Puntos de Medición	Distribución de Puntos
9	3x3
12	4x3
16	4x4
20	5x4
25	5x5
30	6x5
36	6x6
42	7x6

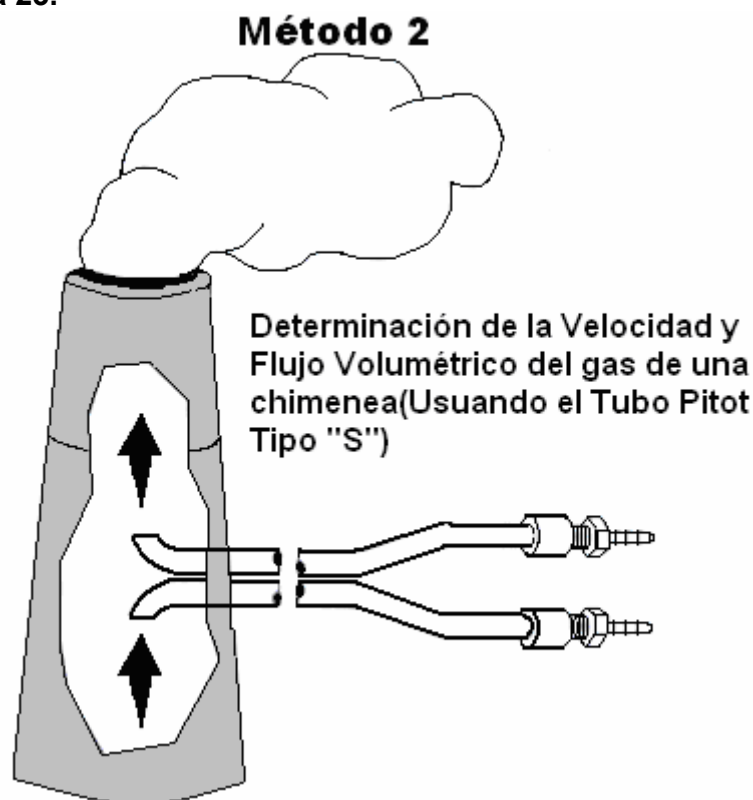
La ubicación de los puntos de medición en chimeneas de sección circular. Determinado el número de puntos de medición, los puntos se deberán distribuir, en igual número, a lo largo de dos diámetros perpendiculares entre sí, que estén en el mismo plano de medición al interior de la chimenea o conducto. La ubicación exacta de cada uno de los puntos, a lo largo de cada diámetro, se determinara según la tabla 16.

**Tabla 16.** Ubicación de los puntos de medición en chimeneas o ductos de sección circular.

Ubicación de los Puntos de Medición en Chimeneas o Ductos de Sección Circular.												
Número de puntos de medición para un diámetro	Número de puntos de medición en un diámetro de chimenea											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	14,6	6,7	4,4	3,2	2,6	2,1	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,1
2	85,4	25,0	14,6	10,5	8,2	6,7	5,7	4,9	4,4	3,9	3,5	3,2
3		75,0	29,6	19,4	14,6	11,8	9,9	8,5	7,5	6,7	6,0	5,5
4		93,3	70,4	32,3	22,6	17,7	14,6	12,5	10,9	9,7	8,7	7,9
5			85,4	67,7	34,2	25,0	20,1	16,9	14,6	12,9	11,6	10,5
6			95,6	80,6	65,8	35,6	26,9	22,0	18,8	16,5	14,6	13,2
7				89,5	77,4	64,4	36,6	28,3	23,6	20,4	18,0	16,1
8				96,8	85,4	75,0	63,4	37,5	29,6	25,0	21,8	19,4
9					91,8	82,3	73,1	62,5	38,2	30,6	26,2	23,0
10					97,4	88,2	79,9	71,7	61,8	38,8	31,5	27,2
11						93,3	85,4	78,0	70,4	61,2	39,3	32,3
12						97,9	90,1	83,1	76,4	69,4	60,7	39,8
13							94,3	87,5	81,2	75,0	68,5	60,2
14							98,2	91,5	85,4	79,6	73,8	67,7
15								95,1	89,1	83,5	78,2	72,8
16								98,4	92,5	87,1	82,0	77,0
17									95,6	90,3	85,4	80,6
18									98,6	93,3	88,4	83,9
19										96,1	91,3	86,8
20											98,7	94,0

**Nota:** Los puntos de muestreo no podrán estar localizados a una distancia inferior de 1.3 cm. de la pared de la chimenea para chimeneas con diámetros menores o iguales a 0.61 m, y a una distancia de 2.5 cm. para chimeneas con diámetros mayores de 0.61 m. Ajustar la ubicación del primero y último punto según este criterio.

**3.3.2 Método 2: Procedimiento para la determinación de la velocidad y flujo volumétrico de los gases de salida de chimeneas o ductos (tubo pitot tipo "S") ver la figura 23.**



**Figura 23. Representación esquemática del Método 2.**

La velocidad y el caudal del gas en la chimenea se determinan a través de la densidad del gas y de la medición de la presión de velocidad promedio (presión dinámica) con un tubo pitot tipo "S".

El tubo pitot estándar puede usarse en lugar de uno tipo "S", sin embargo, como los orificios de presión estática y absoluta del tubo pitot estándar son susceptibles a obstruirse por las partículas presentes en la corriente gaseosa; siempre que se utilice un tubo pitot estándar para realizar una corrida, se debe inspeccionar el tubo pitot para asegurarse que los orificios no se hayan tapado durante la medición. Esto se puede lograr comparando la medición de la presión velocidad ( $\Delta P$ ) registrada en un punto transversal seleccionado con una segunda medición de  $\Delta P$  registrada en el mismo punto después hacer pasar aire presurizado en contracorriente por el tubo pitot para limpiar los orificios de presión absoluta y estática. Si las mediciones de  $\Delta P$ , antes y después; están dentro de un 5 % de diferencia, entonces los datos de la corrida son aceptables.

Para ductos con diámetros menores a 0.30 m, la velocidad del gas debe medirse usando un tubo pitot estándar, ya que la utilización de un tubo pitot tipo "S" produce mediciones inexactas. La velocidad de gas se mide usando un tubo pitot estándar corriente abajo del sitio real de muestreo de la emisión. La distancia del ducto entre el sitio de muestreo de partículas y el sitio de medición de la velocidad permiten que el perfil de flujo, temporalmente perturbado por la presencia de la sonda, se vuelva a desarrollar y a estabilizar.

La figura 24, muestra dos tipos de tubos pitot: (a) tubo pitot tipo "S" y (b) tubo pitot estándar. El primero se utiliza generalmente para las mediciones de campo en chimeneas con diámetro mayor de 0.3 m, mientras el segundo se utiliza para la calibración de los tubo pitot en "S" o para las mediciones de campo en chimeneas con diámetro menor de 0.3 m.

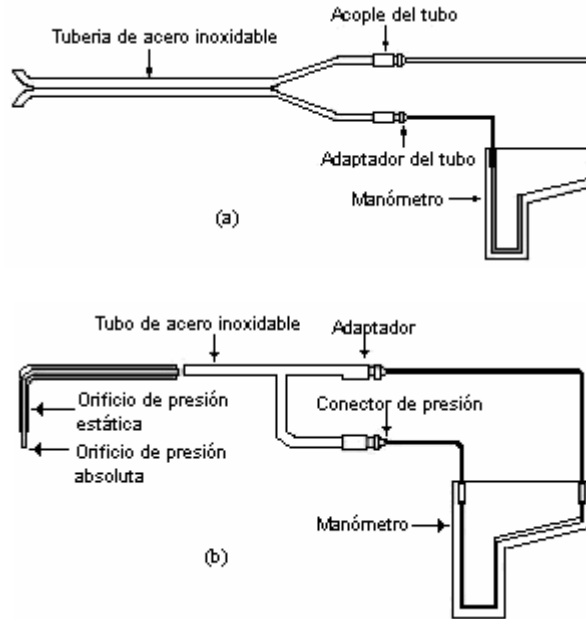
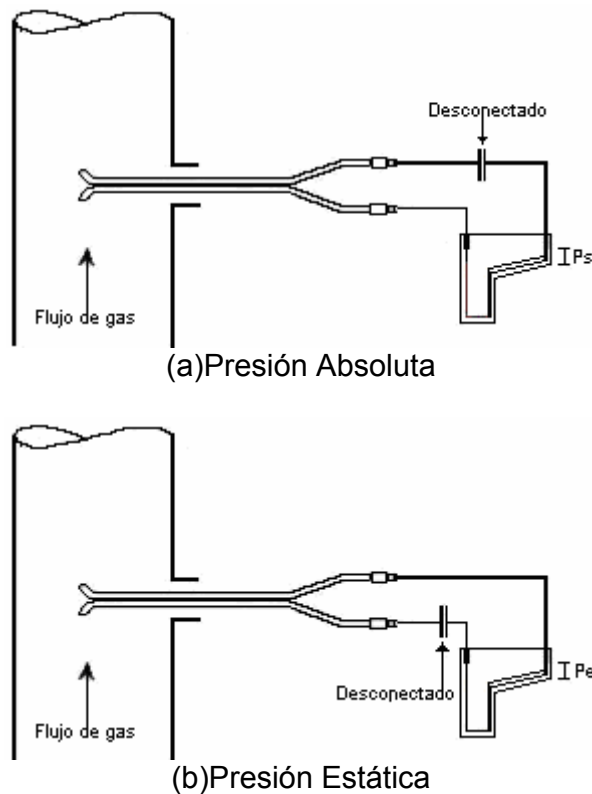
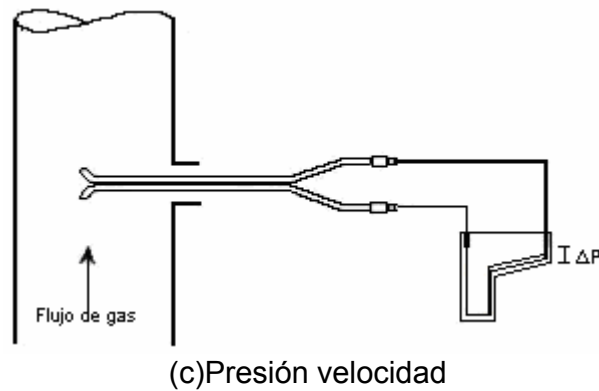


Figura 24. Tubos pitot.

La figura 25, muestra en forma esquemática como se miden las presiones estática, absoluta y de velocidad (dinámica). Las presiones deben permanecer estables por lo menos 15 segundos antes de registrarlas.







**Figura 25. Representación esquemática de las mediciones de las presiones absoluta (Ps), estática (Pe) y la de velocidad (ΔP).**

La velocidad del gas en la chimenea se relaciona con la presión de velocidad a través de la Ecuación de Bernulli:

$$V_s = K_p C_p \sqrt{\frac{\Delta p T_s}{P_s M_s}}$$

En la cual:

$V_s$  = Velocidad promedio del gas en la chimenea, m/s;

$K_p$  = Constante del tubo pitot (34.97 sistema internacional ó 85.49 unidades inglesas);

$C_p$  = Coeficiente del tubo pitot;

$\overline{\Delta p}$  = Presión de velocidad promedio del gas en la chimenea, (mmH<sub>2</sub>O · inH<sub>2</sub>O);

$T_s$  = Temperatura promedio del gas en la chimenea, (K · ó · °R);

$P_s$  = Presión · absoluta · en · Chimenea = Presión · atmosférica · + · Presión · estática · en · chimenea (mmHg · ó · inHg);

$M_s$  = Masa molar del gas en la chimenea, (g / gmol · ó · lb / lbmol) .

La presión de velocidad promedio del gas en la chimenea se obtiene de la siguiente forma:

$$\overline{\Delta p} = \left( \frac{\sum \sqrt{\Delta p_i}}{n} \right)^2$$

En la cual:

$\overline{\Delta p}$  = Presión de velocidad promedio del gas en la chimenea, mm H<sub>2</sub>O.

$\Delta P_i$  = Presiones de velocidad en cada punto de muestreo, mm H<sub>2</sub>O.

$n$  = Número de puntos de muestreo.

La presión absoluta del gas en la chimenea es igual a:

$$P_s = P_a + \frac{P_e}{13.6}$$

En la cual:

$P_s$  = Presión absoluta en la chimenea, mmHg.

$P_a$  = Presión barométrica, mm Hg.

$P_e$  = Presión estática promedio en la chimenea, mmH<sub>2</sub>O.

13.6= Densidad del mercurio.

Los muestreadores de chimenea automáticos reportan directamente la presión absoluta del gas en la chimenea, mientras que en los muestreadores manuales se requiere medir la presión estática para luego calcular la presión absoluta.

El caudal de gases en la chimenea se puede calcular multiplicando la velocidad de los gases por el área transversal del ducto, así:

$$Q_s = 3600V_s A_s$$

En la cual:

$Q_s$  = Caudal de gases en la chimenea a condiciones de chimenea, m<sup>3</sup>/h.

$V_s$  = Velocidad promedio del gas en la chimenea, m/s.

$A_s$  = Área transversal de la chimenea, m<sup>2</sup>.

3600= Factor de conversión

El área transversal de las chimeneas se hallar dependiendo de la forma de las mismas. Para chimeneas circulares:

$$A_s = \pi \left( \frac{D_s}{2} \right)^2$$

En la cual:

$A_s$  = Área transversal de la chimenea, m<sup>2</sup>.

$D_s$  = Diámetro de la chimenea, m.

Para chimeneas rectangulares:

$$A_s = L W$$

En la cual:

$A_s$  = Área transversal de la chimenea, m<sup>2</sup>.

$L$  = Largo de la chimenea, m.

$W$  = Ancho de la chimenea, m.

La concentración de partículas determinada en el muestreo isocinético es en base seca y a condiciones de referencia debido a que a la muestra de gases tomada de la chimenea se le retira la humedad en los burbujeadores y las temperaturas de la chimenea y el muestreador son diferentes. Por lo tanto, para determinar la emisión de partículas el caudal de gases en la chimenea se debe calcular en base seca y corregida a condiciones de referencia. El caudal de gas en la chimenea en base seca corregido a condiciones de referencia es:

$$Q_{s_{ref}} = 3600(1 - B_{ws}) V_s A_s \frac{T_{ref}}{T_s} \frac{P_s}{P_{ref}}$$

En la cual:

$Q_{s_{ref}}$  = Caudal de gas en la chimenea en base seca corregido a condiciones de referencia, m<sup>3</sup>/h.

$B_{ws}$  = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

$V_s$  = Velocidad promedio del gas en la chimenea, m/s.

$A_s$  = Área transversal de la chimenea, m<sup>2</sup>.

$T_{ref}$  = Temperatura de referencia, 298 °K.

$P_s$  = Presión absoluta en la chimenea, mmHg.

$T_s$  = Temperatura promedio del gas en la chimenea, °K.

$P_{ref}$  = Presión de referencia, 760 mm Hg.

Para determinar la masa molar del gas en la chimenea se requiere de los métodos 3 y 4 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

### 3.3.3 Método 3: Procedimiento para la determinación de la masa molecular seco de los gases de escape figura 26.

#### Método 3

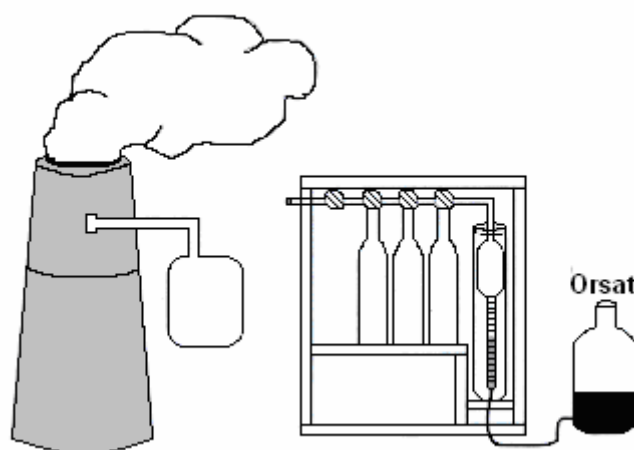


Figura 26. Representación esquemática del Método 3.

Una muestra de gas se extrae de la chimenea. Se analiza en la muestra de gas los porcentajes de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ). Si se requiere la determinación de la masa molar seca y el aire en exceso se debe usar para el análisis un analizador Orsat.

Esta determinación se realizará mediante uno de los dos sistemas de medición aquí propuestos, estos son, con el uso de instrumentación basada en analizadores portátiles, o, con el uso de los procedimientos de colección, recuperación y análisis en laboratorio de muestras colectadas. Se especificará claramente el método utilizado en la medición de emisiones.

Uso de analizadores portátiles.- Se utilizarán equipos disponibles en el mercado, que reporten las emisiones de bióxido de azufre y/o de óxidos de nitrógeno en base a técnicas tales como de fluorescencia, ultravioleta, e infrarrojo no dispersivo, para el caso de bióxido de azufre, o, de quimiluminiscencia, para el caso de óxidos de nitrógeno. Otra opción consiste en la utilización de analizadores portátiles, que operen con tecnología de celdas electroquímicas, y diseñados para medición también de bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.

De utilizarse analizadores portátiles, sea con cualquiera de las técnicas descritas en el párrafo anterior estos equipos deberán contar con los respectivos certificados de calibración, otorgados por el fabricante de los mismos.

La figura 27, muestra el analizador de gases de combustión marca Bacharach 300-NSX que consta de varias celdas electroquímicas que sirven para determinar a través de lectura directa la concentración de oxígeno ( $O_2$ ) y monóxido de carbono (CO) en los gases de combustión, y calcular la concentración de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) al introducirle al equipo el combustible que se está utilizando.



**Figura 27. Analizador Bacharach 300 NSX.**

**El Equipo Orsat.** Es un dispositivo que permite realizar análisis volumétrico en base seca de los productos de la combustión. El Orsat más común sirve para determinar el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y el oxígeno ( $O_2$ ). La figura 28, muestra un equipo Orsat para el análisis de los gases de combustión. Las partes esenciales son una bureta para medir el volumen de los gases y varios burbujeadores conectados entre sí a través de una tubería común. Cada burbujeador contiene una solución absorbente y puede aislarse para que el gas, con un volumen determinado, pase a través de ellos. Cada solución absorbe un determinado componente, de manera que si se mide el volumen antes y después de pasar por cada solución, la diferencia representará el volumen absorbido por ella, que corresponde al componente que la solución en cuestión es capaz de absorber.

El gas se introduce o se extrae del aparato, subiendo o bajando la botella niveladora, que contiene agua para su saturación. La bureta se llena con los gases de combustión y su volumen se determina cuidadosamente. Luego, se pasa el gas al recipiente que contiene una solución concentrada de hidróxido de potasio que absorbe el dióxido de carbono ( $CO_2$ ); el gas remanente se regresa a la bureta medidora y se determina el volumen; la diferencia con el volumen original representa el dióxido de carbono absorbido.

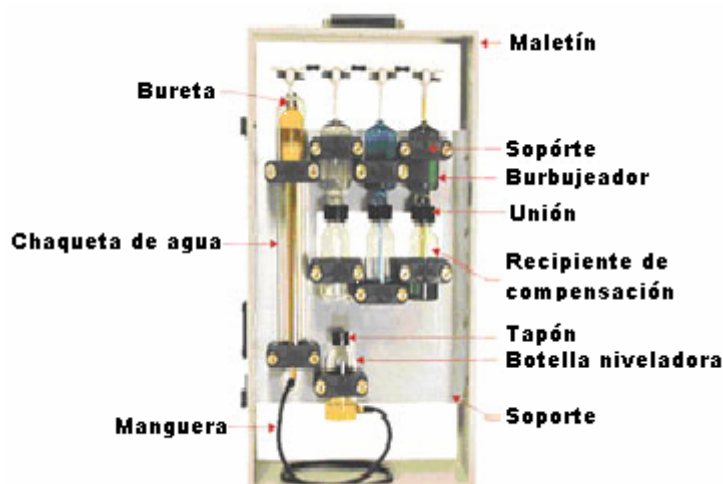


Figura 28. Aparato Orsat para analizar gases de combustión.

$$\%CO_2 = 100 \frac{(V_1 - V_2)}{V_1}$$

De modo similar, se va haciendo pasar el resto por el burbujeador que contiene una solución alcalina de pirogalato que absorbe oxígeno ( $O_2$ ).

$$\%O_2 = 100 \frac{(V_2 - V_3)}{V_1}$$

Después se hace pasar por el burbujeador que contiene una solución ácida de cloruro cuproso para absorber el monóxido de carbono (CO).

$$\%CO = 100 \frac{(V_3 - V_4)}{V_1}$$

$$\%N_2 = 100 \frac{V_4}{V_1}$$

El análisis Orsat es en base seca; esto quiere decir que no se tiene en cuenta el vapor de agua presente en los gases de combustión.

