

MANUAL 3

REDES ESTACIONES Y EQUIPOS DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE



1. INTRODUCCIÓN	1
2. REDES DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE.	8
2.1 Redes manuales.	8
2.1.1 Elementos de las redes manuales.	8
2.1.1.1 Programa de muestreo.	9
2.1.1.2 Manejo de muestras.	10
2.2 Redes automáticas.	11
2.3 Tipos de redes.	11
2.3.1 Red general de medición de la calidad del aire ambiente.	12
2.3.2 Red de medición de contaminantes de fuentes específicas.	12
2.3.2.1 Red de monitoreo de fuentes fijas.	12
2.3.2.2 Red de medición de emisiones vehiculares.	13
2.3.2.3 Red de medición de contaminantes específicos.	13
3. PRINCIPIOS DE DISEÑO DE REDES	14
3.1 Escalas de representatividad.	14
3.1.1 Escala micro.	16
3.1.2 Escala media.	16
3.1.3 Escala vecindario / local.	16
3.1.4 Escala urbana.	17
3.1.5 Escala regional.	17
3.1.6 Escala nacional / global.	17
3.2 Información básica para el diseño de redes.	17
3.2.1 Epidemiología y exposición de la población.	17
3.2.2 Programas existentes de medición de calidad del aire.	18
3.2.3 Inventarios de emisiones.	18
3.2.4 Actividades en la zona.	19
3.2.5 Información meteorológica.	19
3.2.6 Información topográfica.	19
4. SELECCIÓN DE ZONAS PARA LA MEDICIÓN DE CALIDAD DEL AIRE.	20

4.1 Determinación de la distribución de concentraciones de contaminantes.	20
4.1.1 Medición simplificada.	21
4.1.2 Simulación.	21
4.1.3 Muestreo a juicio.	22
4.1.4 Muestreo probabilístico	23
4.1.4.1 Muestreo aleatorio simple.	23
4.1.4.2 Muestreo sistemático.	24
4.1.4.3 Muestreo estratificado.	24
4.1.5 Traslape de información.	24
4.2 Selección del número de sitios de medición.	25
4.3 Evaluación de la ubicación de estaciones de medición de calidad del aire.	28
4.3.1 Estaciones de medición para SO ₂ y NO ₂ .	28
4.3.2 Estaciones de medición para O ₃ .	28
4.3.3 Estaciones de medición para partículas y otros contaminantes.	29
4.3.4 Estaciones de medición de niveles de fondo.	29
4.3.5 Estaciones de medición para fuentes específicas.	30
4.3.5.1 Estaciones de medición orientadas fuentes fijas de SO ₂ y NO ₂ .	30
4.3.5.2 Estaciones de medición orientadas a fuentes móviles.	30
4.4 Análisis de cierre o reubicación de estaciones.	31
5. ESTACIONES DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE.	33
5.1 Clasificación de estaciones de medición de la calidad del aire	33
5.1.1 Clasificación de estaciones por tipo de operación	33
5.1.2 Clasificación de estaciones de medición de la calidad del aire por su movilidad.	34
5.2 Instalación de estaciones de monitoreo de la calidad del aire.	34
5.3 Instalación y operación de estaciones de monitoreo. Consideraciones generales.	37
5.4 Características funcionales y de construcción de las estaciones de monitoreo.	39
5.5 Seguridad y planes de emergencia	41
5.5.1 Seguridad en las instalaciones.	41
5.5.2 Prácticas de seguridad en torno a las instalaciones	43
5.6 Codificación administrativa de las estaciones.	43

6. EQUIPOS DE MEDICIÓN PARA LA CALIDAD DEL AIRE	50
6.1 Tipos de equipos en una estación de medición de la calidad del aire.	50
6.1.1 Analizadores automáticos.	51
6.1.1.1 Analizador de O ₃ (Fotometría UV).	52
6.1.1.2 Analizador de CO (Fotometría Infrarroja, IR).	54
6.1.1.3 Analizador de NO _x (Quimiluminiscencia).	55
6.1.1.4 Analizador de SO ₂ (Fluorescencia pulsante).	57
6.1.2 Monitores de partículas suspendidas.	59
6.1.2.1 Microbalanza de elemento oscilante.	59
6.1.2.2 Atenuación de radiación beta.	60
6.1.3 Muestreadores de partículas suspendidas.	60
6.1.4 Sensores meteorológicos.	62
6.1.4.1 Velocidad de viento.	62
6.1.4.2 Dirección de viento.	62
6.1.4.3 Presión.	63
6.1.4.4 Temperatura.	64
6.1.4.5 Humedad relativa.	64
6.1.4.6 Precipitación pluvial.	64
6.1.5 Sistema de adquisición de datos (SAD).	65
6.1.6 Sistema de calibración.	65
6.1.6.1 Calibrador dinámico.	66
6.1.6.2 Fuente de aire cero.	67
6.1.6.3 Gases de calibración.	67
6.1.6.4 Medidores de flujo de bajo volumen.	67
6.1.6.5 Estándares de transferencia de flujo de alto volumen.	68
6.2 Criterios de selección de equipos de medición de la calidad del aire.	68
6.3 Instalación y puesta en marcha de los equipos de monitoreo de la calidad del aire.	71
7. REFERENCIAS.	73

1. INTRODUCCIÓN

Dando continuación al Manual 2, donde se habló de los Sistemas de Medición de la Calidad del Aire, este documento desagrega dichos sistemas y describe las partes que los integran. Así, este Manual engloba tres grandes temas: Redes, Estaciones y Equipos de medición de la calidad del aire.

Ante la ausencia de un marco normativo nacional en materia de diseño e instalación de redes de monitoreo de la calidad del aire, las redes que actualmente operan en México tienen diversos criterios operativos y presentan fuertes limitaciones en cuanto a la disponibilidad de recursos financieros, humanos y materiales. Por ello, el diseño de nuevas redes de medición de la calidad del aire, así como el rediseño de las redes actuales y la expansión de su cobertura, son necesarios para mejorar la operación de éstas, a través de homogenizar los criterios de su establecimiento, operación y mantenimiento.

Este documento fue elaborado para proponer criterios y procedimientos generales que faciliten el diseño y la instalación de redes de medición de calidad del aire. Está dirigido a responsables de la Gestión de la Calidad del Aire, a operadores de redes de monitoreo y a consultores de este tema.

Para entender más el concepto de red, el Capítulo 2 define el concepto y describe las diferentes clasificaciones de redes, de acuerdo al tipo equipo que las integran, así como al tipo de fuente a las que están orientadas.

El Capítulo 3 describe los principios básicos para el diseño de una red, cuáles son las escalas que se pueden representar, y cuál la información básica a considerar en el diseño de una red.

El Capítulo 4 complementa al anterior, presentando algunas metodologías utilizadas para ubicar los sitios donde deben colocarse las estaciones de medición de la calidad del aire, mediante la determinación de la distribución de concentraciones de contaminantes. Asimismo, se presenta cómo se determina el número de sitios de medición que debe incluir una red, así como el proceso de evaluación de la ubicación de los sitios de medición de las redes ya establecidas.

El Capítulo 5 presenta el concepto de estación de medición de calidad del aire y la clasificación de éstas. También presenta los criterios para su instalación, operación y seguridad. Adicionalmente se sugiere una nomenclatura para codificar a las estaciones de medición de calidad del aire.

Finalmente, en el Capítulo 6 se describen los diferentes equipos utilizados en una estación de medición de la calidad del aire: analizadores y muestreadores de contaminantes criterio, parámetros meteorológicos, sistemas de adquisición de datos y sistemas de calibración. Asimismo, presenta algunos criterios para la selección de estos equipos y las consideraciones generales para su instalación y puesta en marcha.

2. REDES DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

Una red de medición de la calidad del aire es parte de un Sistema de Medición de Calidad del aire, SMCA. Es importante mencionar que un SMCA puede incluir una o más redes en el mismo sistema.

A su vez, una red de medición de la calidad del aire es el conjunto de estaciones de muestreo manual y/o de monitoreo automático o semiautomático de contaminantes (ambos de partículas y contaminantes gaseosos).

Este manual adopta el término de redes de medición de la calidad del aire, englobando tanto a las redes manuales de muestreo como a las redes automáticas de monitoreo. A continuación de describen ambos tipos de redes.

2.1 Redes manuales.

Una red manual es el conjunto de dos o más estaciones manuales para el muestreo de contaminantes.

En un principio, la medición de la calidad del aire se realizaba mediante métodos no continuos, conocidos con el nombre de química húmeda para gases (primero se tomaba la muestra y después se medía la concentración del contaminante mediante diferentes métodos en laboratorio) y de altos volúmenes para partículas suspendidas (totales y menores a 10 o 2.5 micrómetros).

Actualmente, las redes manuales son utilizadas principalmente para el muestreo de partículas suspendidas, utilizando el método mencionado, que mediante un manejo adecuado de la muestra, permite determinar su concentración. Por otra parte, las partículas colectadas en la muestra pueden ser sometidas a distintos tratamientos en el laboratorio para determinar su composición.

El uso de las redes manuales para la medición de contaminantes no criterio, ya sea mediante métodos continuos o no continuos, aún no se descartan y su uso dependerá de los objetivos de medición establecidos, y de los recursos económicos, técnicos e instrumentales con los que se cuenten (Martínez, 1996). Por ejemplo, algunas industrias emiten contaminantes específicos –en las refinerías de plata se pueden emitir vapores de mercurio, en la industria del aluminio puede haber flúor y en las fábricas de papel se emiten mercaptanos- por lo que se requerirá medir la concentración de algunos contaminantes específicos además de los ordinarios.

En la siguiente sección se presentan los principales elementos de una red manual para la medición de contaminantes criterio.

2.1.1 Elementos de las redes manuales.

Los elementos de una red manual dependerán en gran parte de los objetivos del monitoreo de la calidad del aire (ver Manual 2). Dentro de los principales elementos de una red manual se encuentran:

- Equipos de muestreo (descritos en el capítulo 6 del presente Manual),
- Laboratorios de análisis de muestras (ver Manual 2),
- Programas de muestreo y,
- Procedimientos para el manejo de la muestra.

Es importante tener en cuenta que los costos de los equipos manuales, tanto de adquisición como de operación, son significativamente más bajos y requieren de poca infraestructura para su instalación; sin embargo, éstos demandan la disposición de laboratorios y de personal especializados para la preparación, acondicionamiento y determinación de las muestras, lo que implica que se tenga que realizar una mayor inversión en infraestructura y capacidad técnica.

La elaboración de un buen programa de muestreo, así como la implementación de procedimientos para el manejo de muestras, son esenciales para asegurar la calidad y representatividad de los resultados.

2.1.1.1 Programa de muestreo.

Para la adecuada operación de una red manual se debe elaborar un programa de muestreo de acuerdo a los objetivos de medición de la calidad del aire. En términos generales, se han considerado tres períodos de muestreo:

- corto (1 hora), cuando se sabe que existen altas concentraciones de contaminantes y se prevé la saturación del filtro.
- medio (1 día), es el usado con mayor frecuencia y el que está normado NOM-035-SEMARNAT-1993 (DOF, 1993).
- largo (> 1 mes), es usado para sitios prístinos, donde se prevén muy bajas concentraciones de partículas.

El período de muestreo es particularmente importante si los resultados se van a comparar con normas o criterios de la calidad del aire.

El programa debe incluir todas las etapas del muestreo: acondicionamiento y pesaje del medio filtrante, instalación del equipo de muestreo y del medio filtrante, periodo de muestreo, recolección, transporte, acondicionamiento y pesaje del filtro con la muestra, cálculo de la concentración, almacenamiento y, si procede, análisis de la muestra.

La normatividad mexicana ya tiene establecido un periodo de muestreo de 24 ± 1 horas cada 6 días, iniciándolo a la media noche. Este periodo está establecido en la NOM-035-SEMARNAT-1993 (DOF, 1993).

2.1.1.2 Manejo de muestras.

El manejo de muestras es una etapa fundamental del muestreo, tan importante como la misma toma de la muestra. El Cuadro 1 muestra algunas recomendaciones para su manejo y cuidados.

Realizar la implementación de hojas de campo y cadenas de custodia.

Tener cuidado al marcar correctamente las muestras y el dispositivo de muestreo, para su óptima identificación a través de los procesos de prueba y análisis.

Manipular apropiadamente las muestras, para evitar que se contaminen con otro componente y que de esta manera, su análisis dé como resultado un muestreo válido.

Tomar las precauciones necesarias durante el transporte de la muestra, para eliminar la posibilidad de fuertes cambios ambientales, destrucción accidental y/o que se efectúe alguna reacción química o cambio físico de la muestra.

La persona encargada de la custodia de la muestra, gráficas u otros datos, debe registrar cualquier situación que pudieran alterar los resultados.

Almacenar las muestras en un lugar seguro, después de que éstas sean entregadas al laboratorio

Fuente: Adaptado de US-EPA 2008

Cuadro 1. Recomendaciones y cuidados para el manejo de muestras

2.2 Redes automáticas.

Una red automática es el conjunto de dos o más estaciones automáticas para la medición de contaminantes atmosféricos. Cada estación contiene, como se describió en el Manual 1, diversos equipos, como analizadores automáticos, y monitores o sensores meteorológicos, destinados a monitorear las concentraciones de uno o más contaminantes del aire y algunos parámetros meteorológicos

En México, a mediados de los años setenta se introdujeron equipos automáticos para la medición de contaminantes atmosféricos con los cuales se hizo posible el monitoreo continuo en tiempo real (Martínez, 1996). Estos equipos utilizan métodos de medición que aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes atmosféricos para determinar su concentración.

Así como en las redes manuales, los elementos de una red automática también están en función de los objetivos de medición de la calidad del aire (ver Manual 2). La diferencia entre estos dos tipos de redes radica principalmente en los equipos que utilizan y en la cantidad de datos que generan.

De manera general, los elementos más comunes en una red automática, que se describen en los capítulos subsecuentes de este manual, son:

- Estaciones de medición de la calidad del aire (ver Capítulo 5);
- Equipos para la medición de la calidad del aire: analizadores automáticos, monitores de partículas, sensores meteorológicos, sistema de adquisición de datos y sistema de calibración (ver Capítulo 6);
- Procedimientos de operación estándar (ver Manual 1);
- Programas adecuados de mantenimiento preventivo y de calibración de equipos (ver Manual 4).

Además de la clasificación de las redes por el tipo de equipos que utilizan, manual o automático, éstas también se pueden clasificar de acuerdo a su objetivo. Esta clasificación se presenta en la siguiente sección.

2.3 Tipos de redes.

Dependiendo de los objetivos de medición que se hayan establecido en el SMCA, las redes pueden recibir cierta clasificación, según también el tipo de medición que vayan a realizar o el tipo de fuentes al que estén enfocadas a medir. A continuación se presentan las clasificaciones más comunes para una red (OMS-CEPIS, 2006).

2.3.1 Red general de medición de la calidad del aire ambiente.

Estas redes se instalan con la finalidad de conocer el grado de exposición que tienen los habitantes de una localidad, los ecosistemas e inmuebles, a los contaminantes atmosféricos. Estas redes proporcionan información sobre la tendencia de dichos contaminantes en una localidad; la información de la localidad debe ser representativa, por lo que se deben cubrir todos los tipos de área dentro de la localidad: industriales, comerciales y residenciales. En este sentido, las estaciones deben ubicarse de manera que sean representativas de estas diferentes áreas.