Si los gases de combustión contienen bióxido de azufre, hidrocarburos u otros gases diferentes a  $CO_2$ , CO,  $O_2$  y  $N_2$ , el análisis Orsat normal no los determina, y los adiciona al valor del dióxido de nitrógeno ( $N_2$ ).

Una vez realizado el análisis Orsat (análisis de los gases de combustión) se determina la masa molar del gas seco en la chimenea a partir del porcentaje molar de los gases de combustión.

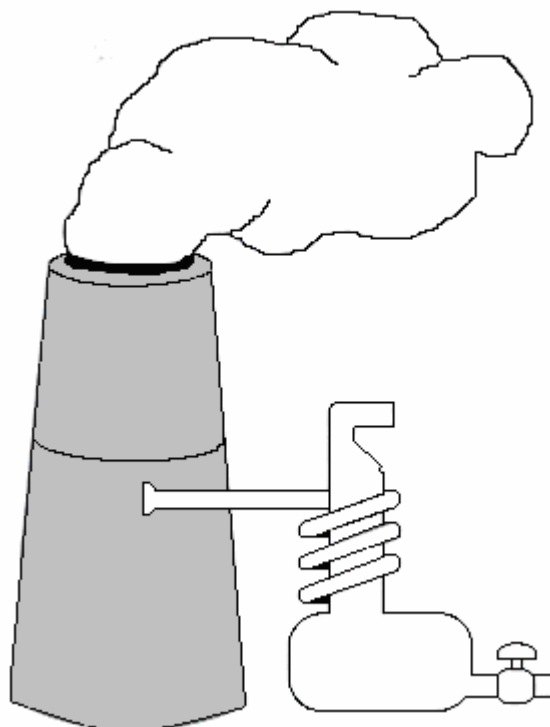
$$M_d = 0.44(\%CO_2) + 0.32(\%O_2) + .028(\%CO + \%N_2)$$

En la cual:

$M_d$  = Masa molar del gas seco en la chimenea, g/mol.

### 3.3.4 Método 4: Procedimiento para la determinación de contenido de humedad de los gases de la chimenea figura 29.

#### Método 4.



**Figura 29. Representación esquemática del Método 4.**

Este método es aplicable para determinar el contenido de humedad del gas de chimenea. Dos procedimientos son usados: El primero es un método de referencia, para determinaciones exactas del contenido de humedad (tal como son necesarias para calcular emisiones). El segundo es un método aproximado que suministra estimativos del porcentaje de humedad para ayudar en el establecimiento del muestreo isocinético con anterioridad a la medición de la emisión de contaminantes. El método descrito aquí proporciona una aproximación. Son también aceptables métodos alternativos para calcular el contenido de humedad como: tubos secadores, mediciones de temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo (psicometría), técnicas de condensación, cálculos estequiométricos, experiencia previa, etc.

- a. Extracción de una muestra a un gasto constante. Se procurará que el volumen de gas colectado sea, por lo menos, de 0.60 metros cúbicos, a condiciones de referencia, y el gasto de succión del gas no sea mayor a 0.020 metros cúbicos por minuto (0.75 pies cúbicos por minuto). La colección de gas se efectuará con la sonda provista por el equipo de medición, y contará con dispositivo de calentamiento de la misma, a fin de evitar la condensación de humedad.
- b. Remoción de la humedad de la muestra. El equipo a utilizarse será, en diseño, igual al utilizado en el Método 5, determinación de emisión de partículas. El equipo consiste de una sección de cuatro impactores o envases de vidrio, de los cuales dos serán llenados de agua, y el cuarto impactor será llenado con sílica gel. Previo a la medición se registrará el peso de estos tres envases, tanto llenos con agua como llenos con sílica gel. Todos los impactores se encontrarán alojados en una caja, llena con hielo, a fin de permitir la condensación de la humedad presente en los gases de chimenea.

- c. Determinación gravimétrica y volumétrica de la humedad colectada. Posterior a la toma de muestra, se determinará el contenido de humedad mediante el incremento de volumen de agua colectada en los impactores, y, mediante el incremento de peso en el impactor llenado con sílica gel.

Los resultados que se obtengan, de volumen de agua colectada y de peso de agua colectada, serán corregidos a las condiciones de referencia. El contenido de humedad, en los gases de chimenea, será la razón entre el volumen total de agua colectada dividido para dicho volumen más el volumen de gas seco, este último determinado por el equipo de muestreo.

Como alternativa al método descrito, serán aceptables los métodos de estimación tales como técnicas de condensación, técnicas psicrométricas mediante temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo, cálculos estequiométricos, experiencias previas, entre otros.

El método de referencia consiste en tomar una muestra de los gases que circulan por la chimenea, succionándolos con una bomba que los hace pasar a través de un filtro para retener las partículas y por unos burbujeadores, que se encuentran en un baño de hielo, para condensar la humedad. De acuerdo con el volumen de gases muestreado y el volumen de agua recolectada se determina el porcentaje de humedad de los gases.

El volumen de vapor de agua, corregido a condiciones de referencia, colectado en los burbujeadores es:

$$V_{W_{ref}} = [(V_f - V_i)\rho_w + (W_f - W_i)] \frac{RT_{ref}}{P_{ref} M_w}$$

En la cual:

$V_{W_{ref}}$  = Volumen de vapor de agua corregido a condiciones de referencia de P y T, m<sup>3</sup>.

$V_f$  = Volumen final de agua en los tres primeros burbujeadores, ml.

$V_i$  = Volumen inicial de agua en los tres primeros burbujeadores, ml.

$\rho_w$  = Densidad del agua, 0.9982 g/ml.

$W_f$  = Peso final de la sílica gel o del último burbujeador, g.

$W_i$  = Peso inicial de la sílica gel o del último burbujeador, g.

$R$  = Constante de los gases ideales, 0.06236 mm Hg m<sup>3</sup>/mol °K.

$T_{ref}$  = Temperatura de referencia, 298 °K.

$P_{ref}$  = Presión de referencia, 760 mm Hg.

$M_w$  = Masa molar del agua, 18.0 g/mol.

Si en lugar de medir el volumen inicial y final de agua en los tres primeros burbujeadores, estos se pesan para determinar la cantidad de agua recolectada, la ecuación anterior se modifica de esta manera:

$$V_{m_{ref}} = (P_f - P_i) \frac{RT_{ref}}{P_{ref} M_w}$$

En la cual:

$V_{W_{ref}}$  = Volumen de vapor de agua corregido a condiciones de referencia de P y T, m<sup>3</sup>.

$P_f$  = Peso final de agua en todos los burbujeadores, g.

- $P_i$  = Peso inicial de agua en todos los burbujeadores, g.  
 $R$  = Constante de los gases ideales, 0.06236 mm Hg m<sup>3</sup>/mol °K.  
 $T_{ref}$  = Temperatura de referencia, 298 °K.  
 $P_{ref}$  = Presión de referencia, 760 mm Hg.  
 $M_w$  = Masa molar del agua, 18.0 g/mol.

Los tres primeros burbujeadores, además de ganar peso por el agua colectada, también lo pueden hacer por las partículas que atraviesan el filtro (partículas menores de 0.3 µm) y quedan atrapadas en el líquido. Por eso se registra el volumen de agua recolectado y no su peso. Sin embargo, la masa de las partículas recogidas es tan pequeña con respecto a la del agua recolectada que la masa de las partículas se puede despreciar. Otra alternativa es, corregir el peso del agua recogida en los burbujeadores al restarle el peso de las partículas que quedan atrapadas en el líquido.

El volumen de gas seco medido por el medidor gas, corregido a condiciones de referencia es:

$$Vm_{ref} = VmY \frac{PmT_{ref}}{P_{ref}Tm}$$

En la cual:

- $Vm_{ref}$  = Volumen de gas seco corregido a condiciones de referencia de P y T, m<sup>3</sup>.  
 $Vm$  = Volumen de gas seco medido por el medidor de gas seco, m<sup>3</sup>.  
 $Y$  = Factor de calibración del medidor de gas seco.  
 $Pm$  = Presión absoluta en el medidor de gas seco, mm Hg.  
 $T_{ref}$  = Temperatura de referencia, 298 °K.  
 $P_{ref}$  = Presión de referencia, 760 mm Hg.  
 $Tm$  = Temperatura promedio en el medidor de gas seco, °K.

La presión absoluta en el medidor de gas seco es igual a:

$$P_m = P_a + \frac{\overline{\Delta H}}{13.6}$$

En la cual:

- $P_m$  = Presión absoluta en el medidor de gas seco, mm Hg.  
 $P_a$  = Presión barométrica, mm Hg.  
 $\overline{\Delta H}$  = Presión diferencial promedio a través del orificio, mm H<sub>2</sub>O.

El contenido de humedad de los gases en la chimenea esta dado por la siguiente ecuación:

$$B_{ws} = \frac{Vw_{ref}}{Vw_{ref} + Vm_{ref}}$$

En la cual:

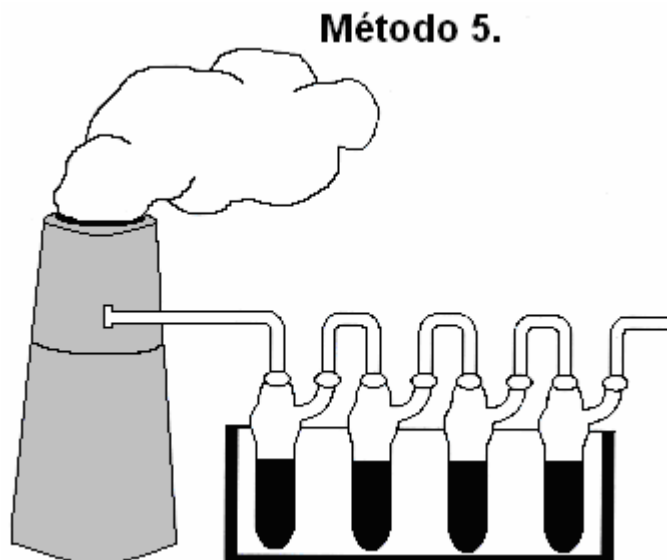
- $B_{ws}$  = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.  
 $Vw_{ref}$  = Volumen de vapor de agua corregido a condiciones de referencia P y T, m<sup>3</sup>.  
 $Vm_{ref}$  = Volumen de gas seco corregido a condiciones de referencia P y T, m<sup>3</sup>.

El método de referencia frecuentemente se realiza simultáneamente con una medición de emisión de contaminantes; cuando es así, el cálculo del porcentaje isocinético y la emisión



de contaminantes para la corrida se basarán sobre los resultados del método de referencia o su equivalente.

### 3.3.5 Método 5. Procedimiento para la determinación de emisiones de Partículas en Fuentes Fijas figura 30.



**Figura 30. Representación esquemática del Método 5.**

El Método 5 y otros métodos de medición para fuentes estacionarias dependen en el uso de los Métodos de Prueba 1 a 4 de la EPA descritos anteriormente.

Este método es fundamental para el desarrollo de las pruebas que se efectúan en fuentes fijas, donde se generan emisiones de partículas a la atmósfera, se establecen los criterios con los cuáles deben de efectuarse la toma de muestra, así como los equipos e instrumentos necesarios para efectuar la prueba, señalando los cuidados necesarios que se deben tomar desde el inicio de la prueba hasta el término de la misma.

Además el presente método contiene un diagrama básico de la distribución de los elementos con que debe contar el equipo de recolección y medición.

Las medidas para contrarrestar los problemas de contaminación de cualquier tipo comprenden diferentes etapas de trabajo, desde el análisis de las causas del problema mismo hasta la aplicación de medidas de control y/o eliminación de la misma. En el caso de la contaminación atmosférica por emisiones de gases provenientes de fuentes fijas, la etapa de análisis del problema involucra el conocimiento o identificación de los contaminantes, es decir, la caracterización y cantidad en que se emiten. Tal necesidad demanda métodos y técnicas confiables para llevar a cabo dicha operación. El método recomendado para medir las emisiones de partículas es el método isocinético. Este método es eficaz, práctico y costéable; el reconocimiento que le han otorgado organismos internacionales así lo demuestra. De tal referencia se desprende el presente trabajo que a manera de tesis pretende contribuir al conocimiento y difusión del método isocinético e incluso a promover su aplicación en los casos para los que sea necesario llevarse acabo con el fin de obtener resultados validos que sean confiables con las recomendaciones de las normas de emisión tanto a nivel nacional como internacional.

A continuación se describen los pasos principales para un muestreo Isocinético:

- a. Colección de muestras mediante el equipo denominado tren isocinético. Este equipo consiste de cuatro secciones principales: la sonda de captación de partículas, la sección del filtro, la sección de condensación de humedad, o de impactores, y, la sección de medidor de volumen de gas seco muestreado. Las mediciones a efectuarse deberán incluir la descripción técnica del equipo tren isocinético, el cual necesariamente deberá proveer las especificaciones del fabricante, y en las que se especifique que el equipo cumple con el método promulgado por la US EPA.

El termino "isocinético" proviene del griego "iso" que significa "igual que" y "cinético" que significa "velocidad de los cuerpos", en pocas palabras significa "igualdad de velocidades", entonces un muestreo isocinético se basa en la extracción de una muestra de las emisiones de una fuente contaminante teniendo como prioridad técnica este concepto, es decir que la muestra se debe extraer a la misma velocidad que fluyen los gases y partículas en el interior de la chimenea considerando además las condiciones de operación a las que se lleva a cabo dicho muestreo. Lo anterior se logra, según el método isocinético, en la etapa de muestreo, y se corrobora en el análisis y tratamiento de datos.

La operación del equipo de monitoreo se fundamenta básicamente en los pasos que se ilustran en la figura 31.

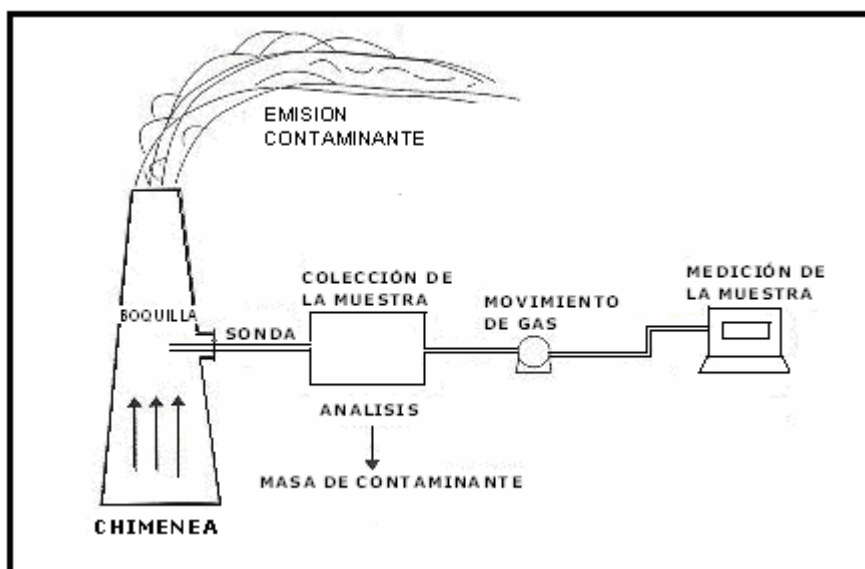
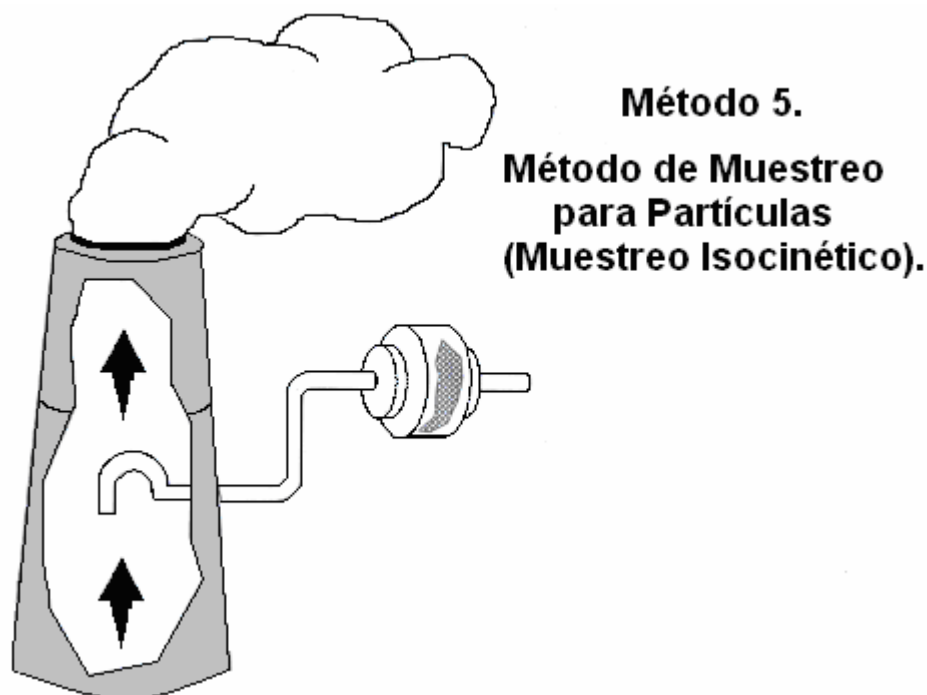


Figura 31. Diagrama del proceso de muestreo de gases en fuentes fijas.

Como se puede ver en la figura 31, el proceso del muestreo se desarrolla con miras a obtener una cantidad conveniente de gases y partículas usando un tren de muestreo.

Las operaciones involucradas en un tren de muestreo típico son:

- a. **Extracción**→**Transporte**→**Separación**→**Desplazamiento de la muestra**→**Mediciones**. La extracción se hace con una boquilla, el transporte a través de una sonda, la separación mediante un colector pudiendo ser un filtro y/o un ciclón, el desplazamiento se lleva a cabo por succión y las mediciones se efectúan con instrumentos adecuados como se muestra en la figura 32.



**Figura 32. Representación esquemática de un muestreo isocinético.**

- b. Las muestras de partículas serán colectadas, en cada uno de los puntos de muestreo al interior de la chimenea, definidos en el Método 1, durante un periodo de cinco (5) minutos en cada uno de dichos puntos.  
En ningún caso el tiempo de muestreo, en cada punto, será inferior a tres (3) minutos.

La forma de cuantificar la masa de partículas colectadas es por la diferencia de un peso inicial conocido y uno final por conocer, recolectados en un medio tal como un filtro considerando la acumulación en los otros componentes del tren de muestreo. El volumen del gas muestreado se puede medir con un gasómetro, la velocidad se tiene después de una serie de desarrollos matemáticos y la humedad cuantificando la cantidad de agua contenida en el volumen de gas muestreado. Esto último se logra utilizando un medio de absorción que se encargue de condensar o retener las cantidades gaseosas o líquidas de agua.

El funcionamiento de los elementos del tren de muestreo y la técnica de monitoreo se tratarán específicamente y con mayor amplitud en los siguientes capítulos.

- c. La condición de isocinétismo aceptada deberá estar comprendida entre 90 y 110 % de isocinétismo.

El isocinétismo, como cualquier otra técnica, requiere de cierta precisión, de modo que el intervalo de error sea de  $\pm 10$  % como máximo. Esta desviación permisible se refiere a la relación entre la velocidad en la entrada de la boquilla y la velocidad local de la chimenea para cada punto de muestreo.

El porcentaje de isocinétismo esta dado por la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Isocinetismo} = 100 \frac{V_n}{V_s}$$

En la cual:

$V_n$  = Velocidad de toma de muestra.

$V_s$  = Velocidad de gases en chimenea.

- d. Previo a la ejecución de mediciones, se deberá efectuar una prueba de detección de fugas en el equipo de muestreo, una vez armado en el sitio.
- e. La masa de las partículas se determinará gravimétricamente, esto es, mediante la diferencia de peso en el filtro a la finalización de la medición con respecto al peso previo al inicio de la misma.
- f. Además, se determinará el peso de aquellas partículas captadas en la sonda de muestreo. Para esto, se realizará un enjuague del interior de la sonda, de la boquilla de succión de la sonda, y de accesorios de esta, utilizando para el efecto acetona. El líquido colectado será almacenado en un frasco de vidrio, y llevado a laboratorio, en donde será transferido a un vaso de precipitación, será registrado su peso inicial, y se dejará evaporar el solvente a temperatura y presión ambiente. El vaso será secado por un periodo de 24 horas y registrado su peso final.
- g. La masa total de partículas colectadas será la suma de las partículas obtenidas en el filtro más aquellas captadas al interior de la sonda de muestreo.
- h. La concentración de las partículas emitidas, a expresarse en miligramos por metro cúbico de aire seco, será la masa total de partículas dividida para el volumen total de gas seco muestreado, y corregido a las condiciones de referencia.

La muestra de gas que contiene a las partículas se succiona isocinéticamente del ducto o chimenea por el cual se emite a la atmósfera, haciendo uso de una sonda acoplado a un tubo pitot.

El tubo pitot tiene como propósito medir la presión de velocidad y así, calcular la velocidad de los gases en la chimenea o ducto donde se éste haciendo el muestreo.