Cada estación debe estar conectada en línea con el centro de control para enviar los datos periódicamente de manera automática. El centro de control analiza los datos enviados y cuando se detecta algún problema manda al personal de mantenimiento a la estación donde se detectó dicho problema. El centro, a su vez, revisa los datos crudos que vienen de las estaciones y, de ser necesario, marca datos sospechosos, colocando banderas (ver Manual 5) para después manejarlos. Las estaciones de niveles de fondo (ver Sección 4.3.4.) también se pueden incluir en este tipo de red y los datos se manejan de la misma manera que los de las estaciones de monitoreo de calidad del aire ambiente general¹.

¹ El bienestar de la población es una consideración importante, sin embargo este tipo de monitoreo también puede identificar impactos de otras fuentes que de otra manera no se identificarían. Comentario realizado por experto de la EPA durante la elaboración de este documento

2.3.2 Red de medición de contaminantes de fuentes específicas.

Este tipo de redes son instaladas en función de la ubicación de fuentes de emisión específicas, así como de los parámetros que son característicos de dichas emisiones. La información que genera la red de monitoreo es supervisada casi en tiempo real para activar planes de contingencia y proceder a controlar las emisiones de la(s) fuente(s) correspondientes.

Estas redes también son una opción cuando los recursos económicos son insuficientes para contar con redes que midan todos los contaminantes criterio y los parámetros meteorológicos. Las principales fuentes específicas que se monitorean son las fuentes fijas y las móviles. Sin embargo, requieren de inventarios previos de emisiones de las fuentes a vigilar y de una sofisticada modelación para determinar los sitios idóneos para la instalación de las estaciones de medición.

2.3.2.1 Red de monitoreo de fuentes fijas.

Esta red está compuesta por estaciones de medición ubicadas en lugares estratégicos para medir emisiones de fuentes fijas específicas. Sus estaciones se pueden incluir en la red general de medición de calidad del aire ambiente y, al igual que ésta, enviar los datos de medición al centro de control de manera periódica y automática. Según las atribuciones de cada localidad, el centro de control tendrá la consigna de emitir un llamado de

advertencia a las autoridades correspondientes, a la fuente fija específica y a la ciudadanía cuando los datos recibidos muestren la presencia de concentraciones que rebasen las normas de calidad del aire.

2.3.2.2 Red de medición de emisiones vehiculares.

Con el fin de conocer las concentraciones producidas por las emisiones vehiculares (conocidas también como fuentes móviles), las estaciones que conforman este tipo de red se ubican a un lado de las calles o avenidas principales, fuera de los carriles y atrás de la banqueta. Como las concentraciones que se miden varían dependiendo de varios parámetros, las vías deben clasificarse para que así las estaciones se ubiquen de tal manera que se optimice su cobertura y la representatividad de los datos generados.

Esto evita que se instalen un gran número de estaciones de monitoreo de emisiones vehiculares, haciendo posible obtener concentraciones típicas a lo largo de las diferentes vías de la localidad con sólo un número limitado de estaciones. Al diseñar la red, estas estaciones pueden quedar incluidas en el Sistema de Medición de Calidad del Aire, SMCA. El manejo de los datos enviados por la estación se realiza de la misma manera que en el caso de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, ver Manual 5.

2.3.2.3 Red de medición de contaminantes específicos.

Este tipo de redes tiene generalmente la finalidad de medir la concentración de contaminantes no criterio, como: compuestos orgánicos volátiles, contaminantes orgánicos persistentes, contaminantes peligrosos, entre otros. Cuenta con estaciones que son utilizadas para fines específicos, generalmente de investigación. Por sus características, esta red requiere estar conectada de manera independiente al centro de control. Como se mencionó, el principal propósito de estas redes es la investigación de contaminantes específicos, en cuanto a su comportamiento, transporte y tendencias.

3. PRINCIPIO DE DISEÑO DE REDES

Al diseñar una red también se debe considerar el comportamiento de cada contaminante a medir (SO₂, NO₂, etc.), de tal manera que se pueda determinar la ubicación adecuada para llevar a cabo la medición. Después se pueden modificar las ubicaciones diseñadas para contaminantes individuales, cuando se vaya a instalar una estación multicomponente (US-EPA, 2008; OMS-CEPIS, 2004).

Además de los objetivos de medición (descritos en el Manual 2), el diseño de una red de medición depende los siguientes factores:

- Escala espacial a la cual se pretende realizar la medición.
- Información básica para la selección del número y tipo de estaciones.

Ambos factores se describirán los siguientes apartados.

3.1 Escalas de representatividad.

Las estaciones de medición de calidad del aire tienen una representatividad espacial característica dentro de una red, la cual está íntimamente ligada con los objetivos de medición. La representatividad es un indicador a través del cual se refleja alguna característica de una población, las variaciones de un parámetro en un punto de muestreo o las

condiciones de un proceso. La escala de representatividad depende de la topografía del territorio, de su entorno, natural o urbano, de la meteorología, de las fuentes de contaminación y del tipo de contaminante o parámetro meteorológico que midan (OMS-CEPIS, 2004; USEPA, 2008; NZ, 2009). El Cuadro 1 describe la clasificación por representatividad sugerida por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América (CFR 40, 1994).

Entre más pequeña sea la escala de representatividad, más limitados y específicos son los objetivos de medición. Así, para medir el impacto de una fuente puntual es necesario utilizar escalas pequeñas, mientras que para estimar los impactos sobre la salud pública es necesario tener estaciones con una escala de representatividad a nivel vecindario/municipal o urbana. Igualmente ocurre con los contaminantes atmosféricos, el monóxido de carbono, que es poco reactivo y se dispersa fácilmente puede medirse con niveles muy aceptables de representatividad en estaciones que van de la escala micro a urbana. La descripción de estas escalas y su relación con los objetivos de monitoreo se presenta a continuación.

Escala	Distancia	Característica
Micro	~10 a 100 m	Áreas tales como calles centrales que forman cañones estrechos o corredores con tráfico intenso. Los equipos de medición se encuentran cerca de las fuentes de emisión de bajo nivel. Estos sitios no son tomados en consideración generalmente para la evaluación del cumplimiento de normas y estándares. Las mediciones se pueden emplear para el estudio de emisiones y sus zonas de influencia. Los sitios se encuentran en edificios habitados o lugares donde el público puede estar expuesto a las concentraciones medidas.
Media	100 a 500 m	Las mediciones de este tipo son apropiadas para la evaluación de efectos de corto plazo en la salud pública. Las diferencias entre las mediciones a esta escala se deben a la presencia de áreas industriales grandes con procesos diversos o cerca de grandes zonas de construcción. Los muestreos generalmente están orientados a fuentes y se emplean para determinar la contribución de las fuentes de emisión en la comunidad.
Vecindario o Local	500 m a 4 km	Las mediciones de esta categoría representan las condiciones en una subregión urbana razonablemente homogénea con dimensiones de varios kilómetros. Los datos se pueden emplear para evaluar los modelos empleados para la evaluación de fuentes.
Urbana	4 a 100 km	Estas mediciones se emplean para caracterizar las concentraciones de un contaminante en un área completamente metropolitana o rural. La medición refleja la mezcla de contaminantes de diferentes fuentes dentro de un complejo urbano. Estas mediciones no están dominadas por algún vecindario o fuente en particular. Los equipos de medición generalmente se ubican en puntos elevados lejos de industrias y avenidas transitadas.
Regional	100 a mil km	Las mediciones caracterizan las condiciones de un área con dimensiones de varios cientos de kilómetros. Su empleo requiere una gran homogeneidad de las concentraciones de los contaminantes en el área.
Nacional	> mil km	Son estaciones capaces de describir las concentraciones contaminantes o características de un territorio común muy amplio.
Global		Son estaciones donde se miden parámetros de interés global como pueden ser gases de efecto invernadero o los contaminantes tóxicos y persistentes.

Fuente: Adaptado de CENMA, 2003

Cuadro 2. Descripción de las escalas espaciales empleadas para la medición de la calidad del aire.

3.1.1 Escala Micro.

A esta escala se asocian volúmenes de aire ambiental que tienen dimensiones que van desde varios metros cuadrados hasta aproximadamente 100 m^2 , y corresponde a estaciones ubicadas muy cerca de la(s) fuente(s), por ejemplo: CO y NO. En la medición de gases, esta escala se usa para evaluar la distribución del gas dentro de la pluma de la fuente, ya sea sobre un terreno plano o sobre un terreno complejo. En la medición de partículas, esta escala se usa para caracterizar las emisiones procedentes de las fuentes puntuales. Este tipo de escala, también se puede usar para definir los efectos sobre la salud de ciertos individuos que permanecen cerca de una ubicación fija por largos períodos.

3.1.2 Escala Media.

Representa dimensiones que van de 100 m^2 a 0.5 km^2 . En esta escala se caracteriza la calidad del aire en áreas de un tamaño equivalente a varias manzanas dentro de una ciudad. Las estaciones están ubicadas a distancias considerables de las fuentes pero continúan bajo su influencia. Algunos de los usos de los datos asociados con las mediciones de la escala media, tanto de gases como de partículas, incluyen la evaluación de los efectos de las estrategias de control para reducir las concentraciones urbanas y el monitoreo de episodios de contaminación ambiental.

3.1.3 Escala Vecindario / Local.

Las mediciones de la escala local caracterizan las condiciones sobre áreas con dimensiones que van desde 0.5 hasta 4 km^2 . Supone condiciones de homogeneidad en la parcela de aire correspondiente, por lo que no debe haber influencia significativa de alguna fuente en particular. Esta escala se aplica en áreas donde la tasa de aumento o disminución del gradiente de concentración de gases y de partículas es relativamente baja y en grandes secciones de pueblos y ciudades pequeñas, por ejemplo: principalmente áreas suburbanas en las cercanías de los centros urbanos. En general, estas áreas son homogéneas en términos de perfil de concentración. Las mediciones de la escala local pueden ser asociadas con concentraciones de línea de base en áreas de crecimiento proyectado y en estudios sobre respuestas de la población a la exposición a contaminantes, por ejemplo: efectos sobre la salud. Asimismo, los máximos de concentración asociados con episodios de contaminación atmosférica pueden estar distribuidos de manera razonablemente uniforme sobre áreas de escala local. Dependiendo de lo homologados que estén los métodos de medición, esta escala puede servir para hacer comparaciones de calidad del aire entre dos o más redes, satisfaciendo la mayoría de los objetivos de tomadores de decisiones.

3.1.4 Escala Urbana.

Las mediciones a escala urbana caracterizan las condiciones sobre un área metropolitana entera. Para alcanzar una cobertura de escala urbana se requiere más de un sitio de medición. Las áreas donde se ubiquen las estaciones deben representar condiciones homogéneas, a fin de abarcar un radio amplio. Tales mediciones son útiles para calcular las tendencias de la calidad del aire en toda una ciudad y, por ende, para la eficacia de las estrategias de control de contaminación a gran escala. Las mediciones que representan áreas que abarcan toda una ciudad también sirven como base válida para hacer comparaciones entre diferentes ciudades.

3.1.5 Escala Regional.

Las mediciones de escala regional representan las condiciones sobre áreas con dimensiones de cientos de km². Estas mediciones se aplican principalmente a grandes áreas homogéneas, particularmente aquellas que están escasamente pobladas. Tales mediciones proporcionan información de fondo/base acerca de la calidad del aire y del transporte de contaminación entre regiones.

3.1.6 Escala Nacional / Global.

Esta escala de medición representa concentraciones que caracterizan a toda una nación o al mundo como un todo. Tales datos son útiles en la determinación de las tendencias de contaminantes, el estudio de los procesos de transporte de los mismos, tanto a nivel nacional como internacional, y la evaluación de los efectos de las políticas de control a escala global.

3.2 Información básica para el diseño de redes.

La información que debe ser considerada para llevar a cabo el diseño de una red de medición de la calidad del aire dependerá en gran medida de los objetivos establecidos. Sin embargo, existe información que debe ser considerada en la planeación y diseño de una red. Esta información se describe a continuación (Adaptado de US-EPA, 2008; OMS-CEPIS, 2004; y NZ, 2009).

3.2.1 Epidemiología y exposición de la población.

Es común que la decisión de iniciar un programa de medición de calidad del aire surja de quejas de la población, las cuales son en muchos casos causadas por molestias debido a olores ofensivos o polvo en exceso.

El origen y distribución geográfica de las quejas, su tipo y cantidad pueden contribuir

al diseño de una red. Además de esto, como apoyo para la selección de los sitios de medición también es útil coleccionar información sobre el daño que sufren las plantas, animales y materiales en las distintas áreas.

La información referente a la distribución de la población dentro de un área es necesaria particularmente cuando, dentro de los objetivos está evaluar la exposición humana a los contaminantes.

Cuando se realizan estudios epidemiológicos, por lo regular la evaluación de la calidad del aire se efectúa en un cierto número de áreas residenciales con diferencias significativas en los niveles de contaminación. Adicionalmente, para conocer el grupo de personas afectadas, es necesario contar con información socioeconómica y demográfica de la localidad afectada: género, edades, condiciones socioeconómicas de la población, entre otros.

3.2.2 Programas existentes de medición de calidad del aire.

Aún cuando no exista un programa formal de medición de la calidad del aire, a menudo es posible contar con información de estudios especiales efectuados por el sector salud, por dependencias ambientales, por el servicio meteorológico, por instituciones de educación superior, investigadores o aún por estudiantes que preparan tesis sobre el tema. Reuniendo esta informa-

ción se puede obtener una primera estimación de la magnitud del problema. Sin embargo, se debe ser precavido con el uso de esta información debido a la variedad de procedimientos de medición que pudieron haber sido utilizados.

3.2.3 Inventarios de emisiones.

Los inventarios de emisiones son elaborados o actualizados a partir de la información concerniente a las fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos en un área geográfica dada. Las principales fuentes de emisión en un desarrollo urbano incluyen generalmente las plantas industriales de todo tipo, los vehículos con motor de combustión interna, las plantas de energía, incineradores y equipos de calefacción. En la información se deberá incluir la cantidad, tipo, tamaño y localización de cada fuente y se complementará con datos sobre clases y cantidades de combustibles utilizados, así como de su composición (azufre, cenizas y contenido de elementos traza). En algunos casos es posible obtener el total local, regional y nacional en algunas publicaciones del sector correspondiente.

Los combustibles para uso de fuentes fijas deben tratarse por separado de los dedicados a la transportación. Para la elaboración de un inventario de emisiones se aplican metodologías previamente establecidas, las cuales están disponibles a través de dependencias ambientales, en México y en el mundo.

3.2.4 Actividades en la zona.

Las actividades en la zona pueden conocerse a partir de estadísticas y censos, tanto de población como industriales y, desde luego, mediante recorridos de campo. De las actividades en la zona depende básicamente el tipo de red que se debe instalar. Por ejemplo, si la actividad primordial es la industrial la medición se debe enfocar a este tipo de contaminantes; si es una zona puramente residencial se deben medir los contaminantes provenientes de emisiones vehiculares, de comercios y servicios.

3.2.5 Información meteorológica.

La información meteorológica es fundamental para establecer un diagnóstico de la calidad del aire en una localidad determinada, por lo que se recomienda establecer contacto con los servicios meteorológicos de la zona de estudio.

Es importante decir que los propósitos del servicio meteorológico pueden estar enfocados a otros que el de medir la calidad del aire, como: pronósticos del clima, apoyo al tráfico aéreo y servicios a la agricultura e hidrología. En este sentido, a pesar de que en algunos casos se pueda contar con información meteorológica, no siempre se podrá contar con información relacionada a la contaminación del aire.

Los servicios meteorológicos locales tienen comúnmente información general acerca de las condiciones climáticas del área en cuestión. La dirección y velocidad del viento y las variaciones de temperatura en función de la hora del día y de la estación del año, son los parámetros usualmente medidos.

Otros datos que se pudieran conseguir y serían útiles para un diagnóstico de la calidad del aire son la precipitación pluvial, períodos de insolación, humedad relativa y absoluta, así como la potencial formación de nieblas.