La boquilla de muestreo puede variarse, para así modificar la velocidad de succión de tal modo que se pueda garantizar la condición de isocinétismo.

La sonda consta de dos tubos concéntricos y entre los dos va una resistencia eléctrica para calentar la sonda y evitar condensación de los gases cuando se succionan a través de la tobera.

El modulo de muestreo consta de la caja caliente donde se coloca el ciclón y el filtro para colectar las partículas, y la caja fría donde se colocan en un baño de hielo los burbujeadores que retienen la humedad del flujo gaseoso.

Los gases luego de pasar por la sonda entran al ciclón, donde se retienen las partículas más grandes, y luego estos gases pasan por el filtro, en el cual se quedan las partículas más finas. Esto sucede en la caja caliente, la cual se mantiene así por medio de una resistencia, para impedir la condensación de los gases en el filtro, lo que ocasionaría taponamiento del mismo. Las partículas recolectadas en los filtros se determinan gravimétricamente.

Las partículas son recolectadas en un filtro de fibra de vidrio, mantenido a una temperatura en el rango de  $120 \pm 14^{\circ}\text{C}$  u otra temperatura tal como se especifique en la regulación o sea aprobada para propósitos especiales por la EPA para la aplicación específica.

Los gases cuando salen del modulo de muestreo pasan a través del cordón umbilical o línea de vacío al modulo de control. El cordón umbilical está compuesto de cables eléctricos, línea de succión y conexiones.

El modulo de control es la unidad que controla las operaciones del muestreo y está compuesto por dos manómetros (para determinar la presión de velocidad en el tubo pitot y la caída de presión en la placa de orificio), un medidor de gas seco, una bomba de vacío, válvulas de ajuste grueso y fino (solamente en equipos manuales) e interruptores para controlar el sistema.

El éxito de cualquier monitoreo depende enormemente de la habilidad del personal encargado para lograr las condiciones isocinéticas.

Para lograr mantener las condiciones isocinéticas depende de la velocidad de medición de  $\Delta p$ , y la subsecuente determinación del valor de:

$$\Delta H = K \cdot \Delta p$$

Donde:

$\Delta H$  = Presión diferencial promedio del orificio critico.

$K$  = Constante.

$\Delta p$  = Presión dinámica.

lo cual permite ajustar el flujo al nivel requerido.

Un personal con experiencia en monitoreos de chimeneas puede lograr las condiciones isocinéticas en un mínimo de tiempo después de cada desplazamiento de la sonda.

Las técnicas que se utiliza para muestrear y analizar el aire son muchas y variadas. La elección del método depende de alguna manera de la fuente. Por ejemplo, las emisiones se miden directamente de los puntos de descarga de las chimeneas. Si las cantidades y densidades de los contaminantes se necesitan para áreas grandes, los métodos o las áreas remotas son preferibles a la comprobación de la fuente.

Las normas y las prácticas de muestreo para los gases de chimeneas sean desarrolladas manualmente por la Agencia de la Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA).

Estos métodos de referencia determinaran los datos de las concentraciones representativas para varios compuestos de interés. Estos métodos de muestreo han sido validados por laboratorios y por estudios de campo, y los datos generados de ellos tendrán exactitudes predecibles e irrepetibles.

**CAPITULO IV**

## APARATOS, INSTRUMENTOS Y EQUIPOS.

Los materiales y equipos utilizados para muestrear emisiones de partículas en fuentes fijas se pueden clasificar de acuerdo a la etapa o etapas en las que se utilizan. De esta manera, se utilizan materiales, equipo o reactivos en:

- Etapa previa al muestreo, durante y después del muestreo.
- Colección de la muestra.
- El análisis en laboratorio de las muestras obtenidas.

Por la facilidad se mencionan primeramente los materiales y los equipos que básicamente se utilizan en la etapa previa y durante el muestreo, enseguida se mencionan los materiales utilizados para la colección de la muestra y al final todos los reactivos necesarios a lo largo del muestreo, especificando la etapa en la que son necesarios.

Un muestreo isocinético requiere de una cantidad considerable de equipo. Este incluye material de vidrio, dispositivos de medición de temperatura, presión, velocidad y otros elementos que contribuyen al manejo y transporte de la muestra. La mayoría de estos equipos requieren tanto de mantenimiento como de ser calibrados y aprobados por autoridades ambientales ó laboratorios acreditados.

Si se considera junto con lo anterior, la necesidad de seleccionar el equipo adecuado para las condiciones de los procesos generadores de partículas, es importante reconocer cada uno de los elementos que integran un equipo típico de monitoreo.

### 4.1 Descripción del sistema de muestreo isocinético.

El tren de muestreo se debe diseñar para cumplir con lo siguiente:

- 1.- Extraer una muestra de gases de chimenea, minimizando los flujos turbulentos.
- 2.- Transportar la muestra sin cambiar la naturaleza química ó física de los contaminantes.
- 3.- Separar los contaminantes del gas muestreado para su subsecuente análisis.
- 4.- Simultáneamente, realizar las mediciones de presión estática, temperatura y volumen total muestreado de la chimenea.

Un tren de muestreo instalado correctamente eliminará o minimizará los errores asociados con cada paso del proceso de monitoreo.

### 4.2 *Tren de Muestreo.*

El esquema del tren muestreo se muestra en la figura 33.

Nos concentraremos en el análisis de un equipo para muestreo isocinético de chimeneas según el Método 5 de EPA de los Estados Unidos “Determinación de emisiones de partículas a partir de fuentes estacionarias”, el esquema básico se describe a continuación:

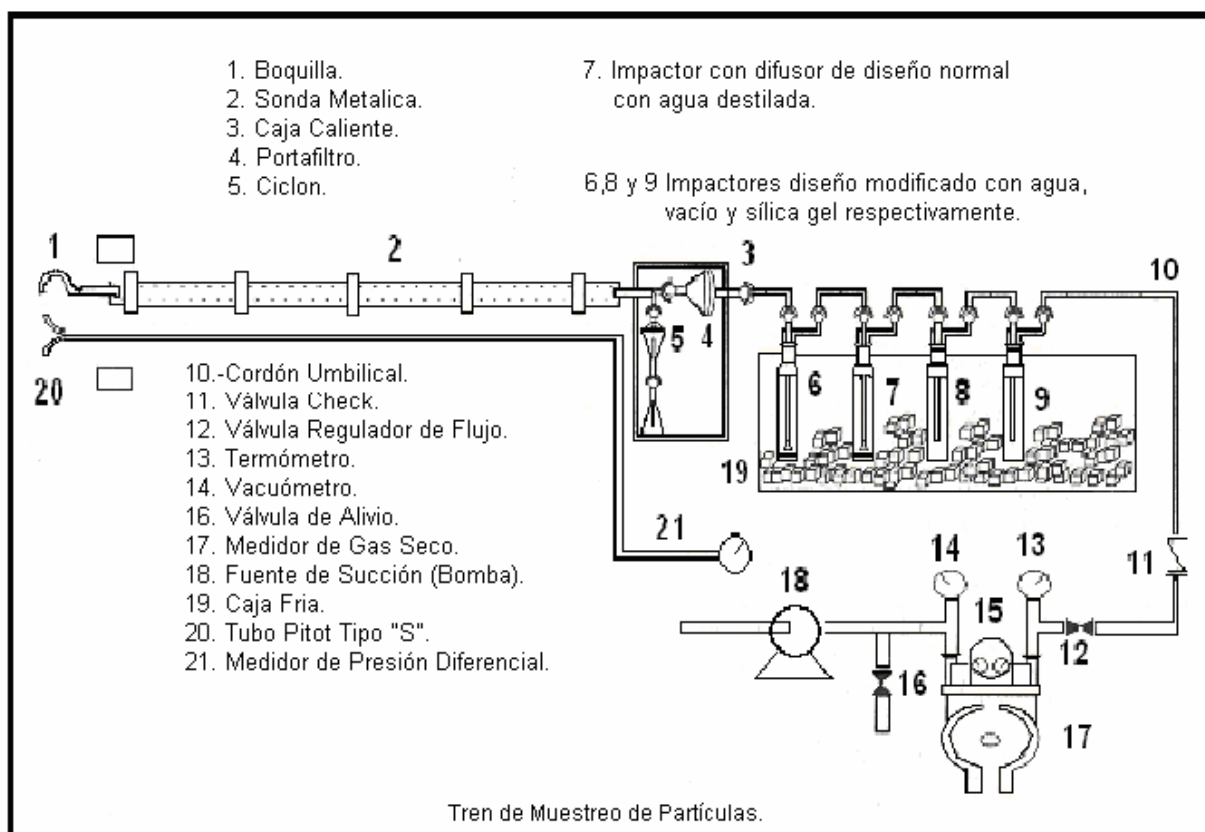


Figura 33. Tren de muestreo típico para muestreo de partículas.

#### 4.2.1 Boquillas.

La boquilla de muestreo, succiona las muestras de la chimenea; es un tubo de sección circular que se introduce en la corriente de productos de combustión, enfrentándose a la corriente de gases como se muestra en la figura 34.

Las boquillas deben de ser de un material adecuado para resistir las condiciones del muestreo con puntas y bordes de adelgazamiento gradual, con un diámetro de entrada mínimo de 6 mm. Se recomiendan de acero inoxidable (316) o de vidrio. El ángulo de la punta será  $\leq 30^\circ$  y estará al frente para preservar su diámetro interno como se muestra en la figura 20. La boquilla de la sonda está sujeta al diseño del ángulo, a no ser que se especifique otra cosa en el manual. Si está hecha de acero inoxidable, la boquilla será construida de una tubería sin costuras.

No se debe utilizar boquillas que presenten deterioro principalmente en el devanado de entrada.

Toda boquilla deteriorada debe requerir rectificación en su área para poderse reutilizar.

Para efectos de cálculo se debe utilizar el valor real del diámetro interno de la boquilla y no el nominal.

##### 4.2.1.1 Selección del diámetro de la boquilla de muestreo.

La selección del diámetro de la boquilla es una decisión muy importante en el muestreo isocinético, ya que el área de la boquilla afecta fuertemente la velocidad de muestreo. La boquilla de muestreo puede variarse, para así modificar la velocidad de succión de tal modo que se pueda garantizar la condición de isocinétismo. La mejor boquilla es aquella que



permite el isocinétismo (velocidad del gas en la boquilla de muestreo igual a la velocidad del gas en la chimenea) a un caudal de muestreo aproximadamente igual al caudal de diseño óptimo (0.0212 m<sup>3</sup>/min).

Para seleccionar el diámetro ideal de la boquilla se requiere efectuar un recorrido preliminar, este consiste en medir los siguientes parámetros:

- a). Presión de velocidad en cada punto.
- b). Temperatura del gas en la chimenea en cada punto.
- C. Presión estática.
- d). Presión barométrica.
- e). Asumir o determinar el porcentaje de humedad.

Con los datos del recorrido preliminar, se determina el diámetro ideal de la boquilla para el muestreo:

$$Dn = \sqrt{\frac{607.7 Q_m P_m}{T_m C_p (1 - B_{ws})}} \sqrt{\frac{T_s M_s}{P_s \Delta p}}$$

En la cual:

$D_n$  = Diámetro de la boquilla, mm.

$Q_m$  = Caudal a través del medidor de gas seco, normalmente 0.0212 m<sup>3</sup>/min.

$P_m$  = Presión absoluta en el medidor de gas seco, mm Hg.

$T_m$  = Temperatura promedio en el medidor de gas seco, °K.

$C_p$  = Coeficiente del tubo pitot.

$B_{ws}$  = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

$T_s$  = Temperatura promedio del gas en la chimenea, °K.

$M_s$  = Masa molar del gas en la chimenea, g/mol.

$P_s$  = Presión absoluta en la chimenea, mm Hg.

$\overline{\Delta p}$  = Presión de velocidad promedio del gas en la chimenea, mm H<sub>2</sub>O.

La presión absoluta en la chimenea se puede calcular, sin embargo, para ahorrar tiempo se puede asumir igual a la presión atmosférica. De igual forma, la presión absoluta y la temperatura promedio en el medidor de gas seco se pueden asumir iguales a la presión atmosférica y a la temperatura ambiente respectivamente, ya que al seleccionar el diámetro ideal de la boquilla es el primer paso para la realización del muestreo isocinético.

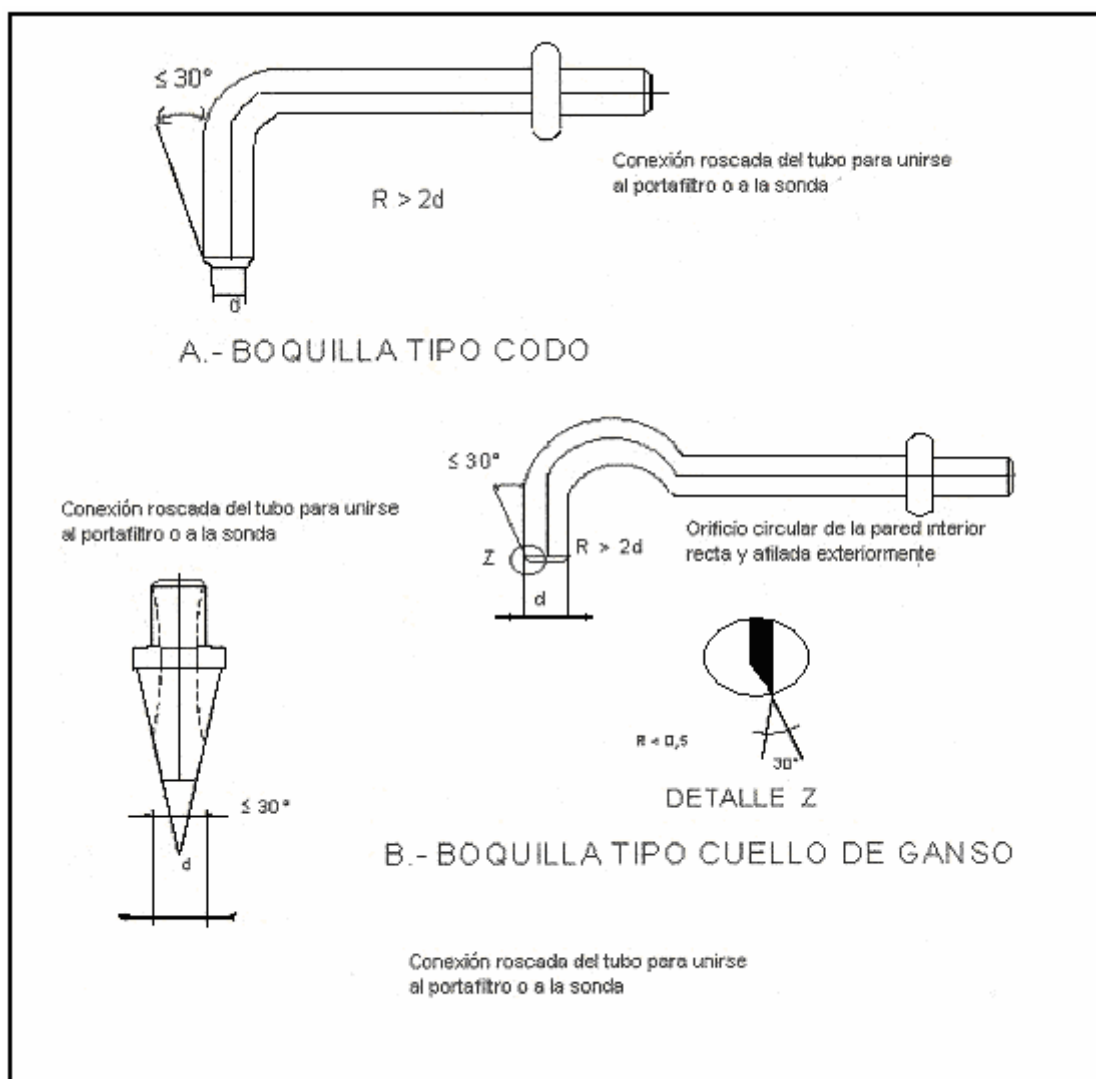


Figura 34. Boquillas Típicas de Muestreo.

#### 4.2.2 Sondas de Muestreo.

La sonda consta de dos tubos concéntricos y entre los dos va una resistencia eléctrica para calentar la sonda y evitar condensación de los gases cuando se succionan a través del ducto como se representa en la figura 35.

Sonda. La sonda debe estar construida de un material adecuado para resistir las condiciones de muestreo, con un sistema de calentamiento capaz de mantener la temperatura del gas a  $120 \pm 14^\circ\text{C} \cdot (248 \pm 25^\circ\text{F})$ .

Las sondas pueden ser de vidrio de borosilicato o cuarzo para chimeneas con temperaturas de hasta  $480^\circ\text{C} \cdot (900^\circ\text{F})$  aproximadamente.

Como alternativa, se pueden utilizar sondas de metal (por ejemplo, acero inoxidable 316, o de algún material resistente a la corrosión como el Incoloy 825 u otro material).

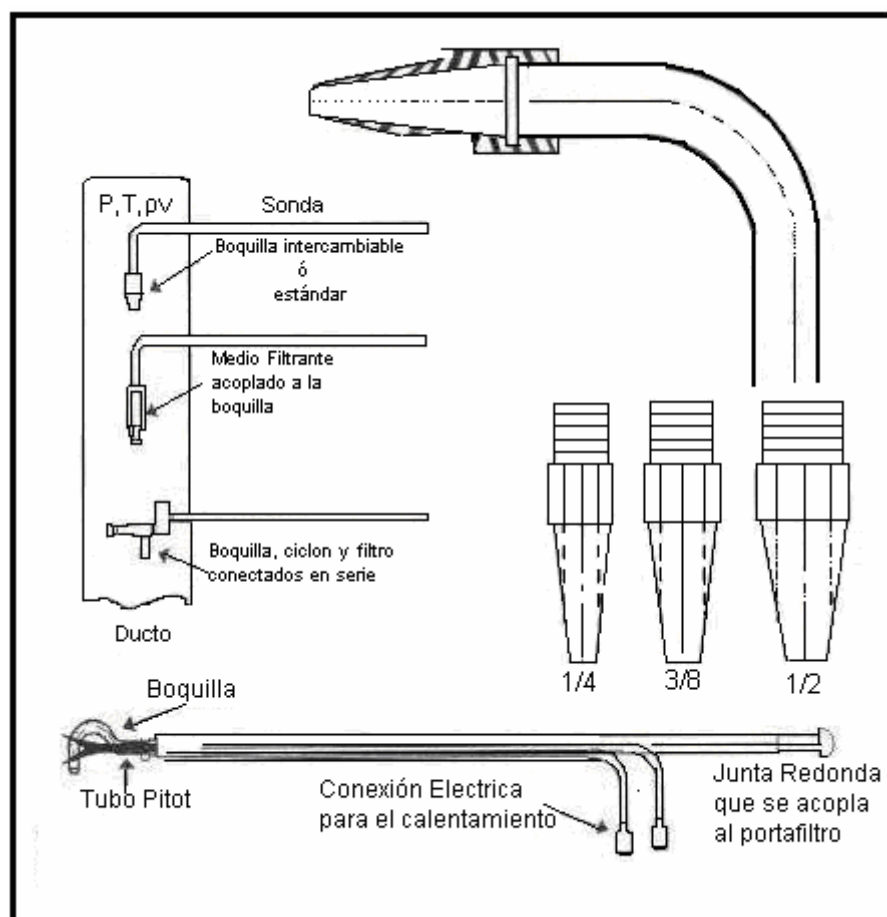


Figura 35. Diseños típicos de sondas.

#### 4.2.3 Medios de Colección.

Los colectores capturan las partículas sólidas o líquidas de la corriente del gas, reteniéndolas para su subsecuente análisis. Se puede definir tres tipos de medios de colección:

- 1.- Colectores en vía seca (filtros, ciclones).
- 2.- Colectores en vía húmeda (Contenedores ó Burbujeadores).
- 3.- Trampas de hielo.

Los medio de colección debe tener las siguientes características.

- 1.- Deben de estar diseñados y fabricados de acuerdo a las características del muestreo.
- 2.- No contaminar la muestra.
- 3.- Posibilidad de ser instalado y manejado de manera sencilla.
- 4.- No permitir infiltraciones.
- 5.- No debe reaccionar ni obstaculiza con el análisis de la muestra.

##### 4.2.3.1 Colectores en vía seca.

Los colectores en vía seca son dispositivos que no tienen la necesidad requerir condensaciones ni de requerir soluciones absorbedoras, y capaces de retener las partículas de una corriente gaseosa. Estos pueden ser filtros ó ciclones.

Ciclones.

En muchos trenes de muestreo se adaptan ciclones al portafiltros si existe una concentración importante apreciable de partículas en los gases de chimenea.