En la medida de lo posible, sería útil obtener información sobre gradientes de temperatura y la relativa a la frecuencia y a la altura de la capa de mezclado.

3.2.6 Información topográfica.

La topografía es un factor importante en la selección de los sitios de monitoreo por el efecto de ésta sobre los vientos locales y las condiciones de estabilidad. Hay muchos desarrollos urbanos y/o industriales que se han asentado en valles donde las condiciones favorecen la formación de inversiones térmicas, las cuales dificultan la dispersión de los contaminantes. Las ciudades construidas en terrenos accidentados presentan variaciones sustanciales de las concentraciones dentro del área urbana. En general, mientras más complejo sea el terreno se necesitarán más sitios de medición. Las montañas, los lagos y los océanos son otros aspectos geográficos que afectan la dispersión de los contaminantes.

4. SELECCIÓN DE ZONAS PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

En la selección de una zona de medición de calidad del aire, en primer lugar se debe considerar el cumplimiento de los objetivos de medición (Manual 1). Sin embargo, se ha visto que debido a limitaciones tanto presupuestales como de tiempo, es prácticamente imposible colocar un número muy grande de estaciones en una zona determinada.

Por consiguiente, es necesario estimar la distribución de concentraciones en toda la localidad que vaya a ser estudiada, llevando a cabo una cantidad limitada de mediciones o bien por medio de una simulación, aunque siempre será necesario especificar la representatividad de cada estación.

Existen diferentes metodologías de selección de los sitios en donde se deben de instalar las estaciones de medición, que van desde la elaboración de una cuadrícula del área de estudio, hasta el uso de complejos modelos estadísticos que nos proporcionan el número y distribución óptima de las estaciones, pero que dependen estrechamente de la cantidad de información con la que se alimenta el modelo (Martínez, 1997).

Cabe mencionar que en ocasiones no se cuenta con la información suficiente, por lo que la experiencia y conocimiento del área se convierte en un factor de igual importancia. Además de que los resultados de ubicación obtenidos por medio de estas metodologías, muchas veces tienen que cambiarse debido a la falta de infraestructura (disponibilidad de agua, energía eléctrica, etc.), inseguridad o difícil acceso del sitio seleccionado.

En la siguiente sección se describe cómo se determina distribución de concentraciones de contaminantes de una zona, para que posteriormente se pueda establecer el número de sitios de medición en el diseño de una nueva red, y/o realizar una evaluación de la cobertura de una red ya existente.

4.1 Determinación de la distribución de concentraciones de contaminantes.

Conocer la distribución de concentraciones de contaminantes es sumamente importante para establecer una zona de estudio y ubicar dónde y cuántas estaciones de medición de la calidad del aire habrán de integrar la red. A continuación se enlistan y describen algunas metodologías para realizar esta actividad.

- Medición simplificada.
- Simulación.
- Muestreo a juicio.
- Muestreo aleatorio simple.
- Muestreo sistemático.
- Muestreo estratificado.
- Traslape de información.

4.1.1 Medición simplificada.

La medición simplificada se basa en el uso de muestreadores pasivos. Éstos son dispositivos portátiles y de bajo costo, que son muy adecuados para determinar concentraciones de línea base, así como para evaluar exposiciones personales y ambientales en tiempos que van de un día a dos semanas, o inclusive hasta un año, en función del proyecto y los objetivos de medición de que se trate. En condiciones controladas es posible determinar concentraciones en tiempos muy cortos (hasta de ocho horas) o muy largos, hasta de un año. En una zona de estudio donde el número de estaciones sea muy pequeño, los datos obtenidos por medición simplificada se usan para verificar los resultados de un modelo de simulación.

La medición simplificada se basa en una estrategia de saturación utilizando los muestreadores pasivos, los cuales colectan un contaminante específico por medio de su adsorción y/o absorción en un sustrato químico seleccionado, el cual es analizado posteriormente para conocer su concentración. Como ya se mencionó, el tiempo de exposición de un muestreador pasivo se limita a períodos de tiempo establecidos en función del objetivo. Por lo tanto, es prácticamente imposible obtener el comportamiento temporal del contaminante a menos que se diseñe un estudio que implique el cambio de los muestreadores en función de variaciones estacionales; además de que solamente se pueden obtener

concentraciones promedio. Este método se sugiere para estimar o comprobar la distribución de la concentración de un contaminante, para verificar la precisión del modelo de simulación y para su uso en zonas donde las condiciones ambientales a lo largo del año no presenten grandes variaciones y su topografía sea relativamente llana. Los contaminantes estimados con esta técnica son: NO₂, SO₂, NH₃, VOC's y O₃.

4.1.2 Simulación.

Para estimar la distribución de las concentraciones de los contaminantes con este método, es necesario contar como mínimo, con el inventario de emisiones y con la información meteorológica del lugar (dirección y velocidad del viento así como los parámetros relacionados con la estabilidad atmosférica).

La aplicación de un modelo de simulación requiere del desarrollo de trabajos específicos por personal capacitado para el procesamiento de la información e inversión de tiempo y presupuesto necesario. La ventaja de esta metodología es la flexibilidad para elegir libremente sobre el impacto de fuentes en particular e inclusive ponderar aquellas que aún no existen.

Esta metodología consiste en dividir la zona de estudio en cuadrículas de igual tamaño. Como se muestra en la Figura 1, los datos meteorológicos

4.1.3 Muestreo a juicio.

y los de las fuentes de emisión son procesados y acondicionados al formato de entrada requerido por el modelo. Estas funciones son desempeñadas por el procesador meteorológico y el procesador de fuentes de emisión. Como ejemplo de motor analítico o modelo de simulación se pueden usar modelos de dispersión como el modelo híbrido ISC-ST3-PUFF (variante del modelo original que incluye un módulo para la simulación en condiciones de velocidad del viento en calma), ya que se ha comprobado en forma efectiva su funcionamiento para la selección de sitios de medición de contaminantes primarios. La Figura 1 muestra la estructura básica de una simulación.

En el muestreo a juicio, un experto conocedor del sitio o del proceso designa dónde y cuándo se deben tomar las muestras. Este tipo de muestreo deberá considerarse cuando los objetivos del estudio no sean de naturaleza estadística, por ejemplo, cuando el objetivo sea estudiar contaminantes de fuentes de emisión específicas, cuando el estudio se enfoque a recolectar muestras de alguna localidad previamente seleccionada o cuando se conozcan las fuentes de emisión y los sitios receptores, ajustados por medio de modelos de dispersión. Este método también se conoce como método orientado a fuentes. Generalmente este muestreo se aplica en la recolección de muestras individuales. Cuando se utiliza en muestreos de saturación puede llevar a conclusiones erróneas.

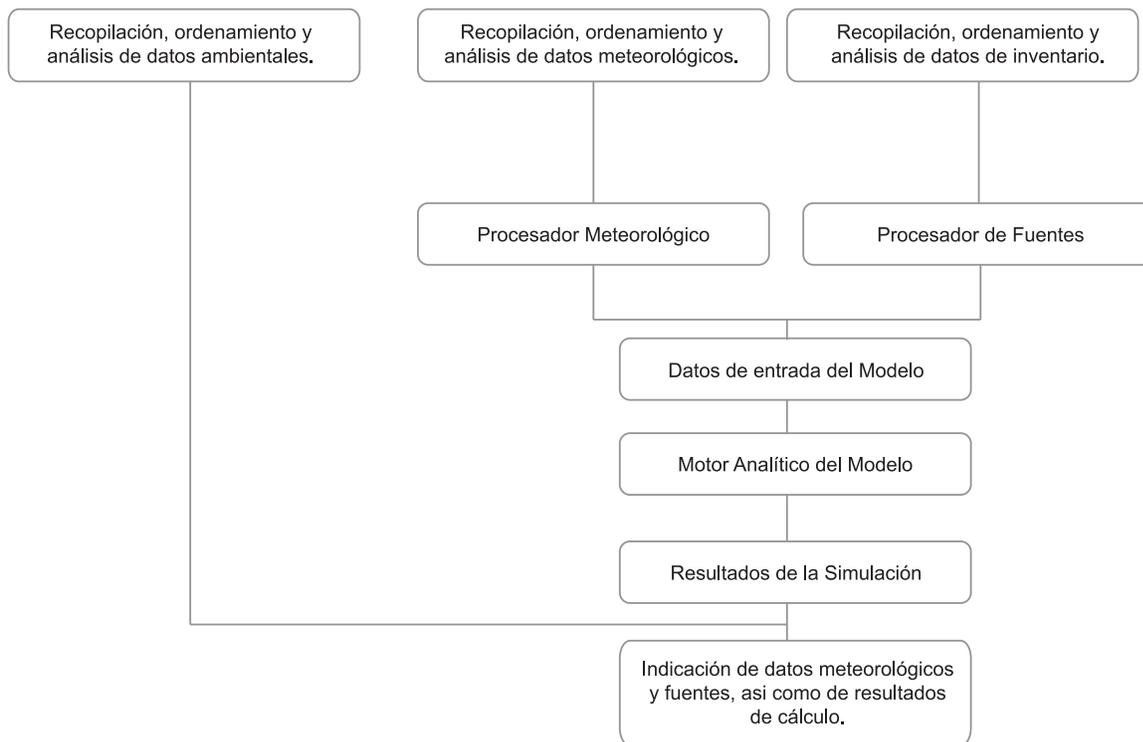


Figura 1. Estructura básica de una simulación.

4.1.4 Muestreo Probabilístico

Es importante definir la cantidad y ubicación de estaciones que debe tener la red de medición de la calidad del aire, para así hacer la representativa de la zona de estudio.

Cuando el objetivo del estudio considere un estimador para toma de decisiones se debe utilizar un muestreo probabilístico, el cual puede combinarse con el conocimiento del experto para el proceso de selección del sitio y frecuencia de muestreo (Cochran, W. G., 1995). La Figura 2 presenta los tipos de muestreo más utilizados para el diseño de redes.

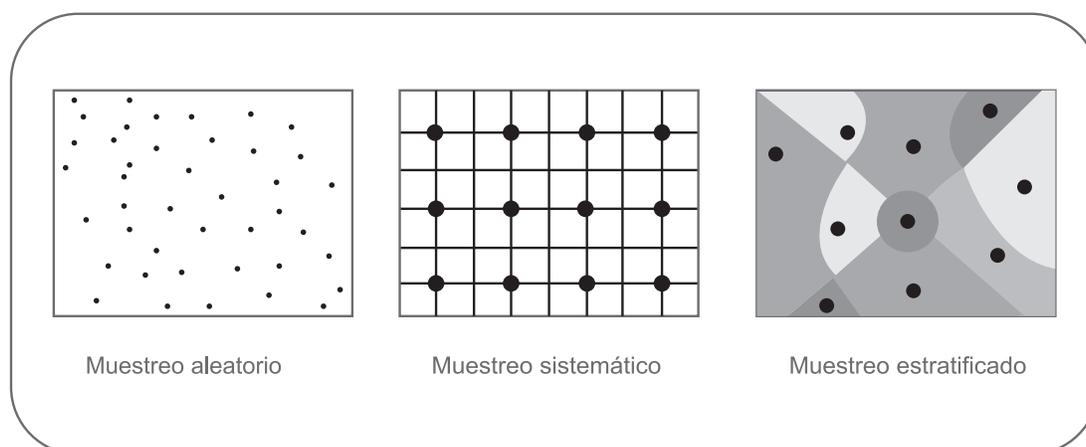


Figura 2. Tipos de muestreos utilizados para la selección de puntos de recolección de datos ambientales.

4.1.4.1 Muestreo aleatorio simple.

Es un método de selección de muestras (n) de una población finita (N) sin considerar la ubicación de las fuentes de contaminación de modo que cada una de las muestras tenga la misma oportunidad de ser elegida. El área de estudio o dominio debe dividirse en formas geométricas iguales o celdas y se numeran ordenadamente desde

$n=1$ hasta N . Posteriormente se extrae una serie de n números aleatorios entre 1 y N , ya sea utilizando una tabla de números aleatorios o a través de un programa de computación que produzca una tabla semejante. En cada extracción, el proceso debe dar la misma oportunidad de selección a todos y cada uno de los números que no hayan salido.

4.1.4.2 Muestreo sistemático.

En este método de muestreo se establece el mismo dominio que en el muestreo aleatorio simple, es decir, dividiendo el área de estudio en celdas de igual tamaño. Para elegir las celdas donde se colocarán los equipos de muestreo se toma la primera al azar y las subsecuentes a intervalos de k , donde k es igual al número total de celdas dividido por el número de equipos disponibles para el muestreo. El equipo de muestreo se coloca en el centro de la celda seleccionada. Así, por ejemplo si k es igual a 15 y la primera unidad que se extrae es la número 13, entonces las subsecuentes celdas donde se colectará la muestra serán 28, 43, 58. La selección de la primera celda determina la ubicación de las demás. Se sugiere la aplicación de este método en terrenos llanos con fuentes puntuales grandes.

4.1.4.3 Muestreo estratificado.

En el muestreo estratificado, el dominio se divide primero en subpoblaciones o estratos, sin que se traslapen y que en su conjunto comprende todo el dominio. Una vez deter-

minados los estratos se extrae una muestra de cada uno. Las extracciones deben hacerse de forma independiente en los diferentes estratos. Tanto para la selección de los estratos como para la selección de los sitios de muestreo se puede hacer uso de las técnicas de muestreo mencionadas anteriormente.

Por ejemplo, si se toma una muestra aleatoria simple en cada estrato el procedimiento total se conoce como un muestreo aleatorio estratificado. Con este tipo de muestreo se asegura una cobertura uniforme de la población principalmente cuando las características de los estratos son particulares.

4.1.5 Traslape de información.

Los sitios de medición localizados a través de esta metodología se conocen como sitios orientados. El método requiere de bastante información sobre el área de estudio y se aplica a través de los siguientes pasos:

- Localización de las fuentes de emisión y asentamientos poblacionales. Los mapas más utilizados son los de usos del suelo. La clasificación debe comprender las categorías de uso comercial, residencial, industrial, agrícola o de conservación. También los mapas de densidad de población permiten determinar las áreas de mayor exposición. La sobreposición de estos mapas ayuda a localizar cuáles son los asentamientos próximos en áreas donde se registran la mayor parte de las emisiones industriales.

- Identificación de patrones meteorológicos. Se requieren mapas de dirección y velocidad del viento, temperatura vertical u otros patrones climáticos como niebla, lluvia y nevadas. Estos patrones permiten estimar la distribución del contaminante y hasta donde pueden llegar las emisiones viento abajo, además de predecir con cierto grado de error los niveles que los contaminantes pueden alcanzar en la atmósfera de la región. Por ejemplo, en la ZMVM la contaminación tiende a disminuir durante la temporada de lluvia o en los meses de vendavales. El manejo de la información sugerida en este punto y el anterior permite conocer cómo se distribuyen las emisiones en la atmósfera de la región y qué población está siendo afectada. Éste es un primer acercamiento para localizar los sitios de medición.

- Comparación de las concentraciones del contaminante. Esta información permite determinar la distribución espacial del contaminante e identificar los sitios de mayor concentración. La información puede obtenerse de mediciones previas del contaminante o de documentos científicos. Cuando no haya información disponible se puede hacer uso de las concentraciones de otros contaminantes que provengan de fuentes de emisión similares. Con ello se pueden localizar sitios representativos del comportamiento del contaminante en espacio y tiempo.

4.2 Selección del Número de Sitios de Medición.

Una vez obtenida la distribución de concentraciones, por cualquiera de las metodologías descritas en el punto anterior, es necesario dividir la zona nuevamente, esta vez en base a la distribución de concentraciones del contaminante a medir, con el fin de obtener el número óptimo de sitios de medición.

Hay varias técnicas que se pueden aplicar; en este punto se presenta la técnica de división por el mismo nivel de concentraciones que es la más sencilla y la más utilizada. Consiste en trazar líneas de nivel de concentración (isopletas) con un determinado gradiente (ΔC) para distribuir las concentraciones de la zona, tomando como área la porción encerrada por la línea de un mismo nivel.

Para realizar esta división se debe considerar lo siguiente:

- La concentración que constituye el punto de partida tendrá el valor máximo previsto para la zona.
- Una porción, aunque se encuentre encerrada por la línea de un mismo nivel, será considerada como dos distintas si no tiene fragmentación.

El gradiente (ΔC) será determinado por los valores máximo y mínimo de la distribución de concentraciones de la zona. La Figura 3 muestra un ejemplo del resultado de la división por simulación (en las áreas de A a G).



Figura 3. Resultado de la ubicación de estaciones por medio de simulación.

Si las áreas divididas de esta manera presentan una forma compleja o son demasiado extensas será necesario subdividir las, La subdivisión en forma de faja de las áreas puede ser utilizada para tal propósito.

En esta subdivisión se forma un área anillada de ancho menor que unos tres recuadros, con cinco recuadros centrales que constituyen un área distinta, siendo el largo de la circunferencia al menos cinco veces más grande que el ancho.

Para determinar el número de áreas subdivididas se puede utilizar el concepto de dosis de área resultante (DAP, Dose Area Product).

$$D.A.P = (\text{Sup. habitable en el área [km}^2]) (\text{Mediana de la concentración del área [ppb]})$$

Se realiza el cálculo del número de áreas subdivididas basándose en el valor de D.A.P de cada área. Si el D.A.P de un área es inferior al D.A.P estándar por estación mostrado en la Figura 3.4 la subdivisión no será necesaria. Si es más grande, se hará el cálculo tomando como referencia lo siguiente:

$$\text{Número de áreas subdivididas} = D.A.P \text{ del área} / D.A.P \text{ estándar (redondear)}$$

De esta manera se obtienen el número de áreas subdivididas aunque no existe una metodología clara para realizar la subdivisión de manera concreta. Para ello, se deben tomar en consideración los siguientes criterios:

- ¿No estará fragmentada el área por condiciones topográficas?
- ¿En qué grado influyen los océanos, lagos y pantanos?
- ¿En qué grado influyen las fuentes emisoras de los alrededores?
- ¿Cuál será la densidad poblacional y la proporción del casco urbano?
- ¿Cuál será la dirección del viento dominante por temporada?

La Figura 4 muestra un ejemplo de la subdivisión de la zona por simulación. El área C está subdividida en C1, C2, C3, y la E en E1, E2, E3.

E ₁	E ₁	C ₁	A	A	B	B	C ₃	C ₃	D	D	D	D	D
E ₁	E ₁	C ₁	A	A	A	B	C ₃	C ₃	D	D	D	D	D
E ₁	E ₁	C ₁	A	A	B	B	C ₃	C ₃	D	D	D	F	F
E ₁	E ₁	C ₁	A	B	B	B	C ₃	C ₃	D	D	F	F	F
E ₁	E ₁	C ₁	C ₁	C ₂	C ₂	C ₂	C ₂	D	D	F	F	F	F
E ₁	E ₁	E ₁	C ₁	C ₂	C ₂	C ₂	C ₂	D	D	F	F	F	F
E ₁	E ₁	E ₁	E ₂	E ₂	C ₂	E ₃	E ₃	D	D	F	F	F	F
E ₂	E ₃	E ₃	E ₃	E ₃	G	G	G	G	G				
E ₂	E ₃	E ₃	E ₃	E ₃	G	G	G	G	G				
E ₂	E ₃	E ₃	E ₃	E ₃	G	G	G	G	G				
E ₂	E ₃	E ₃	E ₃	E ₃	G	G	G	G	G				

Figura 4. Ejemplo de subdivisión y corrección de áreas.

Generalmente, las áreas representativas en la ubicación de estaciones de monitoreo de cada contaminante presentan distribuciones bastante diferentes. Aunque no sería imposible instalar las estaciones por separado en las áreas representativas, no es aconsejable, ya que se requiere mucho trabajo para asegurar el lugar de instalación y también aumenta tanto la complejidad del mantenimiento y control como los gastos. Además, el nivel de fondo de las concentraciones monitoreadas

sería distinto. Por lo tanto, en la medida de lo posible, se deberán hacer ajustes para que las estaciones de monitoreo para diferentes contaminantes se instalen en un mismo punto y para que su ubicación permita cubrir toda el área con el menor número posible de estaciones.

La Figura 5 presenta un ejemplo del ajuste de las áreas correspondientes a SO₂ y NO₂. La zona objeto queda dividida en cinco áreas en el caso de SO₂, del lado izquierdo y en cuatro áreas para el NO₂, a la derecha, por lo que el número de estaciones necesarias sería de 5 y 4, respectivamente, si se consideran por separado estos contaminantes. La figura inferior se refiere al resultado del ajuste de las estaciones con el fin de que sea cubierta la mayor extensión posible de áreas para ambos. El número definitivo de estaciones sería de cinco que se encargarían de monitorear SO₂ y NO₂ a la vez.

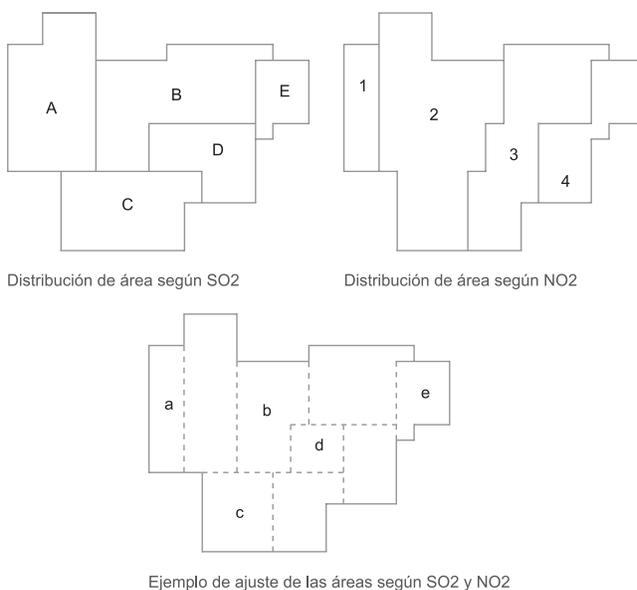


Figura 5. Ejemplos de ajuste de áreas para SO₂ y NO₂.

4.3 Evaluación de la Ubicación de Estaciones de Medición de Calidad del Aire.

Una vez obtenido el número óptimo de sitios de medición, así como su probable ubicación, es indispensable considerar algunos aspectos en base al tipo de estación que se proyecte instalar, es decir, en base a los contaminantes que ésta medirá o a las fuentes a la que esté orientada.

4.3.1 Estaciones de medición para SO_2 y NO_2 .

En principio se establecen las estaciones en las áreas comunes representativas de SO_2 y NO_2 que han sido ajustadas conforme a lo observado en la Figura 5.

Si no hay estaciones en las áreas correspondientes, se debe instalar una en el centro de las áreas representativas. En caso de que sea imposible instalar estaciones en todas las áreas representativas, debido a las limitaciones presupuestales y de tiempo, se da prioridad a las estaciones de medición de niveles de fondo de viento abajo (ver sección 4.3.4).

Si existen dos o más estaciones, se podrían identificar aquellas que se juzgen como innecesarias en el caso de que sus áreas representativas sean compartidas. En cambio, si el número de estaciones es pequeño, algunas áreas podrían no estar cubiertas por las estaciones existentes, por lo que surge la necesidad de es-

tablecer nuevas estaciones. Si existe una estación en el área representativa, ésta continuará operando. Si existen dos o más, se conservará la más representativa, y habrá que aplicar una metodología para la reubicación de las estaciones restantes o redundantes (ver Sección 4.4).

Aunque, antes de determinar el cierre o reubicación de una estación, se deberá evaluar si ésta detecta eventos extraordinarios en la medición, que las demás no lo hacen; en este caso, es recomendable su permanencia. Si no corresponde a ninguno de estos casos se deberá determinar si se mantiene en operación, a fin de continuar alimentando la base de datos histórica del sitio.

Si no se justifica su permanencia, a pesar de todo lo mencionado, deberá ser candidata para su reubicación o cierre.

4.3.2 Estaciones de medición para O_3 .

Cuando existe NO en el aire, éste reacciona rápidamente con el O_3 convirtiéndose en NO_2 . Por consiguiente, se debe tener cuidado al efectuar el monitoreo en lugares de alta concentración de NO proveniente de procesos de combustión. Debido a las particularidades del principio de medición, se miden siempre los NO y NO_2 al mismo tiempo. En términos generales, la concentración de O_3 abarca áreas extendidas y la permanencia local de la concentración medida depende en gran parte de la presencia de NO. Por este motivo, es recomendable medir la concentración de O_3 simul-

táneamente en las estaciones representativas de NO₂. Al tomar en cuenta las características de la distribución de concentraciones de O₃ no será necesario que la densidad de estaciones en el área sea tan alta como la de las estaciones para la medición de SO₂ y NO₂.

4.3.3 Estaciones de medición para partículas y otros contaminantes.

No se ha establecido un método eficaz para ubicar de manera adecuada las estaciones para medir la concentración de partículas, ni de otros contaminantes (HC, COV, BTX, COP, entre otros) dado que su ubicación depende de la distribución de las fuentes de emisión y del proceso de formación de estos contaminantes. Para estos casos, las estaciones de medición de SO₂ y NO₂, además de las estaciones de medición de emisiones de fuentes móviles (ver sección 4.3.5), también pueden considerar la medición de éstos contaminantes.

4.3.4 Estaciones de Medición de Niveles de Fondo.

Una estación de medición de niveles de fondo es aquella que se instala a las afueras de la ciudad para estudiar el comportamiento de los contaminantes, mediante la medición de sus concentraciones y sus trayectorias (transporte contaminantes determinada por la velocidad y dirección del viento).

En el diseño de una red de medición de calidad del aire es indispensable incluir las estaciones de medición de niveles de fondo. Si sólo se puede instalar una estación de medición en la zona, será necesario ubicarla en la dirección del viento dominante (viento abajo), de manera que desempeñe ambas funciones, tanto para medir concentraciones de fondo, como de calidad del aire.

Dependiendo de las características del área de estudio, se recomienda que las estaciones de medición de niveles de fondo se coloquen fuera de la zona de influencia de las emisiones, de la siguiente manera:

- por lo menos a 50 km viento abajo y 10 km viento arriba de fuentes como ciudades de más de 100,000 habitantes, rellenos sanitarios y tiraderos de basura de estas ciudades, fuentes de combustión industriales (hornos de cemento, fundidoras, plantas termoeléctricas, refineras, entre otras) y pastizales;
- por lo menos a 10 km viento abajo y 4 km viento arriba de fuentes como ciudades de más de 15,000 habitantes pero menos de 100,000 habitantes, rellenos sanitarios y tiraderos de basura de estas ciudades y por lo menos a 500 m de caminos no pavimentados (para evitar la contaminación por partículas grandes).

4.3.5 Estaciones de Medición para Fuentes Específicas.

En general, las estaciones de medición las podemos orientar a medir fuentes determinadas para cumplir con los objetivos que se hayan establecido. En este particular, se han diferenciado dos tipos de fuentes específicas: las fuentes fijas (emisoras de SO_2 y NO_2) y las fuentes móviles (vehículos automotores). Ambos conceptos se describen a continuación.

4.3.5.1 Estaciones de Medición Orientadas Fuentes Fijas de SO_2 y NO_2 .

Para ubicar las estaciones de medición orientadas a fuentes fijas es preciso conocer, dentro de lo posible, las zonas de alta concentración del área de estudio. La generación de altas concentraciones de contaminantes por fuentes fijas suelen ser frecuentes y se reflejan en los promedios anuales de las mediciones realizadas por una red de medición.

En este sentido, sería suficiente conocer sólo concentraciones elevadas de corto tiempo, causadas por plumas de cierta altura (20 metros o más, por ejemplo). En este caso, para estimar los sitios donde aparecen altas concentraciones es conveniente utilizar el concepto de punto de concentración máxima (X_{max}).

Para calcular los puntos de concentración máxima se lleva a cabo una simulación por rango, de dirección y de velocidad del viento y por nivel de estabilidad atmosférica. Así se elige el punto de aparición de la concentración máxima

para ubicar la estación en el sitio más adecuado; aunque en ocasiones se requieren varias estaciones, según las circunstancias. En este proceso de análisis se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Pluma en momentos de calma o con viento suave;
- Pluma en presencia de una inversión térmica de superficie;
- Efectos topográficos sobre vientos locales.

4.3.5.2 Estaciones de Medición Orientadas a Fuentes Móviles.

Para determinar la ubicación de una estación orientada a la medición de emisiones de fuentes móviles se debe caracterizar la vía y la flota vehicular que circula sobre ella. Esto es: identificación del aforo vehicular, características de los vehículos circulación, porcentaje de circulación de vehículos pesados, características de la vía (número y ancho de carriles, existencia de banqueta y, en su caso, su ancho, si es una vía elevada, túnel, vía terraplenada, paso elevado, subterráneo, o pendientes en subida o bajada.), entre otros.

Una vez caracterizada la vía, ésta se divide en secciones, según sus características y se eligen los sitios para colocar las estaciones de medición, los cuales deben estar a las orillas de los tramos seleccionados. Es importante mencionar que cuando dos vías distintas que pertenezcan a un mismo tipo de tramo, éstas deben ser representadas como uno solo.

4.4 Análisis de Cierre o Reubicación de Estaciones.

En caso de que ya existan estaciones de medición de la calidad del aire en la zona de estudio, se podrían utilizar algunas metodologías para determinar su cierre o su reubicación. Una de ellas puede ser el Análisis Clúster o Conglomerados², el cual correlaciona la información histórica de las estaciones para obtener la similitud entre valores medidos (Johnson, 1982). Con el análisis Clúster se verifica si los puntos con alta correlación caen en una misma división o no, lo cual ayudará a clasificar las estaciones. Este procedimiento intenta identificar estaciones homogéneas por los datos medidos, basándose en características seleccionadas o identificadas. Los grupos formados mediante este análisis representan estaciones de monitoreo midiendo la misma información.

En la Figura 6 se muestra el dendograma de un análisis Clúster. El eje horizontal constituye las estaciones (de A a la H) y el vertical el coeficiente de correlación³

Supongamos que la posición 30 representa el valor 0.7, el cual para este caso decimos que representa una fuerte correlación. Así, al cortarse en la línea del 30, las estaciones podrán ser clasificadas en cinco grupos (A-C-B, D-F, E, G, H). Entonces concluimos, en el caso de los grupos A-C-B y D-F que dos o más estaciones tienen la posibilidad de reubicación o cierre ya que son homogéneas, quedando con una sola estación por grupo.

2 En el paquete estadístico SPSS este análisis se refiere a la técnica de Análisis Multivariante conocida como Análisis de Conglomerados.

3 Mide la relación lineal entre dos variables, existen diversos coeficientes que miden el grado de correlación, adaptados a la naturaleza de los datos. El más conocido es el coeficiente de correlación de Pearson (introducido en realidad por Francis Galton), que se obtiene dividiendo la covarianza de dos variables por el producto de sus desviaciones estándar. El valor del índice de correlación varía en el intervalo $[-1, +1]$, cuando el valor está entre 0 y 1 se dice que existe una correlación positiva, y si es 1 se dice que existe una correlación positiva perfecta. Así que mientras la correlación se acerca al valor 1, entonces se va acercando a una correlación perfecta.