Los ciclones de 1.5 pulgadas pueden remover consecuentemente partículas por arriba de 5-10 micras. Se debe prever el calentamiento del ciclón. Con velocidades muy elevadas de entrada al ciclón ( $> 100$  ft/seg), las partículas pueden rebotar en las paredes y escapar o causar el roce entre ellas. A velocidades menores ( $< 30$  ft/seg) la eficiencia del ciclón puede decrecer.

Caja Caliente.

Contiene en su interior el filtro que recolecta las partículas. Está asociado a un controlador de temperatura que supervisa y controla la estabilidad térmica.

Filtros y portafiltros.

El filtro está contenido en un portafiltro. El material del filtro no debe cambiar las propiedades del contaminante muestreado y debe tener la porosidad adecuada de acuerdo al tamaño de partícula que se está muestreando. También se debe considerar su tamaño y su resistencia a la corrosión y a la temperatura. El filtro retiene las partículas contaminantes para poder posteriormente ser analizadas en laboratorio.

Filtros de fibra de vidrio, con una cubierta orgánica, mostrando por lo menos una eficiencia del 99.95% ( $< 0.05\%$  de penetración) en 0.3 micras de dioctyl phthalate en partículas de humo. Para las fuentes que contienen  $\text{SO}_2$  o  $\text{SO}_3$ , el material que debe estar hecho los filtros debe ser neutro al  $\text{SO}_2$  y al  $\text{SO}_3$ .

Revisar los filtros visualmente a contra luz para detectar irregularidades, defectos o perforaciones. Marque los filtros cerca del borde, o como una alternativa, etiquete los contenedores de embarque (Cajas Petri de vidrio o de polietileno) y mantenga cada filtro en su caja previamente identificados.

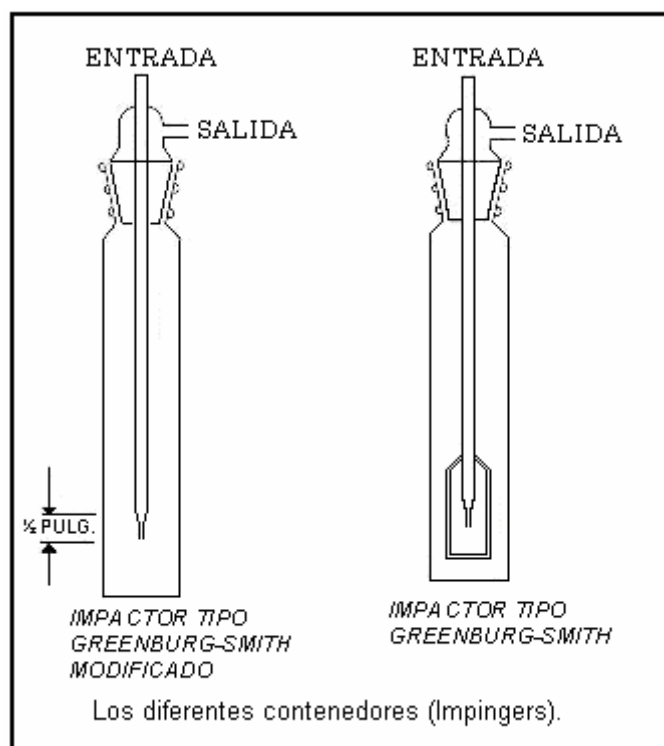
Acondicionar la humedad de los filtros en el desecador a  $20 \pm 5.6$  °C ( $68 \pm 10$  °F) a presión atmosférica por lo menos 24 horas. Pesar cada filtro a intervalos de 6 horas por lo menos a un peso constante, el cual se define aquí como menor o igual al 0.5 mg de su peso anterior. Registre el resultado al 0.1 mg más cercano. Durante cada pesaje el filtro no se puede dejarse expuesto por más de 2 min. a la atmósfera del laboratorio y una humedad relativa mayor al 50%.

Portafiltros. Se puede utilizar cualquier modelo siempre y cuando no se pierda el medio filtrante al ser desmontado y que no se pierda su contenido. El material puede ser de vidrio de borosilicato, teflón, acero inoxidable o aluminio. El diseño del portafiltros debe garantizar la hermeticidad tanto en la entrada como la salida, así como los alrededores del filtro.

#### **4.2.3.2 Colectores en vía húmeda (Contenedores).**

**Caja fría:** Es un baño térmico con hielo y agua, los productos de combustión pasan por un conjunto de recipientes de vidrio que intercambian calor con el baño, bajando la temperatura de los gases y removiendo su humedad al condensarse el vapor de agua.

Los contaminantes gaseosos y las partículas se pueden recolectar simultáneamente en medios de colección por vía húmeda conocidos como contenedores, (ver la figura 36 Burbujeadores ó impingers).



**Figura 36. Tipos de contenedores comúnmente utilizados en un muestreo de partículas.**

Durante la prueba se utilizan contenedores para determinar el contenido de humedad de los gases de chimenea. Se requieren 4 contenedores conectados en serie mediante conexiones de vidrio o de cualquier material resistente que no contamine.

El primero, tercero y cuarto contenedores son del diseño Greenburg-Smith modificando el vástago con un tubo de vidrio de 1.3 cm que se extiende 1.3 cm a partir del fondo del contenedor. El segundo impactor debe ser del diseño Greenburg-Smith con un vástago estándar.

El primero y el segundo impactor contienen cantidades conocidas de agua, el tercero debe estar vacío y el cuarto tendrá una cantidad conocida de sílica gel ó un desecante equivalente. Si se utiliza otro sistema desecante es recomendable que se coloque entre el sistema de contenedores y la bomba que se encarga de succionar la muestra de gases para prevenir la condensación de humedad.

Si se cambian las soluciones absorbedoras de los impactores, se puede determinar la emisión de otros contaminantes. Por ejemplo, utilizar en lugar de agua una solución de alcohol isopropílico en el primero de los impactores, una solución de peróxido de hidrógeno en el segundo, tercero y cuarto contenedores deben estar vacíos y un quinto impactor con la sílica gel, se podrá determinar por absorción el  $\text{SO}_2$  y las neblinas de  $\text{SO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

#### 4.2.3.3 Trampas de Hielo.

Las trampas de hielo o aparatos de condensación se utilizan para recolección de contaminantes condensables que se encuentran en estado gaseoso a las condiciones de la chimenea pero forman nubes de partículas a temperaturas menores.

#### **4.2.4 Medios de succión o desplazamiento del gas.**

Las bombas que utilizan los trenes de muestreo deben tener una capacidad de al menos  $2\text{ft}^3/m$  a una caída de presión de aproximadamente  $15\text{inHg}$  o  $1\text{ft}^3/m$  a  $27\text{inHg}$ . Normalmente, la caída de presión a través del tren aumenta conforme avanza el tiempo de muestreo ya que el filtro se cubre de sólidos y la sílica gel, que se utiliza como material absorbente en uno de los impactores, se humedece. La bomba debe ser capaz de mantener una velocidad de muestreo constante tanto como lo requiera la boquilla ya que ésta se encuentra bajo condiciones variables. El tiempo que puede permanecer funcionando y la facilidad de su manejo son consideraciones importantes. No se deben tener fugas ya que el volumen muestreado sería menor que el volumen medido, lo que ocasiona errores en la determinación de la concentración de los contaminantes.

##### **4.2.4.1 Cordón umbilical.**

Con este nombre se conoce al sistema que se encarga de transportar la muestra de gases que sale del tren de contenedores desde el lugar, de muestreo hasta la consola donde se registran los datos y el flujo. La consola, que contiene al gasómetro seco, puede ubicarse a una distancia considerable del lugar de muestreo por lo que es necesario que el cordón umbilical tenga entre 20 y 30 metros de largo. De igual manera, este cordón debe tener la posibilidad de mantener la muestra a las condiciones de muestreo, por lo que debe tener un sistema de calentamiento y aislamiento del medio que la rodea. Debe ser construida considerando el trabajo en planta, es decir con materiales altamente resistentes.

El cordón conduce también las señales de presión del tubo pitot, las señales de temperatura y el control de temperatura de la caja caliente y la sonda.

#### **4.2.5 Instrumentos asociados al muestreo.**

Los instrumentos asociados al muestreo se utilizan para determinar las variables que se emplean en cálculos subsecuentes.

##### **4.2.5.1 Medidores de flujo.**

Algunos tipos de medidores de flujo que se emplean en los trenes de muestreo son las placas de orificio, boquillas de succión del flujo, tubos Ventury, rotámetros, etc. Sin embargo, los dos principales medidores de flujo que se utilizan son las placas de orificio, rotámetros y gasómetros.

##### **4.2.5.2 Placas de orificio.**

Con las placas de orificio se produce la mayor pérdida de presión en comparación a los demás elementos primarios más comunes. Así tenemos que, con las tomas de presión  $2\frac{1}{2}$  y 8 diámetros antes y/o después de la placa se está midiendo la pérdida total de presión sin recuperación posterior.

Se mide la máxima diferencial posible con recuperación de presión posterior y, con tomas en la brida se mide una diferencial muy cerca de la máxima, también con recuperación de presión posterior.

La exacta localización de las tomas de presión antes de la placa carece relativamente de importancia, ya que la presión en esa sección es bastante constante. En todas las relaciones de  $D/d$  comerciales. De  $\frac{1}{2} D$  antes de la placa en adelante hasta la placa, la presión aumenta gradualmente en apreciable magnitud en relaciones  $d/D$  arriba de 0.5; debajo de este valor la diferencia de presiones es despreciable. Pero si en la toma de alta presión la localización no es de mayor importancia, si lo es en la de baja presión, ya que existe una región muy inestable después de la vena contracta que deberá ser evitada; y es esta la razón por la que se recomienda para tuberías menores de 2 pulgadas las tomas de placa. La estabilidad es restaurada a 8 diámetros después de la placa pero ya en este punto las presiones son afectadas por una rugosidad anormal en la tubería.

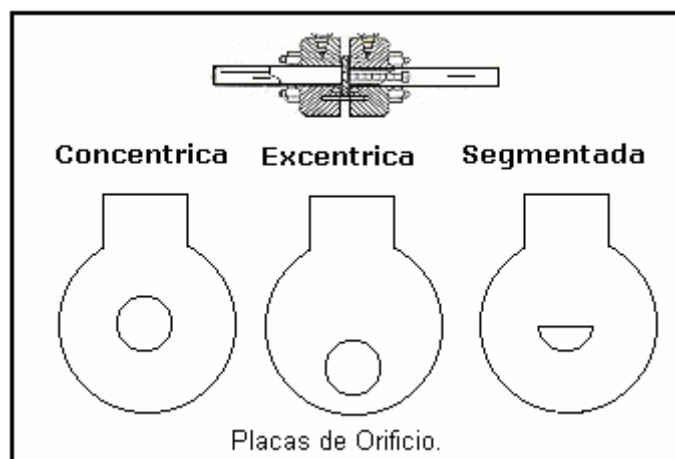
La **concéntrica** sirve para líquidos.

**Excéntrica** para los gases donde los cambios de presión implican condensación.

Cuando los fluidos contienen un alto porcentaje de gases disueltos.

### Segmentada

Particular en suspensión implican turbulencias que limpiaran (para que no se aglomeren partículas) el lado de alta presión evitando errores en la medición. Esto se muestra en la figura 37.



**Figura 37. Diferentes tipos de placas de orificio.**

### 4.2.5.3 Rotámetros.

Los rotámetros normalmente están sujetos a una escala cuya lectura esté relacionada con el flujo volumétrico. Los rotámetros deben ser calibrados por el fabricante a 1atm y 70°F. Cuando se usa el rotámetro a presiones y temperaturas diferentes, la lectura debe corregirse utilizando factores de conversión como se muestra en la figura 38.

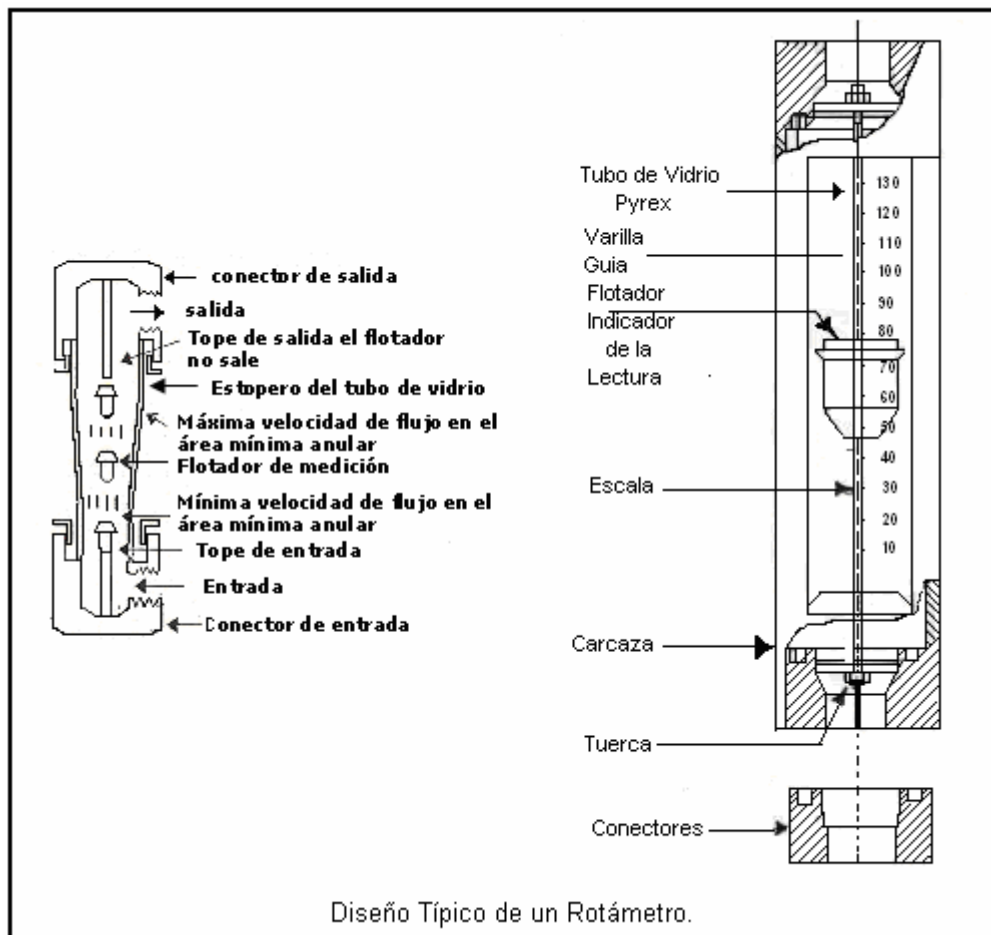


Figura 38. Esquema de un rotámetro típico.

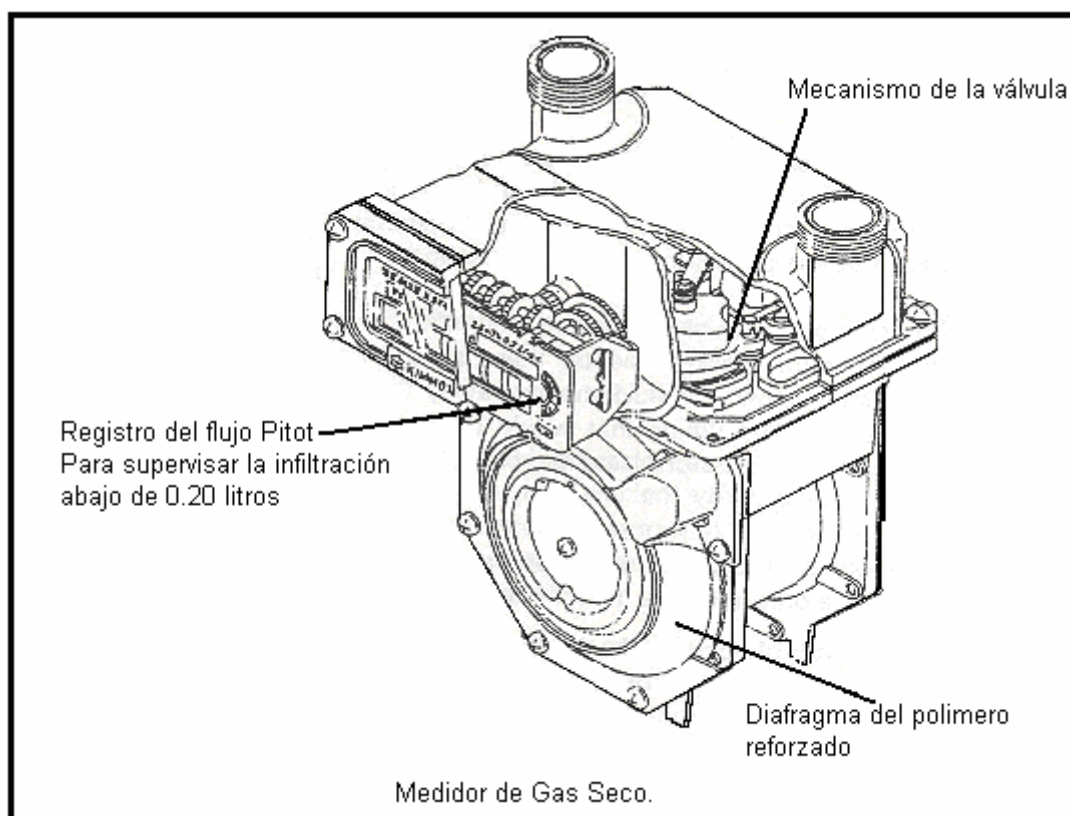
#### 4.2.5.4 Medidor de gas seco.

Los medidores de gas seco son normalmente de desplazamiento positivo tipo diafragma, recibe el gas proveniente de la descarga de la bomba de vacío, cuantificando su volumen. A la salida del medidor de diafragma se instala un orificio calibrado el cual genera una presión diferencial que sirve para correlacionar el caudal que fluye a través de dicha restricción. Como se ilustra en la figura 39. Debido a que los medidores de este tipo pueden ser compensadores de temperatura, se deben hacer chequeos para asegurar las condiciones apropiadas de temperatura relacionando el flujo de gas medido con las condiciones de los gases de chimenea.

#### Bomba de Vacío:

Es un elemento que se encarga de movilizar el fluido (muestra) a través de todo el sistema; la bomba succiona la muestra una vez que se le ha removido la húmeda en la caja fría e impulsa el fluido hacia el sistema de medición de gas seco.





**Figura 39. Medidor de gas seco de desplazamiento positivo.**

#### 4.2.5.5 Medidores de temperatura.

Las consolas para muestreo de chimeneas usan por lo general termopares tipo K (Cromel-Alumel). Los rangos de operación de estos termopares varían de acuerdo con su localización dentro del sistema, las temperaturas pueden oscilar desde lo 0°C en la caja fría hasta 600°C en la chimenea. El método exige diferentes tolerancias para los instrumentos de temperatura, desde  $\pm 1^\circ\text{C}$  en el paso de la salida de la caja fría hasta  $\pm 3^\circ\text{C}$  para el caso de los demás sensores.

Existe una gran variedad de sensores de temperatura disponibles para su uso en el tren de muestreo. En éstos se utilizan dos escalas de temperatura:

Fahrenheit ( $^\circ\text{F}$ ) y Centígrados ( $^\circ\text{C}$ ), las cuales se relacionan por:

$$^\circ\text{F} = 1.8^\circ\text{C} + 32$$

Se requiere utilizar escalas de temperatura absoluta en todos los cálculos:

$$\text{Grados Rankine} = ^\circ\text{R} = ^\circ\text{F} + 460$$

$$\text{Grados Kelvin} = ^\circ\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.15$$

El uso de temperaturas absolutas disminuye los errores relativos asociados con la medición de la temperatura, como se verá más adelante.

Los medidores de temperatura se pueden clasificar en dos grupos, que se muestran en la tabla 17.

**Tabla 17.** Clasificación de los medidores de temperatura.

TERMÓMETROS	PIRÓMETROS ÓPTICOS
Están en contacto directo con el objeto al cual le miden la temperatura	No están en contacto directo con el objeto al cual le miden la temperatura
Dependen de algún cambio físico o químico para indicar la temperatura. Por ejemplo, expansión térmica, resistividad eléctrica o cambio de color.	Miden la radiación emitida por un cuerpo caliente.

Los pirómetros no se utilizan generalmente en los muestreos, si no es por las ocasiones en las que se muestrea a elevadas temperaturas este tipo de pirómetros alcanzan una temperatura de 2400°F, pero existen otros más complejos que pueden alcanzar los 10.000 °F (5.538 °C) o más, como es el caso de fundidoras o en la industria del vidrio, por lo que solamente se mencionarán los diferentes tipos de termómetros.

#### Termómetros Bimetálicos.

La banda bimetálica consiste de dos metales con diferente coeficiente de expansión térmica que se encuentran enlazados. Cuando esta banda se somete a temperaturas mayores a la de enlace se doblan en una dirección; cuando se someten a temperaturas menores a la de enlace, se doblan en la dirección opuesta.

#### Termopares.

Un termopar es un dispositivo para la medición de temperatura, basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, unidos en sus extremos y entre cuyas uniones existe una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz efecto Seebeck.