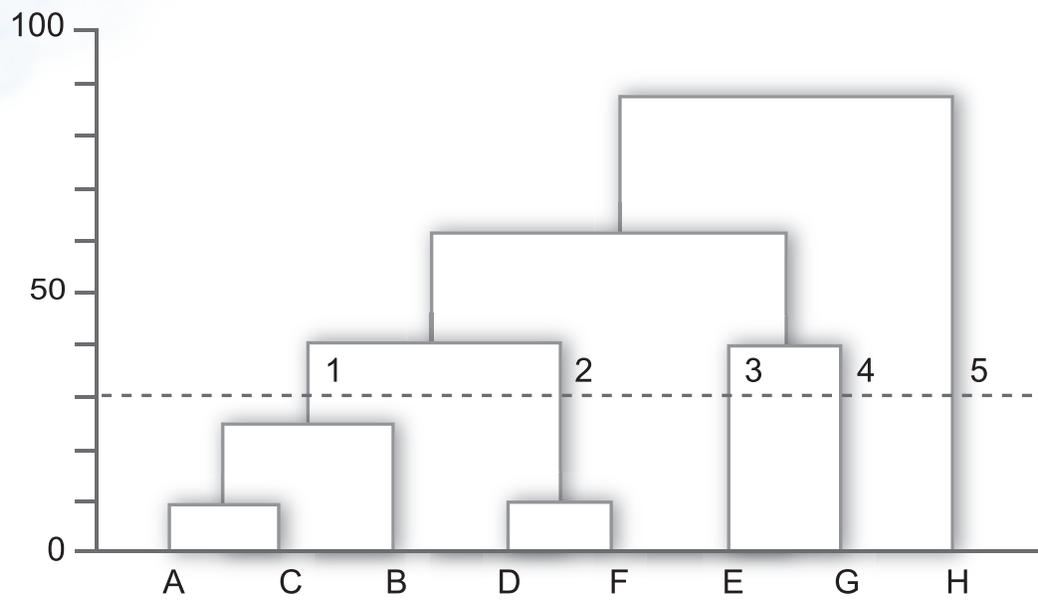


Figura 6. Dendrograma de un análisis Clúster.

5. ESTACIONES DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

Una estación de medición de la calidad del aire consiste en una caseta que contiene diversos equipos destinados a medir las concentraciones de uno o más contaminantes del aire y ciertos parámetros meteorológicos.

5.1 Clasificación de estaciones de medición de la calidad del aire

Las estaciones de medición pueden clasificarse de acuerdo a distintos parámetros. En este documento se mencionan las clasificaciones por su operación y por su movilidad, las cuales se describen a continuación.

5.1.1 Clasificación de estaciones por tipo de operación

Estaciones manuales.

Normalmente, en estas estaciones, después de llevar a cabo el muestreo de los contaminantes, la muestra es trasladada a un laboratorio para su análisis. La toma y el manejo de muestra son etapas fundamentales en el sistema de medición de este tipo de estación, ya que de ella depende la exactitud y la precisión de las mediciones, y para que la medición sea confiable se requiere que la muestra se transfiera inalterada al laboratorio.

Las mediciones realizadas con métodos de integración⁴ producen información de un período total de exposición (por ejemplo, 24 horas), pero están limitados en la resolución temporal.

El muestreo intermitente se emplea para evaluar patrones diurnos/nocturnos o patrones con una componente temporal de corto, mediano o largo plazo.

En las primeras estaciones manuales se muestreaban varios contaminantes (bióxido de azufre, oxidantes y partículas suspendidas totales) gracias a que la mayor parte de las técnicas existentes eran relativamente sencillas y económicas. En la actualidad, los analizadores automáticos de gases constituyen los únicos métodos aceptados y sólo las partículas (PST, PM₁₀ y PM_{2.5}) continúan siendo medidas por métodos manuales; aunque es importante mencionar que también existen métodos automáticos y que éstos son utilizados cada vez más.

Estaciones automáticas.

Las estaciones automáticas, como su nombre lo indica, son aquellas que se encuentran integradas con por equipo de medición automático y continuo.

⁴ Un método de integración es un muestreo secuencial en el cual se toman varias muestras, cada una con un medio (filtro, material absorbente o adsorbente), en periodos de tiempo determinados, los cuales se pueden sumar para obtener un resultado integral.

Estaciones mixtas.

Como ya se comentó, en la práctica se recomienda el uso combinado de muestreadores (de partículas) y analizadores automáticos (de gases). Por lo que hablar de una estación mixta es hablar de una integración de equipos manuales y automático.

5.1.2 Clasificación de estaciones de medición de la calidad del aire por su movilidad.

Estaciones Fijas.

Las estaciones se consideran fijas cuando los equipos de medición son colocados al interior de un inmueble de construcción permanente.

Estaciones Móviles.

Las estaciones móviles son casi siempre motorizadas o remolcables y se emplean, por lo general, para campañas temporales y trabajos prospectivos o de investigación. Otras aplicaciones que tienen son: ser auxiliares en caso de una falla en alguna estación fija o cuando se presentan casos de emergencia atmosférica.

5.2 Instalación de estaciones de monitoreo de la calidad del aire.

Además de las consideraciones para la ubicación de los sitios de medición de la calidad del aire, se deben tomar en cuenta otros criterios para la instalación de una estación de medición de la calidad del aire. Estos criterios se enfocan a las características físicas del espacio donde se habrá de instalar la estación, así como de sus alrededores.

En los siguientes cuadros se describen los criterios generales para la instalación de una estación de medición de calidad del aire, así como los criterios para la instalación de una estación orientada a fuentes móviles y los criterios de una estación de fondo.

- Evitar condiciones topográficas y meteorológicas que no sean representativas de la zona.
- Evitar su colocación a la orilla de un río, ya que se generan corrientes de aire descendentes.
- Evitar su instalación en la cima de un monte, collado o valle, porque se producen vientos locales.
- Que no haya edificios ni bardas alrededor de la estación, a fin de que el perímetro de la toma de muestra quede libre.
- Seleccionar un sitio en el cual no existan corrientes de aire que propicien la acumulación de polvo y basura en el entorno de la estación.
- Evitar la presencia de árboles ya que existe absorción de los contaminantes por las ramas u hojas.
- Seleccionar un lugar donde las corrientes de aire características de la zona no sean afectadas por obstáculos, aún en el caso de un área urbana con edificios altos y medianos.
- Que la estación no sea afectada de manera determinante por alguna fuente específica de emisión fija (incinerador, chimenea de caldera, gasolinera, basurero, estacionamiento, laboratorio químico, cocina, sanitario, establo, torre de enfriamiento, orificio de succión y emisión, fuente de vibración, volcán, aguas termales, entre otros.).
- Será necesario guardar una determinada distancia a las calles, para evitar el impacto directo de las emisiones vehiculares.
- Que sea mínima la dispersión de polvo fino proveniente de calles de gravilla o tierras de cultivo.
- Que no sea afectada por la destrucción o inundación ocasionada por desastres naturales como huracanes o temblores.
- Que el sitio donde se va a ubicar la estación de monitoreo cuente con buen drenaje.
- Que no sea afectado por actos de vandalismo.

Cuadro 3. Consideraciones para la instalación de una estación de medición de calidad del aire

- No establecer dentro de una zona donde se desarrollen actividades que no sean las de transporte vehicular, como industriales, de servicio o residencial.
- Que se ubique a menos de 10 metros desde la orilla de la calle.
- Colocar en las principales calles o avenidas, así como en aquellas que presenten las características promedio de la zona urbana de estudio.
- En cuanto a los demás aspectos se harán las mismas consideraciones que en el caso de las estaciones de medición de la calidad del aire.

Cuadro 4. Consideraciones para la instalación de una estación orientada a fuentes móviles

- Tomar en consideración el impacto que se podría causar en el ecosistema, al colocar la estación.
- Que no haya árboles muy cercanos a la estación de monitoreo
- Que no sea afectada de manera importante por fuentes específicas de emisión, ya sea naturales o antropogénicas.
- Que no sea afectada, en lo posible, por eventos naturales como inundaciones, huracanes o sismos.
- Que el sitio donde se va a ubicar la estación de monitoreo tenga buen drenaje.

Cuadro 5. Consideraciones para la instalación de una estación de fondo

5.3 Instalación y operación de estaciones de monitoreo.

Consideraciones generales.

Las estaciones de medición de la calidad del aire pueden contar con equipos automáticos, remotos, semi-automáticos y manuales para medir los parámetros de calidad del aire. Los equipos utilizados en la operación rutinaria y para fines de reporte oficial deben ser aprobados o autorizados mediante un procedimiento oficial, documentado por las autoridades correspondientes u organismos internacionales encargados de la política ambiental.

Con el fin de uniformizar los requerimientos de una estación de medición, en cuanto a accesorios y equipos periféricos, el Cuadro 6 muestra los principales equipos auxiliares para la operación de una estación.

Actividad	Uso / Aspectos a considerar
Sistema de aire acondicionado	Para mantener la temperatura interna de la estación entre 18-20°C. Se debe tener cuidado con la dirección de la corriente de dicho aire para evitar que ésta no de directamente a los equipos de medición
Ventiladores o extractores.	Se deben considerar estos accesorios, como medida de seguridad, cuando se manejan gases tóxicos
Estante o gabinete	Para la colocación de los analizadores, el aire cero, el calibrador, el equipo de comunicación, computadora, entre otros.
Toma de muestra.	Es de un material especial para evitar reacciones. Se debe fijar a la pared con herraje metálico
Escritorio y estante.	Ayuda a que el operador realice algunas actividades cómodamente (reparaciones, llenado de formatos, preparación de muestras, etc.), además de que puede guardar algunos consumibles
Regulador de voltaje.	Protege a los equipos de medición de descargas eléctricas que pueden dañar sus componentes.
Monitor de gases explosivos.	Medidas contra explosión de gases (Instalar según la necesidad.)
Extintor	Para extinguir incendios dentro de la caseta

Cuadro 6. Equipos auxiliares de una estación de monitoreo

En el Cuadro 7 se señalan algunos criterios para el cuidado de los componentes de una estación se encuentran los siguientes:

- Reducir al mínimo la variación tanto del voltaje en la fuente de energía como de la frecuencia.
- Instalar los equipos de medición en forma horizontal para evitar su inclinación.
- Reducir la vibración proveniente del exterior de la estación de monitoreo.
- Reducir al mínimo la obsolescencia por causas climatológicas (a prueba de intemperie).
- Facilitar que el personal realice con seguridad las labores de mantenimiento y supervisión.
- Reducir al mínimo la generación de polvo y de gases corrosivos así como de humedad.
- Evitar que los equipos de medición entren en contacto directo con la lluvia.
- El balance de cargas eléctricas, esto es, el valor de consumo de energía por fase debe ser menor a 25 Amperes.
- Mantener la temperatura de la caseta entre 15 y 25°C. Estas condiciones deben ser las mismas al momento de la calibración.
- Conectar los equipos de medición a tierra. El valor proporcionado por el medidor debe ser menor a 15 ohm para las tierras eléctricas y de 7 ohm para las tierras electrónicas.
- Verificar los parámetros de operación de los equipos de medición al menos cada 15 días.
- Mantener limpias las conexiones y la toma de muestra.
- Realizar periódicamente pruebas de fugas a los equipos de medición.

Cuadro 7. Cuidados de los componentes de una estación.

5.4 Características funcionales y de construcción de las estaciones de monitoreo.

Las estaciones de medición están hechas con diferentes materiales de construcción (concreto, ladrillo o madera), resistentes y aislantes, que permiten el resguardo de los equipos. Durante su construcción se deben considerar los acabados generales como la instalación eléctrica, las puertas y el piso, además de otros que brinden seguridad a los técnicos. El Cuadro 8 muestra los acabados mínimos requeridos para la adecuada operación de una estación de medición.

Las estaciones deben tener espacio suficiente para que los técnicos realicen de manera adecuada las actividades de mantenimiento e inspección de los equipos. Se debe contar con un espacio para colocar los cilindros de gases y un área para el almacenamiento de manuales, procedimientos y documentación adicional. La Figura 7 muestra un arreglo típico para una estación de monitoreo.

El tamaño de la estación dependerá de los equipos de medición, consumibles y accesorios para realizar las actividades de operación, mantenimiento e inspección. El área recomendada es de 7 a 15 m² para poder alojar y soportar el tamaño y peso aproximado de los equipos y accesorios. Se recomienda que éstos se coloquen por lo menos a 80 cm de la pared posterior al equipo para poder realizar las actividades de conexión y revisión.

Accesorios	Uso (Aspectos a considerar)
Instalación eléctrica	Ésta debe ser de dos o tres fases y con aterrizaje a tierra física para tener un adecuado balance de las cargas eléctricas requeridas por los diferentes equipos de medición, de comunicación y periféricos.
Iluminación	La distribución de las lámparas debe permitir al operador ver la información de las carátulas de los equipos automáticos y de los paneles de control, así como la parte posterior del gabinete y las diversas conexiones. Según sea el caso, puede ser necesaria una iluminación a prueba de explosión.
Pararrayos	Instalar cerca de los tableros de distribución de energía y en la torre meteorológica, para evitar descargas de alto voltaje que dañen los equipos de medición.
Puerta	La puerta debe poder evitar el paso de polvo o de animales pequeños. Debe contar con chapa de seguridad para evitar robos o entrada de extraños. Debe tener iluminación en la parte exterior.
Escalera	Permite el acceso a los equipos instalados en la azotea. Puede ser de tipo marino siempre y cuando no sea muy alta.
Orificio de inducción de los cables de energía y meteorológicos	Permite introducir a la estación los cables de señales desde los sensores meteorológicos o cables de fuentes de energía eléctrica comercial instalados en la azotea
Niveladores (sólo para estaciones móviles)	Permiten ajustar horizontalmente la estación de monitoreo. Lo anterior se realiza para garantizar el buen funcionamiento de ciertos equipos, en especial los monitores de partículas, las bombas de succión, el aire acondicionado; y los sensores de velocidad y dirección de viento.
Anclas para tensores	Se utilizan para fijar la torre meteorológica
Barandal perimetral	Cuando se tengan equipos de medición en la azotea de la estación, se deberá colocar un barandal que delimite el perímetro de seguridad tanto para los equipos como para los operadores.

Cuadro 8 Acabados mínimos de una estación de monitoreo.

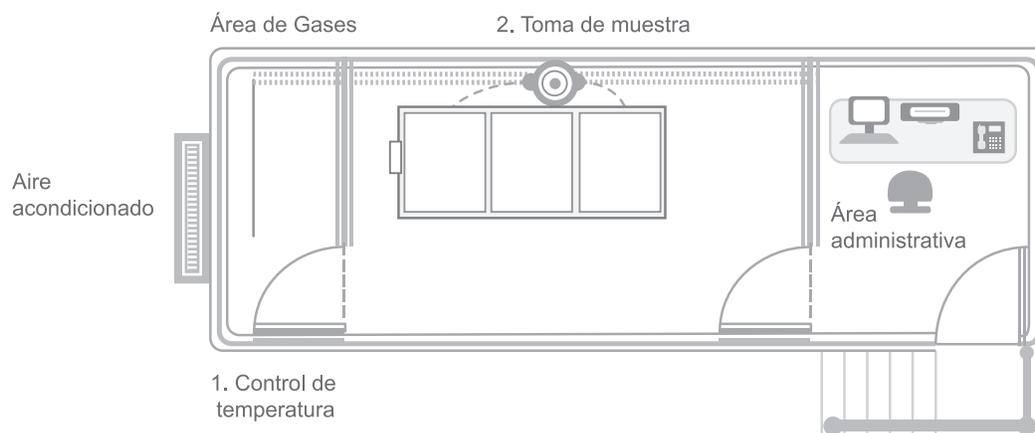


Figura 7. Arreglo de una estación de monitoreo

5.5 Seguridad y planes de emergencia

Además de los programas de mantenimiento y calibración se deberán establecer procedimientos específicos de seguridad tanto para proteger la integridad física de los operadores como para garantizar la seguridad de la infraestructura de las instalaciones remotas (estaciones de medición) y la de los sitios de resguardo del equipamiento propio de la instalación. Asimismo, deben disponer de procedimientos e instrucciones precisas para la atención de emergencias que pongan en riesgo la integridad de la información o bien del equipamiento, así como del personal operativo. En las siguientes dos secciones se enuncian los aspectos relacionados con estos temas.

5.5.1 Seguridad en las instalaciones.

El personal que realice rutinas de mantenimiento, calibración y supervisión en la operación de las estaciones de medición deberá contar con equipo de protección personal adecuado para la realización de actividades identificadas como riesgosas a través de un análisis de riesgo elaborado para tal fin.

El personal operativo deberá contar con los medios suficientes para la ejecución de las actividades previstas en las estaciones, así como con vehículos suficientes y en condiciones de mantenimiento y seguridad apropiadas para el transporte de personal, equipos y herramientas a las instalaciones, siendo importante considerar que en muchas ocasiones deben efectuarse traslados nocturnos.

Es recomendable que las áreas de operación, mantenimiento, almacenamiento, tránsito y accesos peatonales, deben estar deli-

mitadas y bien definidas, en la medida de lo posible. Asimismo deben instalarse anuncios alusivos a la seguridad y a la identificación de zonas que se determinen como de riesgo sobre todo en cuanto a la restricción de acceso para personal no autorizado.

Tanto las instalaciones centrales como las estaciones deberán contar con extintores acordes al tipo de riesgo de incendio y su carga y vigencia deberá ser controlada dentro de las rutinas de mantenimiento. Su instalación y localización deberá apearse a las normas de seguridad vigentes en México.

Las instalaciones eléctricas permanentes de la estación deben contar con dispositivos termo magnéticos de corte de energía así como señales de acuerdo al voltaje y corriente de la carga instalada. Los tableros de distribución de energía eléctrica (ver Figura 8) deben estar señalizados e identificados de acuerdo con la normatividad vigente. Por otra parte, las estaciones deben contar con sistemas de pararrayos en donde sea aplicable. En caso de que la electricidad estática represente un riesgo para el personal se debe controlar de conformidad con las normas correspondientes.



Figura 8. Tablero de distribución de energía eléctrica en una estación.

En caso de estaciones donde se manejen y almacenen sustancias de riesgo, gases inflamables, combustibles o sustancias explosivas, se deben colocar señales y avisos en lugares visibles, que indiquen la prohibición de fumar, introducir fósforos, utilizar dispositivos de llamas abiertas, objetos incandescentes y cualquier otra sustancia susceptible de causar incendio o explosión. También debe garantizarse la apropiada sujeción de tanques de gases comprimidos en el interior (ver Figura 9).



Figura 9. Cilindros de gases comprimidos sin sujeción en una estación.

Los residuos sólidos generados durante la estancia de los operadores en las estaciones deben ser retirados frecuentemente y dispuestos en forma adecuada en un contenedor próximo al sitio de medición.

Para aquellas estaciones con torres meteorológicas de gran altura se deberá disponer de un procedimiento específico de seguridad para el ascenso del personal, tanto de la propia organización como de empresas de servicio.

Es recomendable integrar dentro de los programas de capacitación, cursos básicos de primeros auxilios para personal operativo, así como establecer un programa de instalación y abastecimiento de botiquines de primeros auxilios.

5.5.2 Prácticas de seguridad en torno a las instalaciones

Las estaciones de medición de la calidad del aire que se encuentren ubicadas en sitios públicos o en instalaciones oficiales deben contar con especificaciones de seguridad para salvaguardar las instalaciones, tanto de actos vandálicos como de inclemencias meteorológicas. Se recomiendan implementar las siguientes medidas de seguridad:

- Instalar malla ciclónica perimetral de 2.5 m de altura y alambre de púas en la parte

superior de la valla para salvaguardar las instalaciones.

- Instalar letreros en la valla perimetral de la estación que indiquen el tipo de propiedad y los números telefónicos para solicitar o reportar información sobre la estación.

- Establecer programas de cooperación con el personal administrativo de las instalaciones oficiales o bien hacer del conocimiento de los vecinos el objetivo de la estación y persuadirlos a participar en la vigilancia de las instalaciones notificando de actos vandálicos o de otros eventos que pongan en riesgo las instalaciones.

La periferia de las instalaciones deberá ser inspeccionada para prevenir posibles daños causados por árboles u otras estructuras endebles que pudieran afectar las estructuras vulnerables de la instalación.

Las instalaciones deberán contar con acceso restringido, así como con mecanismos adecuados (como candados y cerraduras) para impedir el acceso de personal ajeno a las estaciones de medición.

5.6 Codificación administrativa de las estaciones.

Con el fin de contar con un código general para todas las redes del país, se ha propuesto una codificación de estaciones. Esta

codificación incluye la identificación de de las características generales de la estación y su entorno, su representatividad espacial y el nivel de importancia territorial.

Para empezar el proceso codificación de una estación, primero se tiene que identificar la ubicación de la misma: Estado, Municipio, y Tipo y Número de estación. Para utilizar un código general, en México se utiliza el formato que establece el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Así, el código de una estación se compone por nueve caracteres numéricos, permanentes y únicos. El Cuadro 9 muestra la clasificación de la estación Merced (MER) de la Zona Metropolitana del Valle de México, la cual se localiza en la delegación Venustiano Carranza del Distrito Federal.

Clave de la Entidad*	Clave del Municipio o Delegación*	Tipo de Estación	No. Estación
09	016	07	01
(2 dígitos)	(3 dígitos)	(2 dígitos)	(2 dígitos)

Cuadro 9. Codificación de una estación.

La primera columna corresponde a la denominación administrativa o entidad federal, establecidas por el INEGI; la segunda columna se refiere a la clave del municipio o delegación de la entidad federal; la tercera al tipo de red de monitoreo; y la cuarta columna al número de la estación.

La columna “tipo de estación” se refiere al equipo con que ésta cuenta:

- 01: Equipos de medición automática para gases y partículas (AUT)
- 02: Equipo de operación manual de partículas (MAN)
- 03: Sensores meteorológicos (MET)
- 04: AUT y MAN
- 05: AUT y MET
- 06: MAN y MET
- 07: AUT, MAN y MET

Es importante mencionar que las Unidades Móviles destinadas al monitoreo de la calidad del aire son consideradas como estaciones de monitoreo atmosférico por lo que se clasifican de igual forma. Para las Unidades Móviles en la segunda columna se escribirá “000” ya que no están asignadas a un municipio o delegación específica. El número de estación se establecerá de acuerdo a la cantidad de estaciones de monitoreo localizadas en un municipio o delegación. Dará inicio con el 01 hasta el 89 y para las unidades móviles se destinarán los números del 90 al 99.

Para clasificar a las estaciones de monitoreo de acuerdo a su importancia territorial y tipo de entorno se deben considerar los objetivos del monitoreo y las características del entorno de cada una de las estaciones. La clasificación está compuesta por tres letras que se añaden en columnas separadas al nombre de la estación. La primera letra corresponde al nivel de representatividad de la estación y las otras dos al entorno que tiene (ver Cuadro 10).

Nombre de la estación	Nivel de representatividad	Clasificación del entorno
090160701	N	UM

Cuadro 10. Clasificación de una estación de acuerdo a su importancia territorial.

El nivel de representatividad, mostrado en la segunda columna del Cuadro 10, dependerá del objetivo del monitoreo y las características del entorno. El Cuadro 11 muestra la clasificación de las estaciones por su representatividad⁵. Los operadores de los SMCA deberán definir cuáles son las estaciones representativas de la cuenca o parcela atmosférica.⁶

Para ello, deberán basarse en el diseño original de la red de medición de la calidad del aire y tomar en consideración los criterios y especificaciones técnicas incluidas en estos documentos.

Nivel de Representatividad o Importancia Territorial	Clave	Características
Nacional	N	Estaciones de medición seleccionadas para representar al país a nivel estadístico, deben de operar de manera ininterrumpida, midiendo la totalidad de los contaminantes criterio y los parámetros meteorológicos.
Cuenca Atmosférica	C	Estaciones de medición cuya representatividad territorial está determinada por los límites geo-espaciales de una cuenca atmosférica. Incluye a uno o más municipios del mismo estado o de estados diferentes y pueden medir uno o más de los contaminantes criterio.
Local	L	Son sistemas o estaciones que representan sólo condiciones locales o micro-espaciales de calidad del aire, en una parcela atmosférica determinada, y pueden medir uno o más de los contaminantes criterio primarios.

Cuadro 11. Clasificación de estaciones por representatividad.

⁵ Esta clasificación es una propuesta del INE.

⁶ Una cuenca atmosférica es el espacio geográfico donde una masa estratificada de aire puede circular libre, superficialmente y con un patrón particular de vientos. La cuenca se delimita topográficamente y tomando como referencia obstáculos de origen natural (líneas costeras formaciones montañosas, etc.).

En el caso de las estaciones de interés nacional, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a través del Instituto Nacional de Ecología, definirá cuáles son las estaciones seleccionadas de acuerdo a la normatividad vigente. Algunos parámetros para determinar si una estación es de interés nacional son:

- Que sean estaciones representativas de una cuenca o parcela atmosférica donde habiten más de 200 mil habitantes.
- Que sean estaciones con una escala urbana o regional.
- Que sean estaciones ubicadas en una zona fronteriza, terrestre o marítima donde hayan núcleos de población importantes o especies de flora u fauna silvestre en peligro de extinción.
- Que sean estaciones ubicadas en áreas estratégicas para el desarrollo nacional, de acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo, ya sea por su relevancia productiva, su valor cultural o su valor paisajístico.
- Que su representatividad esté científica y técnicamente documentada.
- Que evalúen la totalidad de los contaminantes normados por la Secretaría de Salud

para protección de la salud de la población.

- Que midan parámetros meteorológicos: dirección y velocidad de viento y los gradientes de temperatura.
- Que operen de forma ininterrumpida, sin exceder una pérdida total de datos del 25% durante año.
- Que cumplan con un programa de aseguramiento y control de calidad en las actividades de operación, mantenimiento y calibración de los equipos de medición, adquisición de datos, manejo de información.

Cuando alguna estación de interés nacional deba ser reubicada por causas de fuerza mayor, la reubicación deberá realizarse sin afectar su representatividad y para ello, la administración del SMCA a la que pertenezca deberá realizar un estudio de caracterización comparativa entre el nuevo sitio y el actual, el cual tendrá que ser evaluado y autorizado por la autoridad ambiental federal correspondiente.

La nomenclatura de la tercera columna del Cuadro 10, se basa en los Planes de Desarrollo Urbano municipales que corresponden a la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). Este es un indicador de importancia territorial y los datos permiten realizar planes de gestión local, para mitigar el impacto de la contaminación en estas zonas. En el Cuadro 12 se muestra una propuesta de clasificación de estaciones por su entorno.

Tipo de estación	Clave	Características
Urbana		
Industrial Habitacional Servicios Mixto(1) Vehicular	UI UH US UM UV	Se ubica dentro de los límites de un área urbana y sus alrededores presentan un uso predominante de suelo
Rural		
Área Natural Protegida Ecosistema natural Ecosistema productivo inducido (agrícola, ganadero, forestal, turístico)	RA RN (2) RP	Se ubica en espacios no urbanizados cuyo uso de suelo puede variar desde productivo hasta de conservación
<p>(1) Los usos mixtos deberán de tener un porcentaje mayor al 25% de usos: industriales y/o de servicio.</p> <p>(2) La clave RN deberá asignarse a ecosistemas naturales NO productivos y en buen estado de conservación, como podrían ser los ecosistemas marinos, costeros, desérticos, de alta montaña, entre otros.</p>		

Cuadro 12. Clasificación de estaciones por entorno.

Una vez que se tiene codificada una estación, se ha caracterizado el entorno de la misma, y se sabe la representatividad e interés territorial de la localidad se puede generar información específica relacionada con el tipo de entorno de las estaciones a través de cruces de entre los parámetros descritos.

El Cuadro 14 muestra la relación entre la escala de representatividad, el interés político y el tipo de contaminante. En este cuadro se puede observar que todas las estaciones pueden ser de interés local y no así de interés nacional; por tipo de contaminante se puede observar que las partículas son de interés local y en general también de nacional, esto debido a que pueden monitorear el desempeño ambiental de fuentes puntuales; finalmente por la escala de representatividad se puede ver que sólo las estaciones de escala media/municipal son de interés local y nacional.

Habiendo entendido el significado de este cuadro podemos explotar la información que nos aporta, por ejemplo: las estaciones de interés nacional pueden generar indicadores de calidad del aire para evaluar una localidad, estos indicadores podrán ser comparados entre sí y con estaciones de otras localidades nacionales e internacionales; las estaciones de partículas, que son de interés nacional, pueden servir para vigilar, en algunos casos, el desempeño de fuentes que así lo requieran en función de los procesos que realicen.

Escala	Interés Local / Nacional							
	SO ₂	CO	O ₃	NO ₂	Pb	PST	PM ₁₀	PM _{2.5}
Micro		L			L/N	L/N	L/N	L/N
Vecindario	L	L	L	L	L/N	L/N	L/N	L/N
Media Municipal	L/N	L/N	L/N	L/N	L/N	L/N	L/N	L/N
Ciudad (Urbana)	L		L/N	L/N	L/N	L/N	L/N	L/N
Regional	L		L		L/N	L/N	L/N	L/N

Cuadro 14. Relación entre posibles escalas de representatividad y parámetros a monitorear.

6. EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

Para efectos del presente capítulo, el concepto de equipo es utilizado para englobar los diferentes componentes operativos y de medición básicos con los que cuenta una estación de medición de calidad del aire: analizadores automáticos, monitores y/o muestreadores de partículas, sensores meteorológicos, sistema de calibración y sistema de adquisición de datos.

Una estación de medición de la calidad del aire, además de la infraestructura básica, como se mencionó en el Capítulo 4, se compone de diferentes equipos y cada uno de éstos operan de manera individual o en conjunto para tomar una muestra, realizar una medición, transformar una señal, mostrar y almacenar los resultados y calibrar el resto de los equipos.

La gran variedad de equipos que existen actualmente en el mercado puede significar una dificultad en la selección de los mismos; sin embargo, en cuanto a monitoreo de gases contaminantes criterio se refiere, los principios de operación son los mismos y las características entre equipos de diferentes marcas son muy similares. No obstante, en el caso del monitoreo de partículas se pueden encontrar diferentes métodos, y el usuario final tendrá que evaluar la conveniencia de cada uno tomando en cuenta la disponibilidad de recursos y su propia experiencia.

En las siguientes secciones se presentan las características de los equipos con los que puede ser equipada una estación de medición de la calidad del aire, sus principios de operación, así como los criterios a considerar para su selección, su instalación y su puesta en marcha.

6.1 Tipos de equipos en una estación de medición de la calidad del aire.

Para determinar la concentración de un contaminante se han montado diversos métodos, definidos como métodos de referencia, los cuales describen con claridad y exactitud las condiciones y los procedimientos necesarios para medir los valores de una o más propiedades y se ha demostrado que tienen una exactitud y una precisión apropiadas para el uso que pretende hacerse del mismo, de manera que pueden utilizarse para evaluar la exactitud de otros métodos, los cuales son definidos como métodos equivalentes y son empleados para realizar la misma medición.