La fuerza electromotriz generada por el termopar esta en función de la diferencia de temperatura entre la unión fría y caliente, pero más específicamente, ésta es generada como un resultado de los gradientes de temperatura los cuales existen a lo largo de la longitud de los conductores.

#### 4.2.5.6 Medidores de presión.

Manómetros. Dos manómetros diferenciales o inclinados con un ámbito de operación de 0.00 a 7.6  $cmH_2O$  y con la sensibilidad de  $\pm 0.0254 \cdot cmH_2O$ . Uno se utilizara para las lecturas de presión velocidad ( $\Delta p$ ) y otro, para las lecturas de presión diferencial del orificio ( $\Delta H$ ).

#### 4.2.5.7 Medidores de velocidad.

El equipo utilizado para la medición de la velocidad del gas es el tubo pitot estándar. Para las condiciones dentro de la chimenea en las que se encuentren altas cargas de polvo cuya rapidez pueda afectar al tubo pitot estándar y en los casos en los que la maniobrabilidad para realizar el muestreo se ve afectada por el tamaño del puerto o el diámetro de la chimenea se utiliza normalmente el tubo pito tipo "S". El principio fundamental de operación es el mismo para ambos.

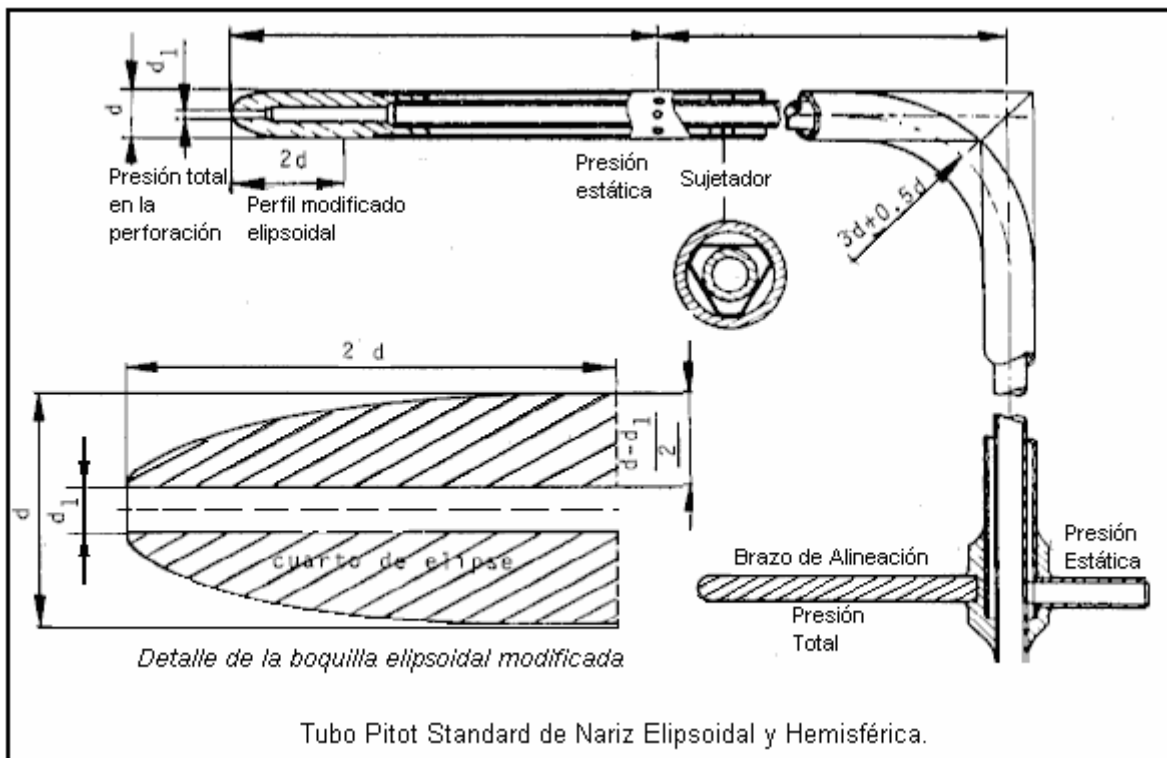
El tubo Pitot es un instrumento usado para medir la velocidad de la corriente de productos de combustión en la chimenea ducto. Su funcionamiento se basa en la diferencia entre las lecturas de la presión estática y dinámica del fluido. El pitot se utiliza en conjunto con un manómetro diferencial.

Se debe considerar el flujo de un gas en un conducto horizontal con un área de flujo transversal y asumir que la velocidad y la densidad del gas son aproximadamente iguales.

Cuando algún objeto sólido es colocado en una corriente de gas en movimiento, las trayectorias de las masas que fluyen se distorsionan de su forma original.

Tubo Pitot Estándar.

La figura 40, ilustra el aspecto y las proporciones de los tubos pitot de nariz elipsoidal y hemisférica. Se debe notar que cerca de la mitad de la longitud del tubo pitot, se encuentran perforaciones en forma radial alrededor de la circunferencia de la cabeza que sirven para determinar la presión estática. Los tubos de pitot son construidos con dos tubos concéntricos. El tubo interior está conectado a la terminación abierta (donde se mide la presión total o presión de estancamiento) y el otro al agujero donde se mide la presión estática. Los tubos conectados se incorporan al vástago y pasan a las tomas de presión fuera del ducto y a partir de allí, un manómetro o transductor de presión mide la presión velocidad dinámica desarrollada por el flujo, como se ilustra en la figura 41.



**Figura 40. Tubo Pitot Standard de Nariz Elipsoidal y Hemisférica.**

Tubo Pitot Tipo "S".

El tubo Pitot Tipo "S" (Stausscheibe) se usa en la mayoría de los trenes de muestreo por dos razones fundamentales. Además, el tubo pitot tipo "S" produce una caída de presión mayor en comparación a la que produce el tubo pitot estándar a la misma velocidad, como se ve en la figura 41. Esta caída de presión mayor se debe al efecto de succión en la corriente descendente del tubo lo que origina que la presión sea más baja que la presión estática de la chimenea.

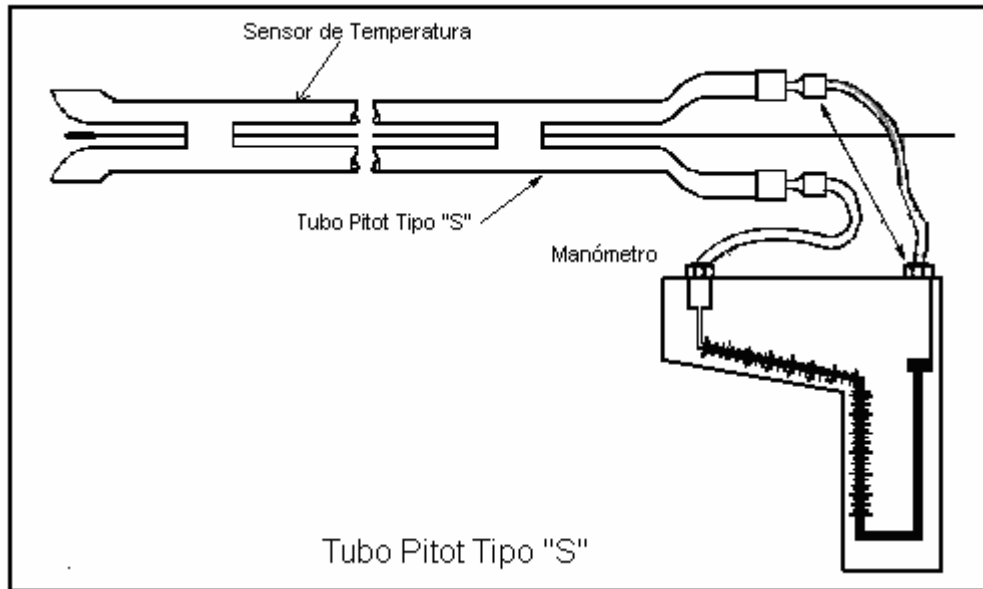


Figura 41. Tubo Pitot Tipo "S".

Manómetro.

Tubo Pitot Tipo S. Está construido de dos tubos conectados a un manómetro diferencial que permite medir la velocidad de un fluido respecto a un cuerpo inmóvil. El tubo pitot se conectara a la sonda (como lo muestra la figura 42) para verificar que la velocidad del gas sea constante en la chimenea.

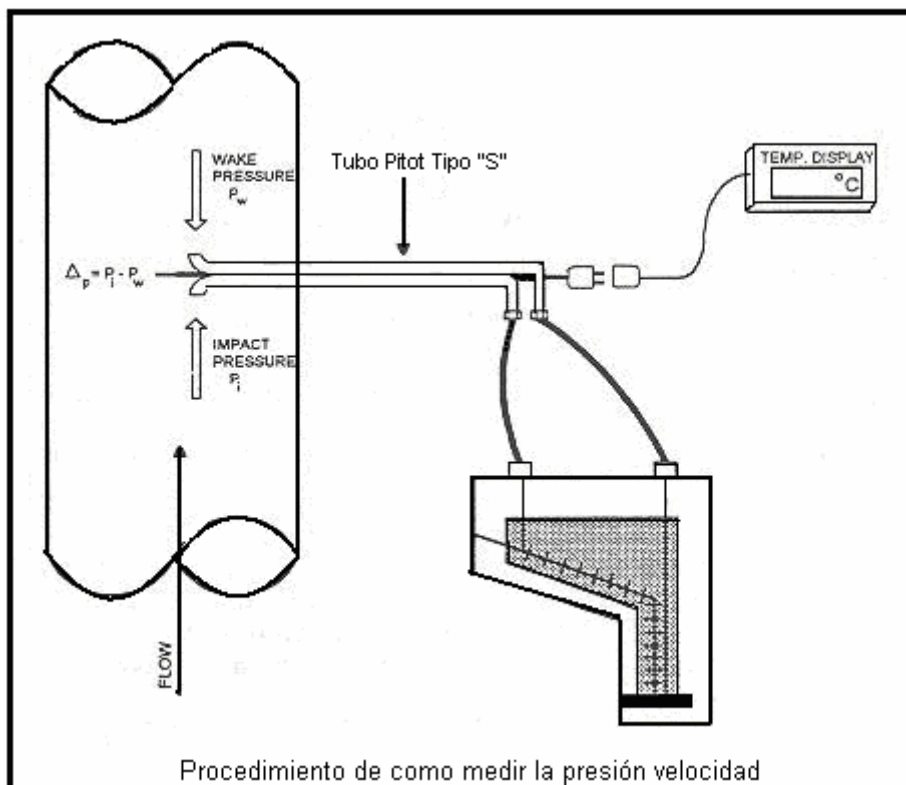
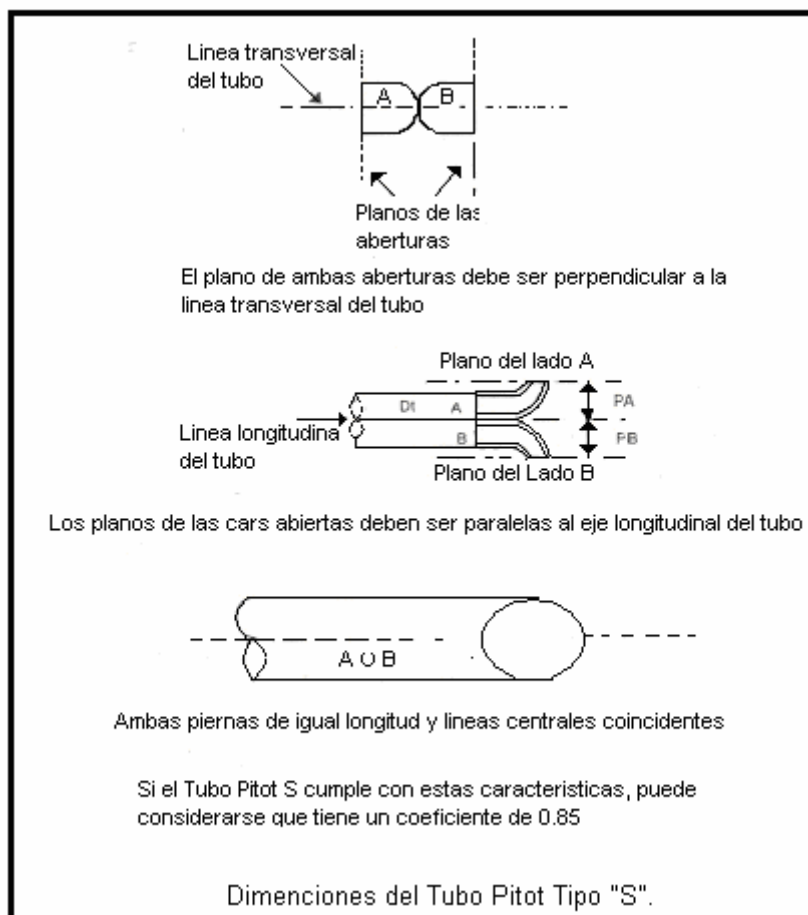


Figura 42. Sistema de Medición de la Presión Velocidad con el Tubo Pitot Tipo "S".

La figura 43. Indica las dimensiones recomendables para el tubo pitot tipo "S". El diámetro del tubo externo debe medir entre 0.48 y 0.98 cm. (3/16 y 3/8 de pulgada). Debe existir una distancia igual desde la base de cada pierna a su cara abierta (dimensiones PA y PB), siendo también recomendables que esta distancia sea de 1.05 y 1.50 veces el diámetro del

tubo externo. La cara abierta del tubo debe estar alineada preferentemente como se muestre en la misma figura, sin embargo se puede permitir algunos desalineamientos.

El tubo pitot debe tener un coeficiente conocido o calculado anteriormente en función de su calibración, como se verá más adelante.



**Figura 43. Dimensiones del Tubo Pitot Tipo "S".**

Anemómetro.

Para velocidades de chimenea menores a 10 ft/seg se puede utilizar un anemómetro. Normalmente, éste es de tipo de veleta con un rango de aplicación de 2-40 ft/seg. Considerando los efectos de la fricción, el anemómetro es más exacto con velocidades del orden de 2 ft/seg y su funcionamiento se hace no afectivo para velocidades mayores de 40 ft/seg. Los anemómetros tienden a funcionar pobremente bajo condiciones en las que se tienen altas concentraciones de polvo debido al incremento de la fricción en los cojinetes.

#### **4.2.6 Material y Sustancias de Laboratorio para la Recolección de la Muestra.**

*Cepillos.*

Se pueden utilizar cepillos de cerdas de nylon con un soporte de alambre de acero inoxidable para recolectar la muestra de la sonda y de la boquilla. El cepillo para la sonda debe ser de una extensión tan larga como el largo de la sonda y puede ser de acero inoxidable, nylon, teflón o materiales inertes similares. Los cepillos deben tener un tamaño apropiado que permita desplazar la muestra fuera de la sonda y de la boquilla.

Frascos de vidrio para almacenar las muestras.

Se requieren frascos químicamente resistentes, de vidrio de borosilicato para almacenar muestra removida con acetona. Estos frascos deben ser de 500 o 1000 ml y capaces de resistir los ataques de la acetona. Alternativamente, se pueden utilizar botellas de polietileno.

Cajas de Petrí.

Se requieren cajas de Petrí para mantener en condiciones óptimas los filtros que se utilicen para recolectar la muestra de partículas. Estas cajas pueden ser de vidrio o polietileno.

Balanza.

Para obtener el peso final de los contenedores en el proceso de obtención, el contenido de humedad de una muestra de al menos 1 g. La mayoría de las balanzas de laboratorio son capaces de pesar 0.5 g o menos.

Probetas.

Probetas graduadas previamente pesadas. La cantidad de agua condensada tendrá que ser  $1 \cdot ml \cdot o \cdot 0.5 gr$ . La probeta graduada deberá tener subdivisiones no mayores de  $2 \cdot ml$ .

Higrómetro.

Para medir la humedad relativa del laboratorio.

Sensor de temperatura.

Para medir las condiciones de temperatura del laboratorio.

Filtros.

Se requieren filtros de fibra de vidrio con un porcentaje de eficiencia de al menos 99.95 % (0.05 % de penetración) para partículas de neblinas de dioctilftalato de 0.3 micras.

Silica gel.

La indicación de la apertura de la malla debe ser de 6 a 16, si antes de ser utilizado se pone a secar a  $175^{\circ}C \cdot (350^{\circ}F)$  durante un mínimo de 2 h. Se puede utilizar silica gel nueva o usada, o bien otros tipos de desecantes (equivalentes o mejores) sujeto a aprobación.

Agua.

Para los análisis del material recolectado en los contenedores o para los lavados sonda de cualquier tipo se requiere, agua destilada o desionizada que cumpla con una especificación de 0.001% en peso.

Hielo.

La cantidad de hielo que se requiere es de 5-25 Kg durante la corrida de la prueba, dependiendo de la temperatura del medio ambiente, el hielo debe estar triturado.

Grasa de silicón.

La grasa de silicón en ocasiones se utiliza para lubricar las conexiones del tren de contenedores y la unión del portafiltro con la sonda.

Acetona.

Se requiere acetona de grado reactivo, con un  $\leq 0.001$  % de residuos.

Desecante.

El desecante que se utiliza generalmente es el sulfato de calcio anhidro.

**CAPITULO V**

## METODOLOGIA DE LA TECNICA Y ANÁLISIS DE MUESTREO.

El propósito de un muestreo en fuente es determinar la concentración de contaminantes en una corriente de gas ó las emisiones de los contaminantes de una chimenea.

### 5.1 Muestra Representativa.

Es una porción de un universo que cumple con todas y cada una de las características y condiciones del mismo.

El propósito de todo programa de muestreo es obtener una muestra representativa del proceso que se desea caracterizar. En la práctica, se considera que cada proceso tiene sus propias condiciones específicas, como son:

- a) Máxima producción.
- b) Condiciones que producen emisiones máximas.
- c) Producción y condiciones operativas más frecuentes.
- d) Condiciones que producen emisiones mínimas a máxima capacidad.
- e) Condiciones típicas de operación y mantenimiento.

Además de lo anterior, para lograr la representatividad de una muestra se deben evitar al máximo problemas prácticos y teóricos considerando:

- a) La elección de una metodología adecuada de muestreo.
- b) Técnica y operación adecuada de los equipos de muestreo.
- c) Equipo indicado.
- d) Personal capacitado.
- e) Secuencia de cálculo.

Para coleccionar una muestra representativa deben hacerse al menos dos pruebas en una chimenea o en un ducto para cada contaminante de interés, bajo condiciones normales de operación. Las variaciones en la operación del proceso durante la prueba pueden añadir un alto grado de variabilidad en los datos de muestreo. Por lo tanto, los parámetros principales de la operación de un proceso que pueden afectar las emisiones de la fuente también deben ser monitoreados durante la toma de muestras.

El método consiste fundamentalmente en succionar una muestra representativa de los gases de salida de la fuente midiendo con exactitud la velocidad y el flujo del gas, así como las condiciones de operación del gas en este punto, tal como presión y temperatura, para poder tener el perfil termodinámico correcto del gas en la fuente de generación.

Estas condiciones son determinadas mediante una evaluación preliminar para llevar a cabo los ajustes correspondientes en el equipo de monitoreo antes de proceder a succionar la muestra definitiva.

El propósito de realizar un análisis preliminar, es obtener información básica que debe utilizarse en el muestreo definitivo por lo que se debe de determinar:

El porcentaje de humedad, temperatura, presión estática, análisis de gases, peso molecular, velocidad promedio del flujo, tamaño de boquilla y el factor (K) promedio, la correlación de la presión de velocidad y la presión de succión en el tren de muestreo.

El tiempo de muestreo debe ser como mínimo 60 min a una relación de flujo 0,75 ft<sup>3</sup>/min.



Durante el ensamble del tren de muestreo, mantenga todas las entradas cubiertas con una película de teflón o papel aluminio hasta justo antes que el muestreo comience esto es para evitar que se ensucie ó contamine.

Seleccionar y marcar en el tubo pitot el número de puntos a medir, como se representa en la figura 20.

Introducir el tubo de Pitot al primer punto de medición cuidando de que no haya obstrucciones parciales o totales en el mismo.

Asegurarse que la boquilla de presión dinámica del tubo pitot se mantenga en sentido contrario al flujo, dando tiempo a que se estabilice la lectura, como se puede apreciar en el (c) de la figura 25.

Tapar los claros que quedaron en el puerto de muestreo asegurándose que no haya infiltraciones de aire o fugas de gases.

Los contenedores que se utilizan para recoger la humedad de los gases van de la siguiente manera: Los dos primeros se colocan 100 ml de agua en cada uno, El tercero se deja vacío, y el cuarto contenedor se le transfieren aproximadamente de 200 a 300 g de silica gel.

Colocar el filtro en el portafiltro ó ciclón previamente pesado. Verificar que el filtro y el empaque estén correctamente colocados. Checar que el filtro no este desgarrado después de colocarlo.

Previo a la ejecución de mediciones, se deberá efectuar una prueba de infiltración en el equipo de muestreo, una vez armado en el sitio.

## **5.2 Verificación preliminar de las infiltraciones (fugas).**

Se debe hacer la prueba de infiltraciones al inicio del muestreo de la siguiente forma:

Como primer paso para realizar la prueba se debe calentar la resistencia que se encuentra en la parte interior del ducto como se puede apreciar en la figura 45 antes de encender el ventilador esto es para obtener la temperatura deseada del flujo de aire después de encender el ventilador.

Dejar que se estabilice la temperatura después de encender el ventilador.

Una vez que el tren ha sido ensamblado, encender el equipo y colocar el portafiltro de la sonda a las temperaturas de operaciones requeridas para el universo.

Permitir que la temperatura se estabilice, utilizar empaques u otra conexión similar en el ensamble de la boquilla y en la línea de la sonda las infiltraciones del tren en el sitio de muestreo y con la boquilla tapada la bomba debe levantar un vacío de 50,6625 Pa (380 mmHg o 15 inHg).

**NOTA 1.**-A un vacío más bajo ( $\pm 10\%$ ) puede ser usado, verificando que durante la prueba no se exceda.

Prueba de Infiltración. Se recomienda checar las infiltraciones del tren de muestreo, pero no es necesario. Si desea realizar la prueba de las infiltraciones, el procedimiento es el siguiente.

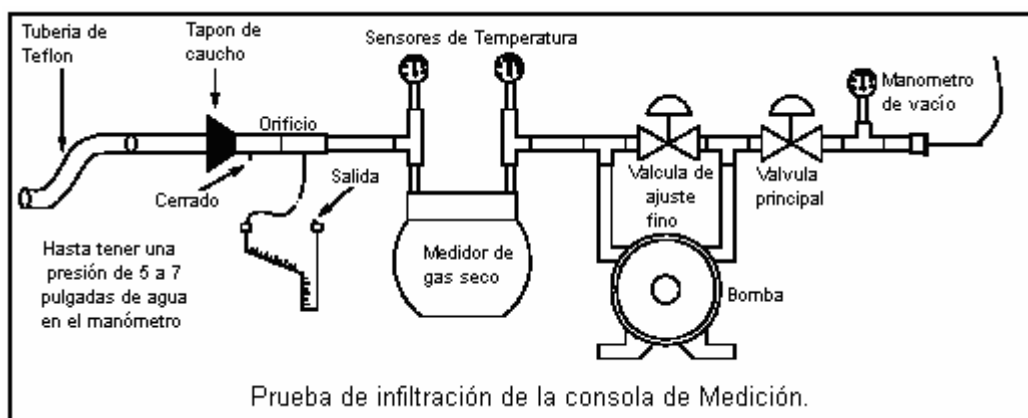


Figura 44. Esquema de cómo se debe realizar una prueba de infiltración.

### 5.3 Procedimientos para realizar la prueba de infiltración.

El Procedimiento de Infiltración del sistema de medición se muestra en la figura 44.

La parte del tren de muestreo que se debe verificar las infiltraciones es la parte que va desde bomba hasta el medidor de orificio.

Los procedimientos de las pruebas de infiltraciones son los siguientes:

- a) Arrancar la bomba y tapar la boquilla, con la válvula de ajuste fino totalmente abierta y la válvula de ajuste grueso, completamente cerrada. Ir abriendo la válvula de ajuste grueso y lentamente cerrar la válvula de ajuste fino hasta llegar al vacío deseado. Debe de tomar el tiempo cuando la aguja se encuentre totalmente parada y esperar como mínimo 1 min. para cerciorarse de que la aguja no se mueva, en caso que esto suceda anote la lectura de infiltración. No es aconsejable invertir la dirección de la válvula de ajuste fino y la de grueso; esto causará que el agua contenida en los contenedores entre al filtro. Si el vacío alcanzado se encuentra excedido realizar la prueba de infiltraciones con este alto vacío al inicio o al final del muestreo o en ambas partes cerciorándose que este vacío no cambie.
- b) Cuando la prueba de infiltraciones esté completa, primero lentamente remueva el tapón de la entrada de la sonda sin apagar la bomba y regulando la entrada del aire. Esto evita que el agua de los contenedores ejerza una fuerza de succión y entre al filtro y la silica gel pase al tercer impactor.
- c) Si existen infiltraciones, el gasto de infiltración no debe exceder a  $0,00057 \text{ m}^3/\text{min}$  ( $0,02 \text{ ft}^3/\text{min}$ ) o al 4 % del promedio del flujo total de muestreo (cualquier valor obtenido menor a éste debe ser anotado) si se presentan resultados mayores a este valor, la prueba debe ser invalidada, por lo que debe localizar y corregir las infiltraciones y realizar otra prueba. En caso de no pasar la prueba una segunda vez el muestreo se invalida y debe de corregir éstas en el laboratorio.

### 5.4 Prueba de las Infiltraciones durante la corrida de muestreo.

Si durante la corrida de muestreo se realiza un cambio de algunos de los componentes del tren de muestreo (por ejemplo: filtro o algunos de los contenedores) debe realizar una prueba de infiltraciones como se indico en los puntos anteriores. Teniendo precaución de corregir el volumen total de muestreo al restarle el volumen ocupado para realizar la prueba de infiltraciones.

## 5.5 Prueba de las Infiltraciones al término del muestreo.

Se debe realizar la prueba de infiltraciones al término de la prueba de muestreo para verificar la hermeticidad del sistema, la cual se efectúa a la presión de vacío máxima alcanzada durante el muestreo.

## 5.6 Muestreo Definitivo.

Después de realizar la prueba de infiltración se procede a realizar el muestreo definitivo para obtener los resultados de los parámetros definitivos ya mencionados, considerando las siguientes variaciones:

1.-El tiempo de muestreo definitivo.

(El tiempo total y volumen muestreado es el resultado de multiplicar el tiempo de muestreo en cada punto por el número de puntos seleccionados).

La duración del muestreo para cualquier punto no debe ser menor de 2.5 min. en condiciones estables de operación. Si las condiciones de muestreo lo permiten, usar un tiempo de muestreo mayor.

1.-El volumen a condiciones normales mínimo a muestrear debe ser de  $(0.8466\text{m}^3)$  ( $30\text{ ft}^3$ ) corregido a condiciones normales en base seca.

2.-Determinación de la humedad real en la fuente a determinar.

3.-Determinar una nueva "K" para cada punto.

4.-Cuantificación del peso total de las partículas sólidas.

5.-Determinación del isocinétismo (La condición de isocinétismo aceptada deberá estar comprendida entre 90% y 110%).

Al final de cada corrida, se cierra la válvula de ajuste, se retira la sonda y la boquilla de muestreo de la chimenea, se apaga la bomba y detiene el cronometro, registrar los datos finales, y conduzca un chequeo de infiltración al muestreo posterior.

Se recomienda al terminar el muestreo realizar una limpieza de los gases remanentes en el ducto (purgar la línea del tren de muestreo mínimo 5 min. con aire atmosférico).

## 5.7 Recolección de la Muestra.

Sacar cuidadosamente la sonda, asegurándose de que la boquilla no recoja polvo de la parte interior del ducto.

Mantener la sonda con la boquilla hacia arriba para evitar pérdidas de muestra.

Determinar el peso del agua colectada en el sistema de condensación y registrarlas.

La masa de las partículas se determinará gravimétricamente, esto es, mediante la diferencia de peso en el filtro a la finalización de la medición con respecto al peso previo al inicio de la misma.

Además, se determinará el peso de aquellas partículas captadas en la sonda de muestreo. Para esto, se realizará un enjuague del interior de la sonda, de la boquilla de succión de la sonda, y de accesorios de esta, utilizando para el efecto acetona. El líquido colectado será almacenado en un frasco de vidrio, y llevado a laboratorio, en donde será transferido a un vaso de precipitación, será registrado su peso inicial, y se dejará evaporar el solvente a temperatura y presión ambiente. El vaso será secado por un periodo de 24 horas y registrado su peso final.

La masa total de las partículas colectadas será la suma de las partículas obtenidas en el filtro más aquellas captadas al interior de la sonda de muestreo.

La concentración de las partículas emitidas, a expresarse en miligramos por metro cúbico de aire seco, será la masa total de partículas dividida para el volumen total de gas seco muestreado, y corregido a las condiciones de referencia.

Realizar un muestreo preliminar y dos definitivos.

**CAPITULO VI**

## DESARROLLO EXPERIMENTAL.

### 6.1 DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DE LA CHIMENEA.

El objetivo de montar una chimenea es simular las condiciones propias de una industria en un laboratorio piloto, para tener un conocimiento más amplio de cómo medir las emisiones de partículas contaminantes en una industria.

Los parámetros que se controlaron en la chimenea piloto fueron los siguientes: Velocidad del flujo de muestreo y la temperatura conocida respectivamente, parámetros que asemejan y se observan en una industria.

El equipo está diseñado y armado de acuerdo a las Normas Técnicas Mexicanas (NMX-AA-009-SCFI-1993 y NMX-AA-010-SCFI-2001), y el Método 5 de la EPA de los Estados Unidos para obtener las condiciones propias de una chimenea industrial.

Los materiales con los que se articuló la chimenea, y el equipo utilizado en la medición, se indican a continuación:

- 1) Un motor trifásico de 1 Hp de potencia marca Siemens.
- 2) Ventilador centrífugo ligero, marca Armee, tipo aspa múltiple, tamaño 27-ESD, clase 1800, entrada sencilla.
- 3) Un reductor de 315mm x 8 pulgadas de diámetro de acero inoxidable para acoplar el ventilador con el codo de 90 grados y este a su vez para acoplar el tramo de ducto de PVC.
- 4) Un codo de 90 grados, con un diámetro de 315 mm de acero inoxidable.
- 5) Un tramo recto de 6 metros de PVC, de 315 milímetros de diámetro. Para conducir el flujo de aire.
- 6) Un soporte de metálico, para sostener el peso del codo y el tramo de ducto de PVC.
- 7) Un variador de velocidad marca Yaskawa ZYA720120, CIMR-J7AM20P7 para un motor de 1Hp de potencia, y 220 VCA, (este equipo nos va regular la frecuencia del motor).
- 8) Una resistencia de 2500 Watts. La resistencia sirve para calentar el flujo de aire previo que al muestreo para considerar la temperatura como un variable más.
- 9) Un pirómetro TE-96. Este equipo nos determinará la temperatura de la resistencia.
- 10) Un termopar tipo "J". Es un sensor que va unido a la resistencia y este a su vez le manda una señal al pirómetro indicando a qué temperatura se encuentra la resistencia.
- 11) Un relevador. Es un dispositivo que controla el estado de un interruptor mediante una entrada eléctrica.
- 12) Una placa de neopreno.

- 13) Tres adaptadores con tapa roscada hidráulico de 3 pulgadas de diámetro. Los adaptadores nos van a servir como puertos de muestreo empotrados en el ducto de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana.
- 14) Un equipo manual de muestreo para chimeneas marca napp inc. Modelo 31.
- 15) Una sonda que contenga el tubo pito tipo "S".
- 16) Un termopar tipo K digital, (para medir la temperatura del flujo de aire del ducto).
- 17) Boquillas de diferentes diámetros.
- 18) Un sombrero de 13 pulgadas de diámetro de lamina galvanizada, para cubrir la parte superior del ducto de las condiciones ambientales.

## 6.2.- MONTAJE DEL SISTEMA (CHIMENEA).

A continuación se describen los pasos que se realizaron para montar el sistema piloto de muestreo.

Como primer paso se realizaron las conexiones eléctricas para la toma de corriente de 220 volts ya que en esta parte de la sección no se contaba con líneas trifásicas por lo tanto se tuvieron que requerir ya que el motor del ventilador es trifásico.

a).- Se monto el sistema como se ilustra en la figura 45.

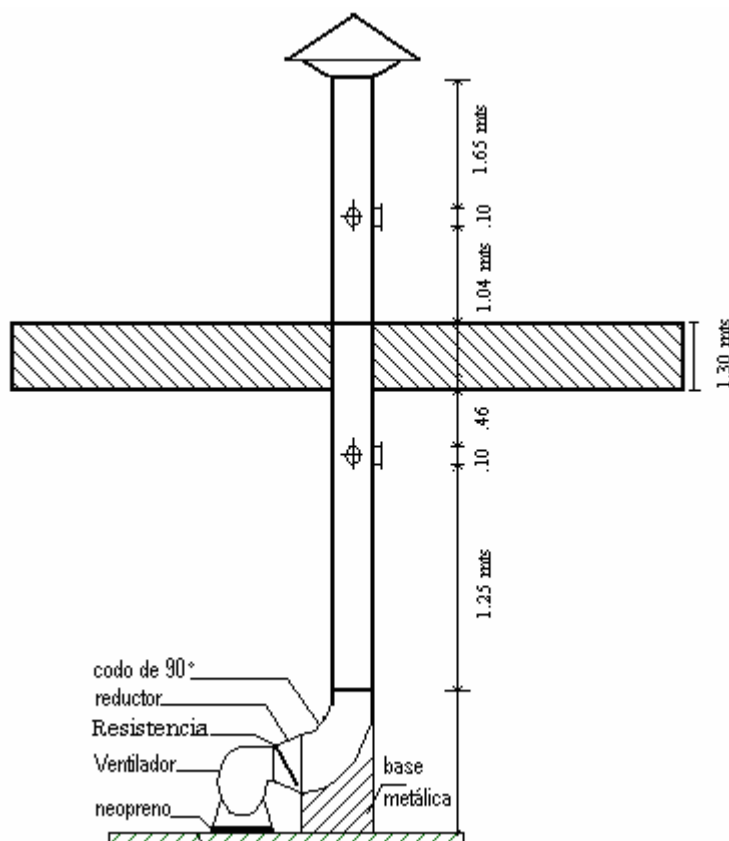


Figura 45. Representación esquemática del simulador de partículas.

- a).- Se mandaron hacer al taller de herrería dos bases metálicas para sujetar el peso del tramo de ducto.
- b).- Se le hicieron 4 perforaciones de acuerdo a las medidas y distancias correspondientes calculadas por la Norma (Puertos de Muestreo).
- c).- Se corto un pedazo de neopreno a la medida de la base del motor del ventilador, (para absorber las vibraciones del ventilador).
- d).- Se acoplo el ventilador con el reductor de 315mm x 8 pulgadas de diámetro de acero inoxidable, se le hacen tres (3) orificios en la parte superior del reductor ya que dos de esto orificios nos servia para atornillar la resistencia y el tercero para introducir el termopar ya que debe ir unido ala resistencia (2500 watt) para que nos proporcione o indique la temperatura de esta.

Como siguiente paso se une el reductor con el codo de 90° grados y este a su vez al tramo recto del ducto de PVC como se observa en la figura.

- e).- Atornillar resistencia de 2500 watts en la parte superior del reductor, esta a su vez se une el termopar con la resistencia para que nos proporcione la temperatura de la resistencia real, este dispositivo nos servirá para calentar el flujo de aire.
- f).- Unir el codo de 90° al reductor y al tramo del ducto, posteriormente apoyarlos a la base metálica como se muestra en la figura esto es para soportar el peso del ducto.
- g).- El ducto de PVC no solamente esta sujeto por la base metálica descrita anteriormente sino también el domo y por tensores en la parte superior del ducto para evitar cualquier movimiento.
- h).- Se coloca un sombrero de lámina galvanizada, para cubrir la parte superior del ducto de las condiciones ambientales como la lluvia.
- i).- Después de montar el sistema se procedió a ensamblar los puertos a la distancia correspondiente a la calculada para tomar la muestra representativa.
- j).- Se hacen las conexiones eléctricas pertinentes del variador de velocidad con el motor, esto nos sirve para regular la frecuencia de esté y así tener varias lecturas de flujo.
- i).- Se hacen las conexiones eléctricas del dispositivo de temperatura que consta de un pirómetro, un relevador y como un termopar, que estos a su vez van conectados a la resistencia que se encuentra montado en el reductor de acero inoxidable.



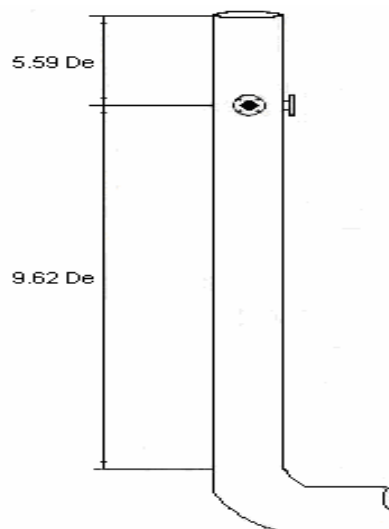
**CAPITULO VII**

## RESULTADOS

Datos de campo para el cálculo preliminar de la velocidad media.

### Muestreo Preliminar:

Planta: Centro de Ciencias de la Atmósfera  
 Fecha: 22-Nov-06 Corrida Num.: 1  
 Diámetro de la Chimenea: 295 mm  
 Presión Barométrica: 23.03 (inHg)  
 Área de la Sección Transversal: 0.068 m<sup>2</sup>  
 Operador: Pedro Hernández Nieto  
 Tubo Pitot Número: Tipo "S"  
 Coeficiente del Tubo Pitot:  $C_p =$  0.84



Sección Transversal

Punto Transversal Número.	Presión Velocidad $\Delta p$ (inH <sub>2</sub> O)	Temperatura de la Chimenea		Presión Estática $P_g$ (inH <sub>2</sub> O)	Presión Estática $P_g$ (inHg)	$\sqrt{\Delta p}$
		$T_s$ , (°F)	$T_s$ , (°F)			
1	0.13	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.3606
2	0.15	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.3873
3	0.16	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4000
4	0.18	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4243
5	0.19	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4359
6	0.18	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4243
7	0.15	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.3873
8	0.17	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4123
9	0.18	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4243
10	0.18	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4243
11	0.17	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4123
12	0.15	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.3873
<b>Promedio</b>	<b>.1658</b>	<b>71.6</b>	<b>71.6</b>	<b>-0.03</b>	<b>584.99</b>	<b>0.4067</b>

**MUESTREO  
ISOCINÉTICO DEFINITIVO**

**Datos de campo.**

NOMBRE DE LA PLANTA: Centro de Ciencias de la Atmósfera FECHA: 22-Nov-06

FUENTE: Laboratorio Piloto de la Sección Contaminación

PESO DEL MATERIAL RETENIDO EN EL FILTRO:

P. Inicial 0.8610 P. Final 0.8617 Peso de Partículas Retenidas.: 0.00017 gr.  
Ø CHIM: 29.5 cm. DIST. A= 5.59Ø DIST. B= 9.62 Ø

NOMBRE DEL OPERADOR RESP: Pedro Hernández Nieto

No. Puntos Preliminares: 6  
No. Puntos Definitivos: 12

**Corrida No1.**

No. Puntos	Tiempo (min)	Vol. Muestra	ΔP (inH <sub>2</sub> O)	√ΔP (inH <sub>2</sub> O)	Presión Dif. ΔH (inH <sub>2</sub> O)		Temp. del Gasómetro		Vacío (inHg)	Presión Estática (inH <sub>2</sub> O)	Temper. Chimenea. (°F)
					Teórico	Real	Entrada (°F)	Salida (°F)			
	0	828									
1	5	835	0.13	0.361	1.6	1.6	80	50	11	-0.03	84.2
2	10	841	0.14	0.374	1.6	1.6	110	47	11	-0.03	82.4
3	15	847	0.16	0.4	1.6	1.6	140	47	11	-0.03	82.4
4	20	853	0.17	0.412	1.6	1.6	165	49	11	-0.03	82.4
5	25	859	0.18	0.424	1.6	1.6	165	49	11	-0.03	82.4
6	30	865	0.2	0.447	1.6	1.6	152	49	11	-0.03	82.4
7	35	870	0.13	0.361	1.6	1.6	138	49	11	-0.03	84.2
8	40	875	0.15	0.387	1.6	1.6	155	45	11	-0.03	82.4
9	45	880	0.18	0.424	1.6	1.6	170	45	11	-0.03	82.4
10	50	886	0.19	0.436	1.6	1.6	170	45	11	-0.03	82.4
11	55	890	0.2	0.447	1.6	1.6	160	45	11	-0.03	82.4
12	60	895	0.21	0.458	1.6	1.6	161	45	11	-0.03	82.4
<b>SUMA PROMEDIO</b>				4.932	19.2	19.2	147.17	47.08	132	-0.36	992.4
		67		0.392	1.6	1.6	97.13		11	-0.030	82.70