En la medición de contaminantes criterio, gases y partículas, los principios de operación de los equipos utilizados en una estación deben cumplir con los métodos de referencia o equivalentes establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas. En caso de no contar con una NOM se podrá apegar a los métodos equivalentes que cuenten con la designación de la US-EPA⁷.

⁷ Estos se métodos se pueden consultar en la página www.epa.gov/ttn/amtic/criteria.html.

A continuación se describen los principios de operación que actualmente utilizan los analizadores automáticos de gases, los monitores de partículas, así como el método de referencia para el muestreo manual de partículas suspendidas. También se describen los tipos de equipos para la medición de parámetros meteorológicos, para la adquisición de los datos y para la calibración de los demás equipos de medición.

6.1.1 Analizadores automáticos.

Los analizadores automáticos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de un contaminante gaseoso para determinar su concentración. (Adaptado de US-EPA, 2008; Martínez, 1996; NZ, 2000; OMS-CEPIS, 2004; CENMA, 2003).

Los métodos actualmente utilizados por los analizadores automáticos de gases contaminantes criterio se presentan en el Cuadro 15.

Contaminante criterio	Método de medición	Tipo de método
Ozono (O ₃)	Fotometría ultravioleta (UV)	Equivalente
Monóxido de carbono (CO)	Fotometría infrarroja (IR) de filtro de correlación de gas	Equivalente
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	Quimiluminiscencia en fase gaseosa	Referencia
Bióxido de azufre (SO ₂)	Fluorescencia pulsante	Equivalente

Cuadro 15. Métodos de los analizadores automáticos.

Todos los analizadores automáticos cuentan con tres sistemas internos e interdependientes: electrónico, neumático y óptico.

- El sistema electrónico contiene el software de operación, controla el funcionamiento del analizador y realiza automáticamente los cálculos para el reporte de los resultados.
- El sistema neumático consta principalmente de la bomba de succión y de las conexiones y tuberías por donde circula la muestra de gas.
- El sistema óptico es donde se aplica el método de medición del analizador, mediante procesos físicos y/o químicos, dependiendo del gas a analizar.

6.1.1.1 Analizador de O₃ (Fotometría UV).

El principio de operación que utilizan los analizadores de ozono, O₃, se conoce como el método de fotometría UV y consiste en medir la cantidad de luz ultravioleta, a una longitud de onda de 254 nm, absorbida por el ozono presente en una muestra. El principio de operación se basa en la Ley de Beer-Lambert. Cuando la muestra pasa por el interior de las celdas, la molécula de ozono absorbe una cantidad de luz (I), la cual se compara con la cantidad de luz medida en la celda de referencia (I₀) para calcular la concentración (C). La concentración obtenida se corrige a condiciones de temperatura y presión

del interior de la celda de absorción, los cuales son medidos de manera independiente. La concentración del gas se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$I = I_0 e^{-\alpha LC}$$

(a condiciones estándar de P y T)

Donde:

I = La intensidad de la luz después de la absorción

I₀ = La intensidad de la luz antes de la absorción

α = Coeficiente de Absorción del O₃ a determinada longitud de onda

L = Longitud de la celda o tubo de absorción

C = concentración del gas absorbente (O₃)

Despejando la concentración de O₃ (C) en ppm:

$$O_3 (ppm) = \frac{10^6}{\alpha * L} * \text{Log}_{10} \frac{I_0}{I} * \frac{760}{P} * \frac{T}{273}$$

En las Figura 10 y Figura 11 se muestran: un esquema simplificado del principio de operación y los principales componentes de un analizador de ozono.

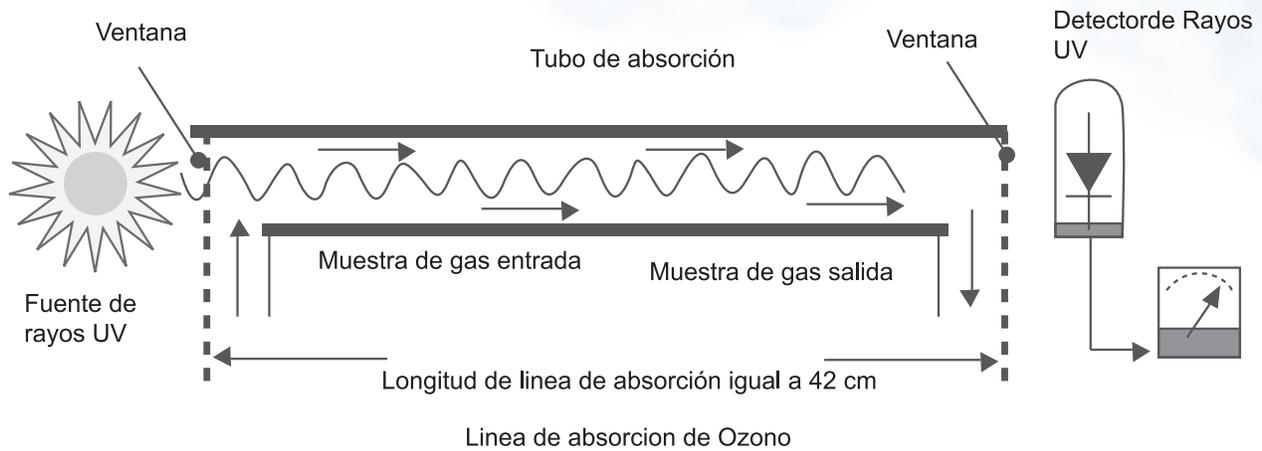


Figura 10. Esquema del principio de operación para un analizador de ozono.

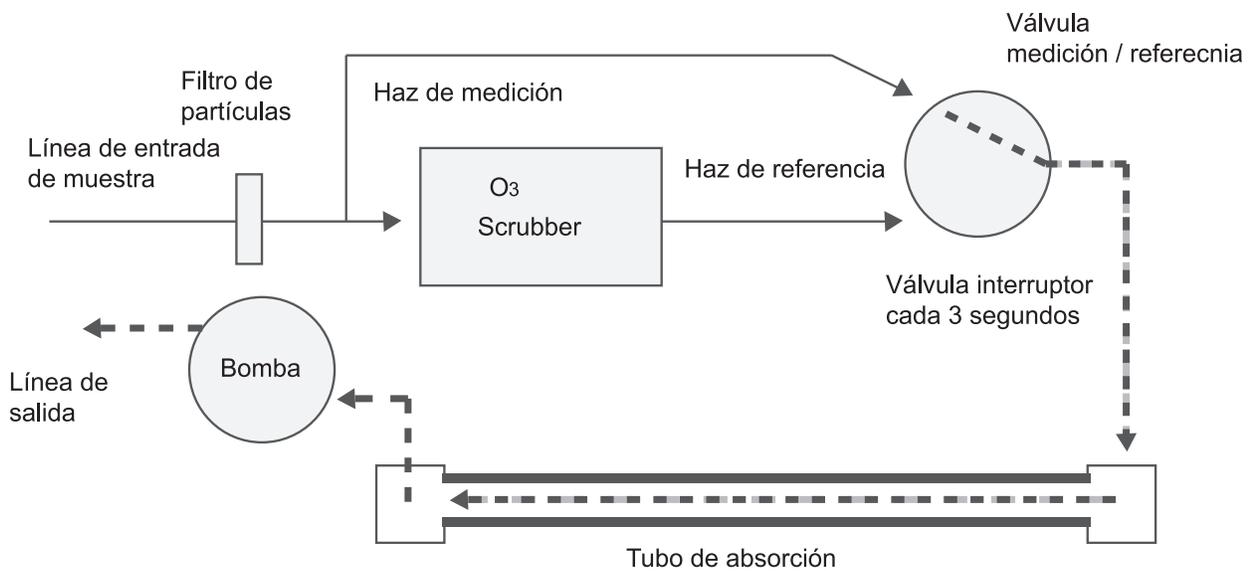


Figura 11. Componentes básicos de un analizador de ozono.

6.1.1.2 Analizador de CO (Fotometría Infrarroja, IR).

Los analizadores de Monóxido de Carbono, CO, se sirven del principio de operación que se basa en la capacidad que tiene este gas para absorber energía en determinadas longitudes de onda. En los equipos de medición que utilizan este principio se mide la absorción de luz infrarroja, llevada a cabo por las moléculas de CO en intervalos relativamente pequeños de longitudes de onda centradas sobre la región de máxima absorción del contaminante.

En los analizadores de CO se aplica una variación denominada filtro de correlación de gas cuyo funcionamiento se muestra en la Figura 12.

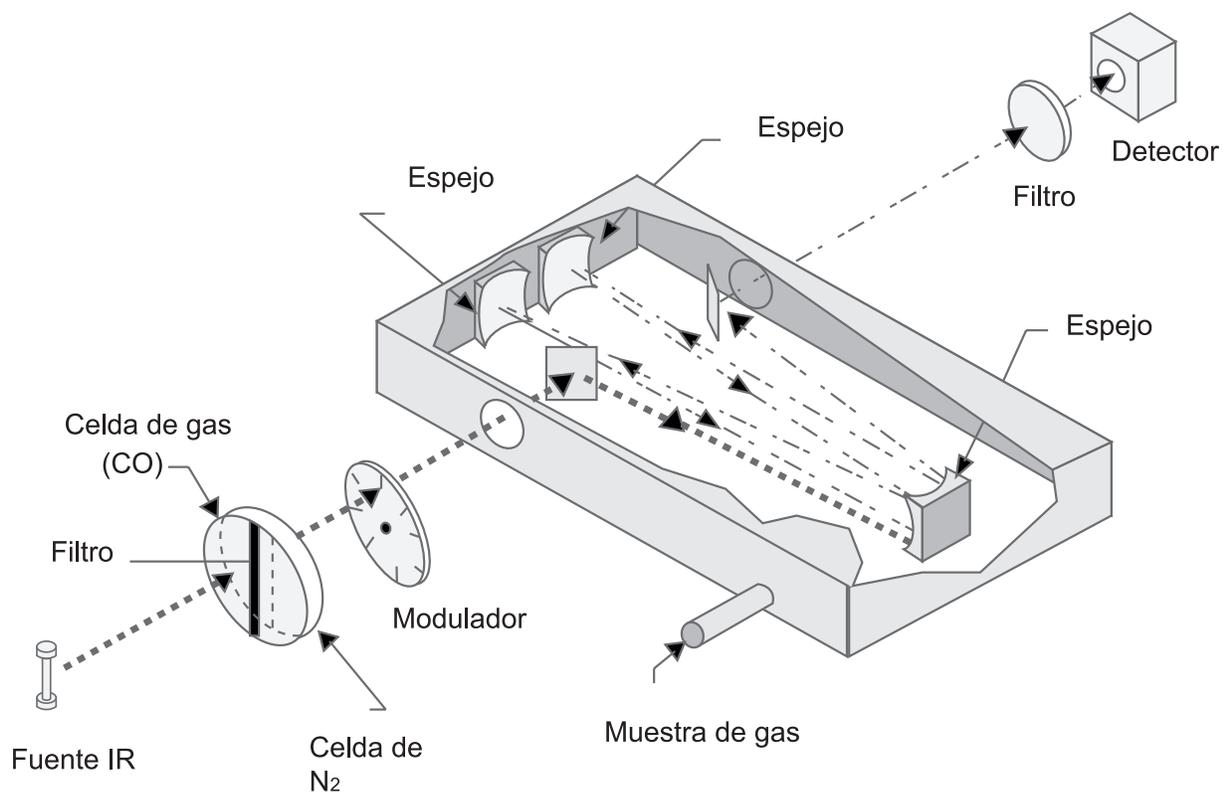
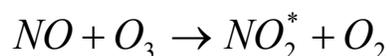


Figura 12. Esquema del principio de operación para un analizador de monóxido de carbono.

En este caso el haz de luz infrarroja pasa por un filtro rotatorio integrado por dos celdas, una de las cuales contiene CO en alta concentración y la otra N₂ como blanco para crear el haz de referencia de modo tal que el detector mida la diferencia de energía entre la radiación absorbida en la celda de muestra y la señal modulada por la alternancia entre los filtros de gas. La señal del detector es procesada y acondicionada por microprocesadores para desplegarla como una lectura de concentración de CO.

6.1.1.3 *Analizador de NO_x (Quimiluminiscencia).*

La quimiluminiscencia es una técnica analítica basada en la medición de la cantidad de luz generada por una reacción química. Los analizadores de Óxidos de Nitrógeno, NO_x utilizan este principio a partir de la reacción que tiene lugar entre el óxido nítrico (NO) contenido en la muestra de aire y el ozono (O₃) que genera, en exceso, un dispositivo que es parte de los componentes del instrumento. La luz emitida se encuentra en el intervalo del infrarrojo entre 500 y 3000 nm de acuerdo a la siguiente reacción:



El NO en una muestra de aire reacciona con el O₃ para formar dióxido de nitrógeno en estado de excitación (NO₂^{*}). Posteriormente, cuando el dióxido de nitrógeno generado vuelve al estado inicial emite una luz característica en una cantidad proporcional a la concentración del NO contenido en la muestra (Jahnke, 1993). En la Figura 13 se muestran los componentes básicos del módulo óptico de un analizador de NO_x.

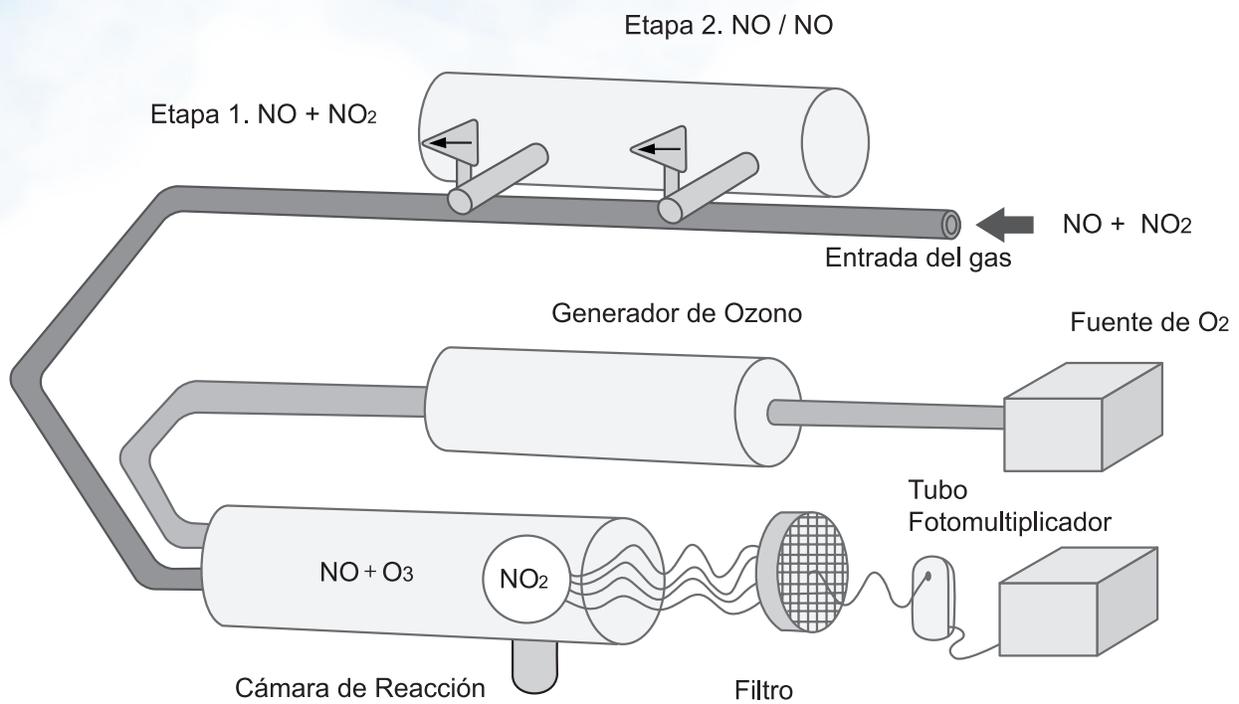


Figura 13. Esquema del principio de operación para un analizador de óxidos de nitrógeno.