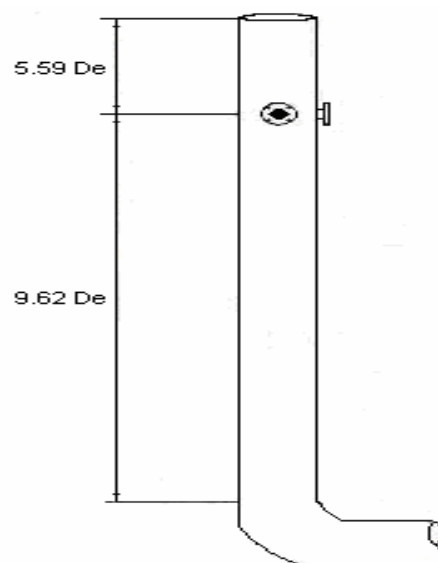
**DETERMINACION DE LA HUMEDAD EN LA MUESTRA**

IMPACTORES DE CAPTURA				PESO DE IMPACTORES		
Nº IMPACTOR	SOLUCION	PESO INICIAL	PESO FINAL	PESO GANADO		
1	AGUA	547.1	548.21	1.11		
2	AGUA	555.55	556.81	1.26		
3	VACÍO	479.5	481.1	1.6		
4	SILICA	659.2	661.26	2.06		
					Peso total =6.03 gr	

**Datos de campo para el cálculo preliminar de la velocidad media.**

**Muestreo Preliminar:**

Planta: Centro de Ciencias de la Atmósfera  
 Fecha: 24-Nov-06 Corrida Num.: 1  
 Diámetro de la Chimenea: 295 mm  
 Presión Barométrica: 23.03 (inHg)  
 Área de la Sección Transversal: 0.068 m<sup>2</sup>  
 Operador: Pedro Hernández Nieto  
 Tubo Pitot Número: Tipo "S"  
 Coeficiente del Tubo Pitot: Cp= 0.84



**Sección Transversal**

Punto Transversal Número.	Presión Velocidad $\Delta p$ (inH <sub>2</sub> O)	Temperatura de la Chimenea		Presión Estática Pg (inH <sub>2</sub> O)	Presión Estática Pg (inHg)	$\sqrt{\Delta p}$
		Ts, (°F)	Ts, (°F)			
1	0.13	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.3606
2	0.15	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.3873
3	0.16	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4000
4	0.18	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4243
5	0.19	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4359
6	0.18	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4243
7	0.15	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.3873
8	0.17	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4123
9	0.18	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4243
10	0.18	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4243
11	0.17	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.4123
12	0.15	71.6	71.6	-0.03	584.99	0.3873
<b>Promedio</b>	<b>.1658</b>	<b>71.6</b>	<b>71.6</b>	<b>-0.03</b>	<b>584.99</b>	<b>0.4067</b>

## MUESTREO ISOCINÉTICO DEFINITIVO

### Datos de Campo.

NOMBRE DE LA PLANTA: Centro de Ciencias de la Atmósfera      FECHA: 24-Nov-06

FUENTE: Laboratorio Piloto de la Sección Contaminación

PESO DEL MATERIAL RETENIDO EN EL FILTRO:

P. Inicial 0.8032    P. Final 0.8044      Peso de Partículas Retenidas.: 0.0012 gr.

Ø CHIM: 29.5 cm.    DIST. A= 5.59Ø      DIST. B= 9.62 Ø

NOMBRE DEL OPERADOR RESP: Pedro Hernández Nieto

No. Puntos Preliminares: 6

No. Puntos Definitivos: 12

### Corrida No.2.

No. Puntos	Tiempo (mins)	Vol. Muestra	ΔP (inH <sub>2</sub> O)	√ΔP inH <sub>2</sub> O	Presión Dif. ΔH (inH <sub>2</sub> O)		Temp. del Gasómetro		Vacío (inHg)	Presión estática (inH <sub>2</sub> O)	Temp. Chimenea. (°F)
					Teórico	Real	Entrada (°F)	Salida (°F)			
0		911									
1	5	916	0.08	0.283	1.6	1.6	140	40	10.3	-0.03	78.8
2	10	922	0.12	0.346	1.6	1.6	140	45	10.3	-0.03	75.2
3	15	928	0.14	0.374	1.6	1.6	149	49	10.3	-0.03	78.8
4	20	934	0.15	0.387	1.6	1.6	149	51	10.3	-0.03	77
5	25	940	0.16	0.4	1.6	1.6	150	50	10.3	-0.03	77
6	30	945	0.17	0.412	1.6	1.6	162	51	10.3	-0.03	75.2
7	35	950	0.08	0.283	1.6	1.6	165	49	10.3	-0.03	75.2
8	40	956	0.1	0.316	1.6	1.6	168	51	10.3	-0.03	73.4
9	45	961	0.11	0.332	1.6	1.6	170	52	10.3	-0.03	75.2
10	50	967	0.12	0.346	1.6	1.6	170	52	10.3	-0.03	75.2
11	55	973	0.13	0.361	1.6	1.6	170	52	10.3	-0.03	77
12	60	979	0.13	0.361	1.6	1.6	170	52	10.3	-0.03	78.8
<b>SUMA PROMEDIO</b>				4.201	19.2	19.2	158.583	49.5	123.6	-0.36	916.8
		68		0.392	1.6	1.6	104.042		10.3	-0.03	76.4
<b>DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD EN LA MUESTRA</b>											
<b>IMPACTORES DE CAPTURA</b>				<b>PESO DE IMPACTORES</b>							
Nº IMPACTOR	SOLUCIÓN			PESO INICIAL	PESO FINAL		PESO GANADO				
1	AGUA			555.4	556.1		0.7				
2	AGUA			564.07	564.98		0.91				
3	VACÍO			479.45	481.2		1.75				
4	SILICA			659.2	661.12		1.92				
										Peso promedio=	5.98 gr

## MEMORIAS DE CÁLCULO

Se presenta una memoria de cálculo que abarca todos los parámetros necesarios para evaluar las emisiones de una fuente mediante un muestreo isocinético.

### Muestreo Definitivo:

Datos Generales para el Cálculo del Muestreo Isocinético.

Coefficiente de calibración del Tubo Pitot  $C_p = 0.84$

Factor de Calibración del Medidor de Gas Seco  $Y = 0.9278$

Constante  $K_p = 85.49 \left[ \frac{(lb / lbmol) (inHg)}{(^{\circ}R) (inH_2O)} \right]^{1/2}$

Presión Barométrica del Sitio de Muestreo  $P_{bar} = 23.03 inHg$

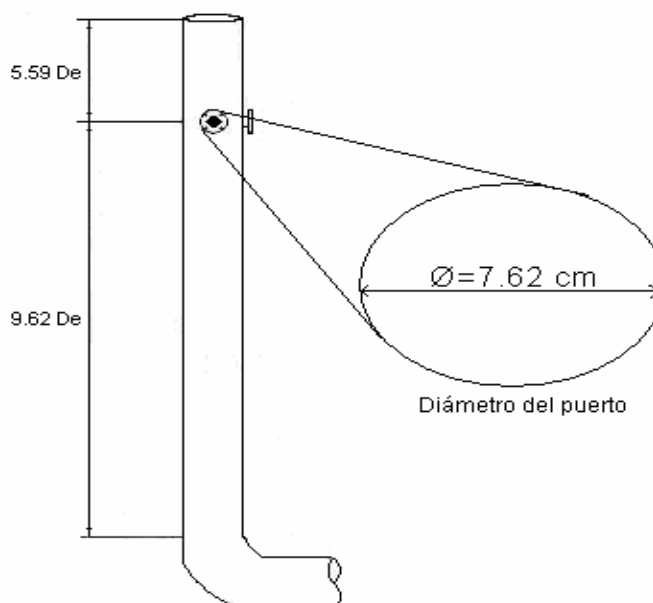
Tiempo de Total de la prueba por cada corrida  $\Theta = 60 min.$

### Diámetro del ducto:

Datos de Campo:		Unidades
Diámetro Nominal del Ducto	31.5	cm
Diámetro Interno del ducto	29.5	cm

Distancia A:	165	cm
Distancia B:	284	cm
Diámetro de la Chimenea:	29.5	cm

Número de diámetros:	5.59Ø	(A)
Numero de diámetros:	9.62Ø	(B)
Número de Puntos Transversales:	12	ptos



**Determinación del diámetro de la boquilla.**

Flujo Deseado	0.02122 m <sup>3</sup> /min	0.75 ft <sup>3</sup> /min
Diámetro Nominal	6.35 mm	¼ pulg
Diámetro Real	5.996 mm	0.2361 pulg
	5.925 mm	0.2333 pulg

**Tiempo Total por cada corrida:**

El tiempo de muestreo fue de 60 minutos por cada corrida.

Datos de campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
Peso Inicial del Filtro:	0.8610	0.8032	gramos
Peso Final del Filtro:	0.8617	0.8044	gramos
Diferencia de Peso de Filtros	0.0007	0.0012	gramos

**Peso final obtenido por burbujeadores**

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
Peso Ganado por Burbujeadores	6.03	5.98	gramos

**a) Cálculo del Volumen de Gas Muestreado (Vm).**

$$V_m = V_f - V_i$$

Donde:

V<sub>m</sub>= Volumen de gas muestreado por el medidor de gas seco, [ft<sup>3</sup>],

V<sub>f</sub>= Volumen final del gas muestreado por el medidor de gas seco, [ft<sup>3</sup>],

V<sub>i</sub>= Volumen inicial del gas muestreado por el medidor de gas seco, [ft<sup>3</sup>].

Datos de Campo	Corridas		Unidades
	I	II	
V <sub>f</sub>	895	979	ft <sup>3</sup>
V <sub>i</sub>	828	911	ft <sup>3</sup>
<b>V<sub>m</sub></b>	<b>67</b>	<b>68</b>	<b>ft<sup>3</sup></b>

**Cálculo del Volumen de Gas Muestreado a Condiciones Normales V<sub>m(std)</sub>.**

$$V_{m(std)} = K_1 Y \frac{V_m \left( P_{bar} + \frac{\Delta H}{13.6} \right)}{T_m}$$

Donde:

- $V_{m(std)}$  = Volumen de gas muestreado, base seca y a condiciones normales, [ft<sup>3</sup>]
- $V_m$  = Volumen de gas muestreado por el medidor de gas seco, [ft<sup>3</sup>],
- $\Theta$  = Tiempo total de muestreo, [min],
- $Y$  = Factor de calibración del medidor de gas seco,
- $K_1$  = Constante,
- $V_m$  = Volumen de gas muestreado por el medidor de gas seco, [ft<sup>3</sup>],
- $P_{bar}$  = Presión barométrica en el lugar de la prueba, [inHg],
- $\Delta H$  = Presión diferencial promedio en el medidor de orificio, [inH<sub>2</sub>O]
- 13.6 = Densidad del mercurio, [g/cm<sup>3</sup>],
- $T_m$  = Temperatura absoluta promedio en el medidor de gas seco, [°R].

Datos de Campo	Corridas		Unidades
	I	II	
$V_m$	67	68	ft <sup>3</sup>
$\Theta$	60	60	min
$Y$	0.9872	0.9872	
$T_m$	556.84	563.71	°R
$P_{bar}$	23.03	23.03	inHg
$\Delta H$	1.6	1.6	inH <sub>2</sub> O
$K_1$	17.64	17.64	°R/inHg
<b><math>V_{m(std)}</math></b>	<b>48.501</b>	<b>48.625</b>	<b>ft<sup>3</sup></b>

**Volumen de la Muestra Corregido a Condiciones Estándar,  $V_{w (std)}$**

$$V_{w (std)} = K_2 (W_f - W_i)$$

Donde:

- $K_2$  = Constante
- $W_f$  = Peso final de agua colectada por los burbujeadores, [g]
- $W_i$  = Peso inicial de agua colectada por los burbujeadores, [g]

Datos de Campo	Corridas		Unidades
	I	II	
$K_2$	0.04715	0.04715	ft <sup>3</sup> /g
$W_f - W_i$	6.03	5.98	g
<b><math>V_{w(std)}</math></b>	<b>0.284</b>	<b>0.282</b>	<b>ft<sup>3</sup></b>

**b) Contenido de Húmeda Presente en los Gases, ( $B_{ws}$ ):**

$$B_{ws} = \frac{V_{w (std)}}{V_{w (std)} + V_{m (std)}}$$

Donde:

- $B_{ws}$  = Contenido de húmeda en los gases, [%vol]



$V_{w(std)}$ =Volumen de la muestra corregido a condiciones estándar, [ft<sup>3</sup>]  
 $V_{m(std)}$ =Volumen de gas, base seca y a condiciones normales, [ft<sup>3</sup>]

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
$V_{m(std)}$	48.501	48.625	ft <sup>3</sup>
$V_{w(std)}$	0.284	0.282	ft <sup>3</sup>
<b>Bws</b>	<b>0.0058</b>	<b>0.0058</b>	

**Porcentaje de Humedad = 100xBws**

Porcentaje de Humedad	0.58	0.58	% vol
-----------------------	------	------	-------

**Base Seca, ( $M_{fd}$ )**

$$M_{fd} = 1 - Bws$$

$M_{fd}$	0.9941	0.9994	%vol
----------	--------	--------	------

**c) Peso Molecular de los Gases Base Seca ( $M_d$ ) y Base Húmeda ( $M_s$ ):**

Donde:

$M_d$ =Peso Molecular Base Seca

$M_d$ =28.9 g/gmol

**Peso Molecular Base Húmeda, [ $M_s$ ].**

$$M_s = M_d(1 - Bws) + 18(Bws)$$

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
Bws	0.0058	0.0058	%vol
$M_d$	28.9	28.9	g/gmol
<b><math>M_s</math></b>	<b>28.836</b>	<b>28.84</b>	<b>g/gmol</b>

**d) Cálculo para Determinar la Velocidad Promedio de la Corriente de Gases, ( $V_s$ ):**

$$V_s = K_p C_p (\Delta p)_{prom} \sqrt{\frac{T_{m_{prom}}}{P_s M_s}}$$

Donde:

$K_p$ = Constante del Tubo Pitot,

$$= 85 \frac{ft}{seg} \left[ \frac{(lb / lbmol)(inHg)}{(^{\circ}R)(inH_2O)} \right]$$

$C_p$ = Coeficiente del Tubo Pitot,

$$(\sqrt{\Delta p})_{prom} = \text{Promedio de la presión velocidad, [inH}_2\text{O]}^{1/2}$$

Ts(prom)=Temperatura absoluta en el ducto o chimenea, [°R],

Ms= Peso Molecular de la corriente de gas base húmeda, [lb/lbmol]

Pg= Presión estática, [inH<sub>2</sub>O]

Ms= Peso Molecular base húmeda, [lb/lbmol].

Ps= Presión absoluta en el ducto o chimenea, [inHg]

$$Ps = Pbar + \frac{Pg}{13.6}$$

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
Pbar	23.03	23.03	inHg
Pg	-0.03	-0.03	inH <sub>2</sub> O
<b>Ps</b>	<b>23.028</b>	<b>23.028</b>	<b>inHg</b>

### Velocidad Promedio de la Corriente de Gas.

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
Kp	85.49	85.49	ft/seg
Cp	0.84	0.84	
(√Δp)prom	0.392	0.392	(inH <sub>2</sub> O) <sup>1/2</sup>
Ts <sub>prom</sub>	542.37	535.82	°R
Ps	23.028	23.032	inHg
Ms	28.836	28.84	lb/lbmol
<b>Vs</b>	<b>25.443</b>	<b>25.291</b>	<b>ft/s</b>

### e) Flujo Volumétrico, (Qa):

$$Qa = 60 \times Vs \times As$$

Donde:

Qa= Flujo Volumétrico a condiciones normales, [ft<sup>3</sup>/min]

Bws= Contenido de humedad en los gases, [%vol]

Vs= Velocidad Promedio de los gases, [ft/s]

As= Área Transversal de la chimenea, [ft<sup>2</sup>].

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
Vs	25.443	25.291	ft/s
As	0.734	0.734	ft <sup>2</sup>
Bws	0.0058	0.0058	%vol
<b>Qa</b>	<b>1120.377</b>	<b>1120.509</b>	<b>ft<sup>3</sup>/min</b>

**Flujo Volumétrico a condiciones normales, (Qs):**

$$Q_s = 60(1 - B_{ws})V_sA_s$$

Donde:

- Qs= Flujo Volumétrico a condiciones normales, [ft<sup>3</sup>/min],
- Bws= Contenido de humedad en los gases, [%vol],
- Vs= Velocidad Promedio de los gases, [ft/s],
- As= Área Transversal de la chimenea, [ft<sup>2</sup>].

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
Vs	25.443	25.291	ft/s
As	0.734	0.734	ft <sup>2</sup>
<b>Qs</b>	<b>1113.857</b>	<b>1113.815</b>	<b>ft<sup>3</sup>/min</b>

**Flujo Volumétrico a Condiciones Estándar, (Qsd):**

$$Q_{sd} = 60(1 - B_{ws})V_sA_s \frac{528}{T_s} \frac{P_s}{29.92}$$

Donde:

- Qsd= Flujo volumétrico a condiciones estándar, [ft<sup>3</sup>/min],
- Bws= Contenido de humedad en los gases, [%vol],
- Vs= Velocidad Promedio de los gases, [ft/s],
- As= Área Transversal de la chimenea, [ft<sup>2</sup>],
- Ts (prom)=Temperatura absoluta en el ducto o chimenea, [°R],
- Ps= Presión absoluta en el ducto o chimenea, [inHg].

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
Vs	25.443	25.291	ft/s
As	0.734	0.734	ft <sup>2</sup>
Bws	0.0058	0.0058	%vol
Ts <sub>prom</sub>	542.37	536.07	°R
Ps	23.028	23.028	inHg
<b>Qsd</b>	<b>768.958</b>	<b>839.431</b>	<b>ft/min<sup>3</sup></b>

**f) Cálculo para Determinar Diámetro Estimado de la Boquilla de la Sonda, (Dn<sub>(est)</sub>):**

$$Dn_{(est)} = \sqrt{\frac{K_3 Q_m P_m}{T_m C_p (1 - B_{ws})}} \sqrt{\frac{T_s M_s}{P_s \Delta p_{(pro)}}}$$

Donde:

$K_3$ = Constante

$Q_m$ = Valor del flujo de muestreo recomendado, [ft<sup>3</sup>/min]

$T_m$ = Temperatura del medidor de gas seco, [°R]

$C_p$ = Coeficiente del tubo pitot

$B_{ws}$ = Contenido de húmeda en los gases, [%vol]

$T_{s(prom)}$ = Temperatura absoluta en el ducto o chimenea, [°R]

$M_s$ = Peso Molecular base húmeda, [lb/lbmol]

$P_s$ = Presión absoluta en el ducto o chimenea, [inHg]

$(\sqrt{\Delta p})_{prom}$  = Promedio de la presión velocidad, [inH<sub>2</sub>O]<sup>1/2</sup>

$P_m$ = Presión del medidor de gas seco, [inHg]

$$P_m = P_{bar} + \frac{\Delta H_{@}}{13.6}$$

$\Delta H_{@}$  = Factor de calibración del orificio critico.

El factor de calibración del orificio es la caída de presión causada por el orificio una razón de flujo de muestreo de 21.2 lpm (0.75 ft<sup>3</sup>/min)

$\Delta H_{@}$  = Factor de calibración del medidor de orificio.

$$\Delta H_{@} = 0.0319 \Delta H \frac{T_m}{P_{bar}} \frac{\Theta^2}{Y^2 V_m^2}$$

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
$\Delta H$	1.6	1.6	inH <sub>2</sub> O
$T_m$	556.84	563.71	°R
$P_{bar}$	23.03	23.03	inHg
$\Theta$	60	60	min
$Y$	0.9872	0.9872	
$V_m$	67	68	ft <sup>3</sup>
$Q_m$	0.75	0.75	ft <sup>3</sup> /min
$P_m$	23.10	23.10	inHg
$T_{s_{prom}}$	542.37	536.07	°R
$P_s$	23.028	23.028	inHg
$M_s$	28.836	28.84	lb/lbmol
$C_p$	0.84	0.84	
$\Delta H_{@}$	1.015	0.998	
$(\sqrt{\Delta p})_{prom}$	0.392	0.392	(inH <sub>2</sub> O) <sup>1/2</sup>
$B_{ws}$	0.0058	0.0058	%vol
$K_3$	0.03575	0.03575	
<b>Dn(est)</b>	<b>0.2354</b>	<b>0.2334</b>	<b>pulg</b>

g) Cálculo de la constante Isocinética "K".

$$K = \frac{\Delta H}{\Delta p} = K_4 Dn^4 \Delta H_{@} Cp^2 (1 - Bws)^2 \frac{Md Tm Ps}{Ms Ts Pm}$$

Donde:

- K<sub>4</sub>= Constante
- Dn= Diámetro estimado de la boquilla, [pulg]
- ΔH@= Factor de calibración del medidor de orificio.
- Cp= Coeficiente del tubo pitot
- Bws= Contenido de humedad en los gases, [%vol]
- Md= Peso Molecular del Base Seca, [lb/lbmol]
- Tm= Temperatura del medidor de gas seco, [°R]
- Ps= Presión absoluta en el ducto o chimenea, [inHg]
- Ms= Peso Molecular de la corriente de gas base húmeda, [lb/lbmol]
- Ts(prom)= Temperatura absoluta en el ducto o chimenea, [°R]
- Pm= Presión del medidor de gas seco, [inHg]

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
K <sub>4</sub>	849.842	849.842	
Dn(est)	0.2354	0.2327	pulg
ΔH@	1.015	0.998	
Cp	0.84	0.84	
Bws	0.0058	0.0058	%vol
Md	28.9	28.9	lb/lbmol
Tm	556.84	563.71	°R
Ps	23.028	23.028	inHg
Ms	28.836	28.84	lb/lbmol
T <sub>Sprom</sub>	542.37	536.07	°R
Pm	28.90	28.90	inHg
<b>K</b>	<b>1.5161</b>	<b>1.4739</b>	

**h) Porcentaje de variación de Isocinétismo, (I):**

$$\% I = \frac{100T_s \left[ K_5 Vlc + \left( \frac{Vm Y}{Tm} \right) \left( Pbar + \frac{\Delta H}{13.6} \right) \right]}{60 \Theta V_s P_s A_n}$$

Donde:

- Ts (prom)= Temperatura absoluta en el ducto, [°R]
- K<sub>5</sub>= Constantes
- Vlc= Volumen de agua colectada por los burbujeadores, [ml]
- Vm= Volumen de gas muestreado por el medidor de gas seco, [ft<sup>3</sup>]
- Y= Factor de calibración del medidor de gas seco
- Tm= Temperatura absoluta promedio en el medidor de gas seco, [°R]
- Pbar= Presión barométrica en el lugar de la prueba, [inHg]
- ΔH= Presión diferencial promedio en el medidor de orificio, [inH<sub>2</sub>O]

13.6= Densidad del mercurio, [g/cm<sup>3</sup>]  
 Vs= Velocidad Promedio de los gases, [ft/s]  
 Ps= Presión absoluta en el ducto, [inHg]  
 An= Área de la sección transversal de la boquilla, [ft<sup>2</sup>]  
 Θ= Tiempo total de muestreo, [min]

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
T <sub>S<sub>prom</sub></sub>	542.37	536.07	°R
K <sub>5</sub>	0.002669	0.002669	inHg ft <sup>3</sup> /ml°R
V <sub>lc</sub>	6.03	5.98	ml
V <sub>m</sub>	67	68	ft <sup>3</sup>
Y	0.9872	0.9872	
T <sub>m</sub>	556.84	563.71	°R
P <sub>bar</sub>	23.03	23.03	inHg
ΔH	1.6	1.6	inH <sub>2</sub> O
Θ	60	60	min
V <sub>s</sub>	25.443	25.291	ft/seg
P <sub>s</sub>	23.028	23.028	inHg
A <sub>n</sub>	7.67E-04	7.67E-04	ft <sup>2</sup>
%I	<b>92.718</b>	<b>92.422</b>	

**i) Concentración de las Partículas a Condiciones Estándar, [C's]:**

$$C's = \left( 0.0154 \frac{gr}{mg} \right) \left( \frac{Mn}{Vm_{(std)}} \right)$$

Donde:

Mn= Peso de las partículas recolectado por el filtro, [gr]

V<sub>m(std)</sub>= Volumen de gas muestreado, base seca y a condiciones normales, [ft<sup>3</sup>]

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
Mn	0.7	1.2	mg
V <sub>m(std)</sub>	48.501	48.625	ft <sup>3</sup>
C's	<b>2.22E-04</b>	<b>3.80E-04</b>	<b>gr/ft<sup>3</sup></b>
	<b>7.83</b>	<b>13.39</b>	<b>mg/m<sup>3</sup></b>

**Concentración de la Partículas a Condiciones de la Chimenea, [Cs]:**

$$C_s = 17.65 \left[ \frac{C' s P_s M_{fd}}{T_{s(prom)}} \right]$$

Donde:

C's= Concentración de las Partículas a Condiciones Estándar, [gr/ft<sup>3</sup>],

Ps= Presión absoluta en el ducto, [inHg],

M<sub>fd</sub>= Fracción mol base seca,

T<sub>s(prom)</sub>= Temperatura absoluta en el ducto, [°R].

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
C's	2.22E-04	3.80E-04	gr/ft <sup>3</sup>
Ps	23.028	23.028	inHg
M <sub>fd</sub>	0.9875	0.9994	
Ts	542.37	536.07	°R
<b>Cs</b>	<b>0.000164</b>	<b>0.000288</b>	<b>gr/ft<sup>3</sup></b>

**j) Emisión de Partículas, [E]:**

$$E = 0.000857 \times C_s \times Q_s$$

Donde:

E= Emisión de las Partículas, [lb/hr],

Cs= Concentración de las partículas a condiciones de la chimenea, [gr/ft<sup>3</sup>],

Qs= Flujo Volumétrico, [ft<sup>3</sup>/min].

Datos de Campo:	Corridas		Unidades
	I	II	
Cs	0.000164	0.000288	gr/ft <sup>3</sup>
Qs	1113.857	1113.815	ft <sup>3</sup> /min
<b>Emisión [E]</b>	<b>0.0001565</b>	<b>0.000274</b>	<b>lb/hr</b>

**CAPITULO VIII**



## **Discusión de Resultados y Conclusiones.**

A partir de los resultados anteriores, puede discutirse lo siguiente:

Al comparar los resultados de los muestreos para ductos, con las Norma Técnica Ecológica NOM-043-ECOL-1993 que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas para fuentes fijas, se concluye lo siguiente:

Las emisiones de partículas se encuentran, por debajo de los límites máximos permisibles.

Como podemos observar en el capítulo anterior los valores obtenidos de isocinétismo se encuentran dentro del intervalo de 90 a 110 por ciento estipulado por la Norma Técnica Mexicana NMX-AA-010-SCFI-2001, por lo tanto la prueba se realizó adecuadamente y cumpliendo con todas las especificaciones.

## **Conclusiones.**

Si bien existen estudios que han permitido obtener avances considerables en la calidad del aire de la ZMCM, es necesario continuar con esfuerzos que alcancen un mejor resultado en los problemas de contaminación del aire, ya que los altos niveles de emisiones de partículas en la ciudad, requieren de su reducción.

La aplicación del Método 5 de la EPA y las Normas Mexicanas constituye una herramienta confiable y efectiva para evaluar las emisiones reales de partículas de las fuentes fijas, tarea que actualmente es realizada por laboratorios ambientales autorizados, para aquellas fuentes que deben dar cumplimiento a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas se encontró que los valores de porcentaje de isocinétismo de las corridas realizadas se encuentran dentro de los rangos establecidos por las Normas Mexicanas, lo que quiere decir que las pruebas realizadas se realizaron correctamente con todos los puntos estipulados.

El presente trabajo fue diseñar y poner en operación el simulador de emisiones de partículas, objetivo que se realizó, además se cumplieron cada una de las expectativas propuestas ya que fue posible medir cada uno de los parámetros estipulados para este tipo de muestreo como son:

- a).-Definir los puertos y puntos de muestreo requeridos.
- a).-Determinar la velocidad promedio y el gasto volumétrico de la corriente de gas del ductos.
- b).-Medir la Temperatura absoluta del gas en el ducto.
- c).-Medir la Presión absoluta en la chimenea.
- d).-Determinar el peso molecular húmedo del gas en el ducto.
- e).-Determinar gravimétricamente y volumétricamente el agua colectada por los burbujeadores.
- f).-Determinar la concentración y las emisiones de los contaminantes.

El principal propósito de este trabajo fue crear la infraestructura a nivel piloto para que el personal de docencia del Centro de Ciencias de la Atmósfera y cualquier otra institución que deseen realizar prácticas de muestreo isocinético en ductos o chimeneas y lograr determinar las emisiones contaminantes.

La propuesta principal de este trabajo fue disminuir los errores en la medición como una forma de asegurar la obtención de una muestra representativa. Esto se logra utilizando una metodología adecuada que considere cada uno de los aspectos que se abordaron y sin

olvidar la capacidad del personal que opera los equipos de monitoreo. Esto se adquiere con la experiencia, que la podemos obtener realizando practicas con este equipo montado. Existen muchos puntos finos que solo se descubren cuando se está realizando este tipo de trabajos. El monitoreo es un trabajo duro e inclusive riesgoso si no se cuenta con un plan de trabajo adecuado, además de las condiciones necesarias del sitio de muestreo, y de las circunstancias de seguridad e higiene ocupacional que debe de cumplir el personal responsable de dicha tarea.

**BIBLIOGRAFIA.**

**BIBLIOGRAFIA.****Addendum to Specifications for Incinerator Testing at Federal Facilities.**

PHS, NCAPC.

December 6, 1967.

**Cardin B., Deschenes J.T., (1993).** "A Universal air Preconcentrator for Automated Analysis of Ambient Air, Stack Gas, Landfill Gas, and Automobile Exhaust Using GC/MS Methods. Proceedings of the 1993 U.S. EPA/A&WMA International Symposium, Measurement of Toxic and Related Air Pollutants.

**Code of Federal Regulation.**

EPA 40 CFR ch.1 (7-1-1989).

Part 60, Method 5

**Bravo, H.; Sosa, R.; Sánchez, P.; Bueno E.; González, L. (2002 a)** Concentrations of benzene and toluene in the atmosphere of the southwestern area at the México City Metropolitan Zone. Atmospheric Environment. 36, 3846-3849.

**Bravo, H.; Torres, R.; (2002b).** Air Pollution Levels and Trends in the Mexico City Metropolitan Area. En Urban Air Pollution and Forest. Resources at Risk in the Mexico City Air Basin. Fenn, M.E.; De Bauer, L.I. and Hernández Tejeda, T. (2002)

**Bravo, H.; Sosa, R.; Sánchez, P.; Jaime, p. Mónica (2002c)** La calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y recomendaciones para mejorarla considerando conceptos básicos de ingeniería ambiental. Ingeniería, Investigación y Tecnología. III (4). Pp 185-193.

**Baron P.A. and Willeke K.; 1993.** Aerosol Fundamentals. Chapter in "Aerosol Measurements: Principles, Techniques and Applications". Ed. by Willeke K. and Baron P.A.

**Bravo, H. et al. 2003.** Efecto de la lluvia acida en el material constituyente de los monumentos mayas mexicanos. Ingeniería, Investigación y Tecnología IV.

**Beaton S.P., Bishop G.A., Stedman D.H.** Emission Characteristics of Mexico City Vehicles, Journal of the Air & Waste Management Association Vol. (42) 1424-1429, (1992).

**Becerra, Antonio. 1999.** Escorrentía, erosión y conservación de suelos. Universidad Autónoma Chapingo.

**Chow, J.C. et al.1995.** Measurement Methods to Determine Compliance with Ambient Air Quality Standard for Suspended Particles. Journal of the air & Waste Management Association.

**D.P. Meffert, M.M. McEuen and R.H Gilbreath, Jr.,** The rust Engineering Co. Birmingham, Ala.Stack Testing and Monitoring. P-25

**Dr. Jaime A. Moragues.,** Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente Secretaría de Desarrollo Sustentable y Política Ambiental, "Manual de tecnologías de medición de concentración de gases y partículas en chimeneas y atmósfera".

**Environmental Protection Agency.**

Air Chief, April 2002

**Environmental Protection Agency**

Source Sampling Manual.

Volume 1

January, 1976 Revised: April, 1979

August, 1981; January, 1992

State of Oregon Department of Environmental Quality

Air Quality Division

**Finlayson-Pitts, BJ Pitts, JN. (1986).** Atmospheric chemistry: fundamentals and experimental techniques. Wiley-Interscience, EUA.

**Fenn, M.E.; L.I. and Hernández Tejada, T. (2002).** Urban Air Pollution and Forest Resources at Risk in the Mexico City Air Basin pp VIII

**Garza G.** Uncontrolled Air Pollution In Mexico City. Cities Vol. (13) 315-328,(1996)

**Godish** Thad Air Quality (Lewis Publishers, E.U.A., 2004)

**Hesketh, Howard. 1986.** Fine particles in Gaseous Media. 2<sup>a</sup>.edición. Lewis Publishers.

**Hinds W.C.** Aerosol Technology. Properties behavior and Measurement of Airborne Particles (John Wiley and Sons Inc., E.U.A., 1999).

**Hopke B.M** Handbook of Chemical Technology and Pollution Control (Academia Press, E.U.A., 1998).

**Hopke K.P.** Receptor modeling for Air Quality Management (Elsevier, E.U.A., 1991).

**International Organization for Standardization** ISO Standard Compendium- Environmental Air Quality, Edition 1994. ISOP 4225: Air Quality-General Aspects-Vocabulary.

**Jáuregui, Ernesto. 1997.** Urban-rural humidity contrasts in Mexico City. International Journal of Climatology.

**Jiménez, Blanca. 2001.** La contaminación ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiada. Instituto de Ingeniería, UNAM.

**John W., Wall S.M., Ondo J.L and Winklmayr W., 1990.** Modes in the size distributions of atmospheric inorganic aerosol. Atmospheric Environment, 24A (9), 2349-2359

**Manahan, SE. (2000).** Environmental chemistry. Lewis, EUA.

**Marcelo E. Corp, y Paul Procee.**, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA) Control de La Contaminación del Aire" del Instituto de Capacitación en la Contaminación del Aire (APTI).

**Martin, Robert M.**, Construction Details of Isokinetic Source-Sampling Equipment. Environmental Protection Agency., Research Triangle Park, NC. APTD-0581. April 1971

**Molina, L.; Molina, M. (2002)** Air Quality in the Mexico MAGACITY. Kluwer Academic Publishers.

**Miller GT. (1994).** Ecología y Medio Ambiente. Grupo editorial Iberoamerica, México.

**Nevers N.H., Neligan R.E., Slater H.H.**, 1977, Air Quality Management, Pollution Control Strategies, Model and Evaluation, Air Pollution, Vol V, Air Quality Management, editor Stern, A.c., Academic Press

**Perkins, Henry C.1974.** Air Pollution. México, Mc Graw Hill.

**Parker C. Reist.**

Aerosol Science and Technology (Mc Graw Hill, E.U.A., 1993).

**Preining O., 1991.** Aerosol and climate an overview. Atmospheric Environmental, 25, 243-244.

**Perry.**

Enciclopedia del Ingeniero Químico

Mc Graw Hill

Ed. 1999

**Seinfeld JH, Pandis SN. (1998).** Atmospheric chemistry and Physics: from air pollution to climate change. Wiley-Intersciencie:EUA.

**SEMARNAT (Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003), GDF (Gobierno del Distrito Federal), Gobierno del Estado de México, SSA (Secretaria de Salud).** Programa para mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002-2010.

**Sepúlveda Sánchez José David., 2004.** Perfil morfológico y químico elemental de partículas respirables en fuentes de emisión puntual y muestreos ambientales.

**Spurny Kwetoslav R.** Aerosol Chemical Processes in the Environment (Lewis Publishers, E.U.A., 2000).

**Smith, W.S., R.T. Shigehara, and W.F. Todd.**, A Method of Interpreting Stack Sampling Data., Paper Presented at the 63rd Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, St. Louis, MO. June 14-19, 1970.

**Smith, W.S., et al.**, Stack Gas Sampling Improved and Simplified With New Equipment. APCA Paper No. 67-119.1967.

**Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).** Gobierno del Distrito Federal. Secretaria del Medio Ambiente. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. <http://sma.df.gob.mx/sma/gaa/monitoreo/antecedentes.htm>

**Rom, Jerome J.** Maintenance, Calibration, and Operation of Isokinetic Source Sampling Equipment., Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC. APTD-0576. March 1972.

**U.S. Environmental Protection Agency.**

Air Pollution Training Institute

Compliance and Source Test Observation.

Course # 468.

Federal Reference Method 5 Operational Manual.

**U.S. Environmental Protection Agency.**

Air Pollution Training Institute.  
Compliance and Source Test Observation.  
Course # 468.

**Wark, Kenneth and Cecil Warner (2002).**

Contaminación del Aire, Origen y Control. Ed. LIMUSA.

**Whitby K.T., 1978.** The physical characteristics of sulfur aerosols. Atmospheric Environmental, 12, 135-159

**WHO (World, Health Organization, 2000).** Criteria used in establishing guideline values.  
[www.euro.who.int/document/aicq/3summary.pdf](http://www.euro.who.int/document/aicq/3summary.pdf)

**Wark, Kenneth and Cecil Warner (2000).** Contaminación del Aire, Origen y Control. Ed. Limusa. Pp 17-61

**F. Raes, ACE-2(1997)** North Atlantic regional aerosol characterization experiment Tenerife-Sagres, EC

**Joint Res,(1997).** Center, Ispra, Italy.

**Environmental Protection Agency.**

Sitio de Internet con dirección [www.epa.org.com](http://www.epa.org.com)

**PAMS Data Analysis Support**

[www.epa.gov/air/oaqps/pams/analysis.html](http://www.epa.gov/air/oaqps/pams/analysis.html)

**PROFEPA, Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente**

Ed. 1997, México. [www.profepa.gob.mx](http://www.profepa.gob.mx)

**SEMARNAT**, Sitio de Internet con dirección [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)

**Cruz Mendoza Jacqueline**

Equipo de muestreo manual y portátil para la determinación de partículas en conductos y chimeneas.

Tesis.

México 1993.

**Información consultada de Internet.**

[1]<http://www.estrucplan.com.ar/Legislacion/Nacion/Resoluciones/Secretaria%20de%20Desarrollo%20Sustentable%20y%20Politica%20Ambiental/2001/manual01.pdf>

[2] <http://www.cofepris.gob.mx/bv/libros/Cap06.pdf>

[3] <http://www.jornada.unam.mx/2001/mar01/010326/eco-aire.html>

[5] [http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/E/fulltext/guiasoms/re\\_oms.pdf](http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/E/fulltext/guiasoms/re_oms.pdf)

[7] [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/libros/geologia/gestion\\_calidad/Cap03.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/libros/geologia/gestion_calidad/Cap03.pdf)

[8]. <http://www.uacj.mx/Publicaciones/sf/num1/ecoinf2.htm>

Organización Panamericana de la Salud ,Programa de Publicaciones (DBI/E) 525 Twenty-third Street, NW Washington 2006 , DC 20037, EUA Fax: (202) 338.0869

**ANEXO (COMPENDIO DE FOTOGRAFIAS)**



Compendio de Fotografías y Anexos.



Sistema de Colección de Muestra.



Caja Fría ó Compartimiento de los Burbujeadores.



Burbujeadores



Unidad de Control.





Filtro y Portafiltro



Manómetro Inclinado.



**Boquillas**



**Acoplamiento del Ventilador con el Ducto**





Localización de los Puertos de Muestreo



Controlador de Temperatura y Variador de Frecuencia para Motor del Ventilador.



Tren de muestreo (caja de muestreo, sonda y medidor de temperatura)



Equipo de Muestreo.

**GLOSARIO**

<b>APTD</b>	Air Pollution Technical Document (USA).
<b>CCA</b>	Centro de Ciencias de la Atmósfera.
<b>CAA</b>	Clean Air Act (USA).
<b>CFR</b>	Code of Federal Regulations (USA).
<b>DAM</b>	Diámetro Aerodinámico Medio.
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency (USA).
<b>GDF</b>	Gobierno del Distrito Federal.
<b>“IMECA”</b>	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire.
<b>“IMEXCA”</b>	Índice Mexicano de la Calidad del Aire.
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change (2001).
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization.
<b>INE</b>	Instituto Nacional de Ecología.
<b>MARI</b>	México City Quality Research Initiative.
<b>NAAQS</b>	National Ambient Air Quality Standards (USA).
<b>NCAPC</b>	National Center for AIDS Prevention and Control.
<b>NESHAPs</b>	National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (USA).
<b>MARI</b>	México City Quality Research Initiative
<b>NMX</b>	Norma Técnica Mexicana.
<b>NOM</b>	Norma Oficial Mexicana.
<b>OAQPS</b>	Office of Air Quality Planning and Standards (USA).
<b>PICCA</b>	Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México.
<b>PSI</b>	Pollutant Standard Index.
<b>PST</b>	Partículas Suspendidas Totales.
<b>PM<sub>10</sub></b>	Partículas Menores 10 micras.
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	Partículas Menores a 2.5 micras.
<b>PROAIRE</b>	Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000.
<b>ppm</b>	Partes por millón.
<b>RAMA</b>	Red Automática de Monitoreo Atmosférico.
<b>RCRA</b>	Resource Conservation and Recovery Act (USA).
<b>SCA</b>	Sección de Contaminación Ambiental.
<b>SEDUE</b>	Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.
<b>SEMARNAT</b>	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<b>µg/m<sup>3</sup></b>	Microgramos por metro cúbico de aire.
<b>USEPA</b>	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
<b>WHO</b>	Organización Mundial de Salud (World Health Organization).
<b>ZMCM</b>	Zona Metropolitana de la Ciudad de México.