El NO₂ no participa en la reacción de quimiluminiscencia por lo que los analizadores están provistos de un convertidor a través del cual pasa la muestra de aire en forma alternada para que el dióxido de nitrógeno se reduzca a NO.

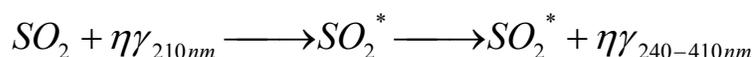


La generación del O₃ se lleva a cabo tratando oxígeno del aire con luz UV dentro de un tubo de cuarzo. El O₃ generado se suministra en exceso a la cámara de reacción para asegurar una reacción completa de tal manera que la luz emitida sea directamente proporcional a la cantidad de NO presente.

La concentración de NO_x se determina en dos etapas de medición. Cuando la muestra llega directamente a la celda de reacción sin pasar por el convertidor la concentración detectada corresponde a la concentración del NO existente y la lectura es guardada por el microprocesador. Cuando la muestra pasa por el convertidor y llega hasta la celda de reacción el NO₂ se convierte en NO y la concentración detectada se suma a la del NO de la etapa anterior y se reporta como NO_x total. La concentración de NO₂ corresponde a la diferencia entre las lecturas registradas de NO y NO_x.

6.1.1.4 Analizador de SO₂ (Fluorescencia pulsante).

Los analizadores de Dióxido de Azufre emplean el principio de fluorescencia pulsante que se basa en el hecho de que las moléculas de SO₂ absorben radiación ultravioleta (UV) a una longitud de onda en el intervalo de 210-410 nm, entrando en un estado instantáneo de excitación para posteriormente decaer a un estado de energía inferior, emitiendo un pulso de luz fluorescente de una longitud de onda mayor en el intervalo de 240 a 410 nm como se indica en la siguiente reacción:



La intensidad de la luz fluorescente emitida es proporcional a la concentración de SO_2 , (Jahnke, 1993). El principio de operación y los componentes básicos de un analizador de este tipo se muestran en la Figura 14.

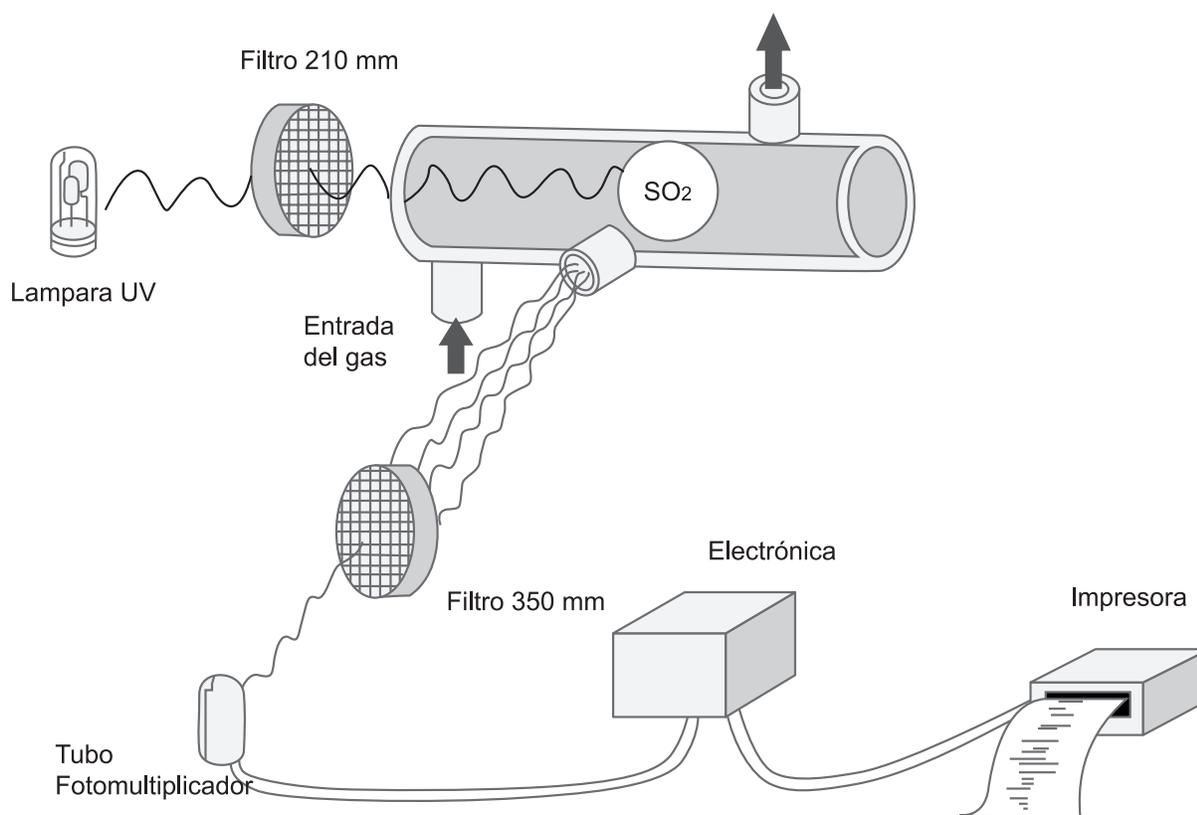


Figura 14. Esquema del principio de operación para un analizador de dióxido de azufre.

Para reducir las interferencias, los analizadores de SO_2 también cuentan con lavadores o con dispositivos filtrantes para la remoción de hidrocarburos.

6.1.2 Monitores de partículas suspendidas.

Los monitores de partículas (algunos modelos que utilizan el método de atenuación beta y de microbalanza oscilatoria), al igual que los analizadores de gases, reportan resultados en tiempo real. Sin embargo, a diferencia de los analizadores de gases, no llevan a cabo un análisis de la muestra, únicamente determinan la concentración de partículas aprovechando las propiedades físicas de las mismas.

Estos equipos son utilizados para monitorear partículas suspendidas en aire ambiente, de diámetros menores a 10 y 2.5 micrómetros. Actualmente en México no existen métodos de referencia para el monitoreo de partículas de estos tamaños.

Los equipos que realizan este tipo de monitoreo son diseñados de tal manera que cumplen con las especificaciones técnicas que se encuentran en el Apéndice J del Código Federal de Regulaciones (CFR, por sus siglas en inglés) 40, parte 50, de los EEUU. Además cabe mencionar que éstos son evaluados y aprobados por la US-EPA y otras agencias internacionales.

Los principios de operación comúnmente utilizados para el monitoreo de partículas son: el de Microbalanza de Elemento Oscilante y el de Atenuación de Radiación Beta. El tamaño de partículas a monitorear depende de los fraccionadores de cada equipo, que son colocados en la entrada de muestra. Éstos aprovechan la dinámica de las partículas para que a cierta velocidad de flujo, las partículas de mayor tamaño sean impactadas en algún sistema de retención y no lleguen hasta el filtro.

6.1.2.1 Microbalanza de elemento oscilante.

El muestreador TEOM (por sus siglas en inglés, Tapered-Element Oscillating Microbalance) mide la cantidad de masa recolectada de una muestra de aire a una velocidad casi continua. Las partículas se recolectan en un filtro colocado en el extremo de un elemento puntiagudo oscilante, que tiene su otro extremo fijo. La frecuencia de oscilación del elemento cambia en proporción directa a la masa a medida que esta se acumula en el filtro. La cantidad de masa en la muestra recolectada se calcula a partir del cambio en la frecuencia del elemento en un período de tiempo fijo. El control de la tasa de flujo se hace mediante dos controladores de flujo másico: uno para el flujo de la muestra, desde uno a tres litros estándar por minuto y el otro para un flujo auxiliar para cumplir con las especificaciones de diseño de la entrada de muestra (16.7 l/min). La concentración de partículas se determina a partir de la masa recolectada, la tasa de flujo de la muestra y el tiempo de recolección de muestra. Ésta se expresa como concentración a las condiciones estándar de 25°C y 760 mmHg. La tecnología de microbalanza de elemento oscilante permite hacer determinaciones de masa muy precisas, con mayor resolución que las microbalanzas convencionales.

6.1.2.2 Atenuación de radiación beta.

En este tipo de equipos el aire ambiente se introduce al sistema mediante una bomba de succión, depositando las partículas en el filtro (una cinta carrete de fibra de vidrio) de manera intermitente esto es, que el impacto de la masa de partículas en el medio filtrante se realiza en periodos de tiempo previamente establecidos por el usuario y que pueden ir desde una hasta veinticuatro horas o inclusive cuando el filtro se sature.

Se hace pasar radiación beta de bajo nivel a través de la cinta y las partículas depositadas. La capa de partículas, que va en aumento, reduce la intensidad del haz de radiación beta en la sección, la cual es medida por una cámara de ionización como detector. La señal eléctrica de salida es proporcional a la masa real muestreada. La concentración se calcula a partir del aumento temporal de la masa de partículas.

Algunos de estos monitores usan ciclos de medición, en los cuales el filtro con la muestra se transporta automáticamente para ser medida. Cada ciclo comienza empieza cuando se coloca una sección limpia de cinta en la posición de muestreo.

Otros son capaces de medir la masa y la concentración de las partículas en el filtro de manera continua, ya que la recolección y la medición se hacen simultáneamente en el mismo segmento del filtro.

6.1.3 Muestreadores de partículas suspendidas.

El método de referencia para la determinación de la concentración de partículas en aire ambiente es el de muestreo de alto volumen, combinado con el método gravimétrico en laboratorio.

El muestreo de partículas es utilizado, en un principio, para la determinación de la concentración de partículas suspendidas totales en aire ambiente. Sin embargo, en muchas ocasiones el filtro con la muestra también es aprovechado para determinar la concentración de otros elementos como: metales pesados, nitratos, sulfatos, entre otros, por medio de análisis en laboratorio.

El método consiste en hacer pasar aire ambiente a una tasa de flujo de aproximadamente 1 metro cúbico por minuto a través de un filtro de fibra de vidrio montado bajo una cubierta protectora que evita que se deposite material directamente sobre el filtro. El muestreo se lleva a cabo de manera continua durante 24 ± 1 horas. El filtro sin muestra tiene que ser previamente acondicionado a las mismas condiciones de temperatura y humedad a las que se acondicionará ya con la muestra, después de haber sido expuesto.

Con este método se retienen partículas suspendidas de diámetro inferior a unos $50 \mu\text{m}$.

El peso de la muestra se obtiene de la diferencia de pesos del filtro con muestra y del

filtro sin muestra, previamente acondicionados como se mencionó. La concentración de PST en el aire ambiente se calcula dividiendo la masa de las partículas recolectadas entre el volumen total de aire muestreado y se expresa en microgramos por metro cúbico de aire (DOF, 1993).

La frecuencia típica de muestreo empleando este método es de cada seis días pero en casos especiales se hace un muestreo cada tercer día.

Los equipos muestreadores de alto volumen han sido modificados para llevar a cabo muestreo de partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros. Estas adaptaciones consistieron en la instalación de un cabezal que fracciona las partículas para permitir únicamente el paso de aquellas con diámetros menores. La separación se tiene que llevar a cabo a una tasa constante de flujo durante todo el muestreo, ya que las variaciones afectan su eficiencia de separación. Es por esto que también fue necesario adaptarles un controlador de flujo.

En la Figura 15 se muestran algunos muestreadores de alto volumen acoplados con un cabezal.



Figura 15. Muestreadores de alto volumen con cabezal.

A pesar de las bondades que ofrecen los monitores de partículas, la muestra recolectada en los medios filtrantes no puede ser recuperada para un análisis posterior. Por otro lado, los costos de operación y mantenimiento de los monitores suelen ser elevados en comparación con el de los muestreadores. Éstas son algunas de las razones que han mantenido activo el uso de muestreadores de partículas.

6.1.4 Sensores meteorológicos.

Hoy en día existe una gran variedad de equipos para la medición de parámetros meteorológicos que utilizan diferentes principios de operación, dependiendo de la marca. En las siguientes secciones se presentan las generalidades de los equipos para el monitoreo de los parámetros meteorológicos básicos, obtenidas de la publicación de la EPA (US-EPA, 2008bis). Si se desea encontrar información específica de los tipos de sensores, sus principios de operación, su instalación y puesta en marcha, así como su calibración⁸.

6.1.4.1 Velocidad de viento.

La velocidad del viento generalmente es medida por anemómetros comunes, que pueden ser tanto de ensamble de copas que giran sobre un eje vertical, como de propelas que giran sobre un eje horizontal.

El anemómetro de copas tiene una forma aerodinámica que convierte la presión del viento en torque. Sin embargo, este no es muy eficiente y crea turbulencia cuando el aire fluye a través y alrededor de éste. El anemómetro de copas es unidireccional, al flujo horizontal, pero presenta una reacción complicada a la componente vertical, y puede indicar una velocidad ligeramente mayor que la velocidad total cuando el flujo no es horizontal.

El anemómetro de propelas presenta una forma más eficiente y crea menos turbulencia cuando el aire fluye a través de éste. La propela mide la velocidad del viento cuando está orientada hacia éste. Los errores de una alineación imperfecta con algún vector promedio son pequeños.

En cualquiera de estos tipos de anemómetros, la rapidez de rotación es medida por un transductor de señal.

6.1.4.2 Dirección de viento.

Los sensores de dirección de viento proporcionan información del ángulo de la dirección de origen del viento. Una aleta es ensamblada verticalmente en la parte trasera del sensor. Cuando el viento sopla, aplica una fuerza a la aleta, lo que ocasiona su movimiento hasta un punto en que ésta reciba la menor fuerza. La línea horizontal está sobre sopor-

⁸ Se puede consultar dicha publicación en la siguiente liga: <http://www.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/met/draft-volume-4.pdf>

tes de baja fricción, los cuales están conectados a un potenciómetro de bajo torque. El potenciómetro envía un voltaje proporcional a la dirección del viento. Una adecuada orientación del sensor hacia el norte real, operación eficiente de los soportes y el correcto funcionamiento del potenciómetro son factores que determinan la calidad de los datos de dirección del viento.

En la Figura 16 se muestran dos de los tipos de sensores más comunes para la medición de dirección y velocidad de viento.



Figura 16. Sensores de dirección y velocidad de viento.

6.1.4.3 Presión.

La presión diferencial es la diferencia entre un valor de presión y otro de referencia. La presión absoluta se considera como la presión diferencial que toma como referencia el vacío absoluto. La presión manométrica es también una presión diferencial que toma como referencia la presión atmosférica. Para propósitos meteorológicos y de calidad del aire, la presión atmosférica es generalmente medida con barómetros de mercurio, barómetros aneróides o barómetros

electrónicos. La mayoría de estos sensores cuentan con salidas de señal analógica que permite conectarlos con sistemas de adquisición de datos.

La mayoría de los barómetros electrónicos de reciente diseño utilizan transductores que transforman la respuesta del sensor de presión en una señal eléctrica que puede ser cuantificada tanto analógica como digitalmente. El sensor de presión capacitivo se basa en el principio que establece que un condensador varía su capacitancia al desplazarse una de sus dos placas. En este caso, la placa móvil, estará conectada mecánicamente a un elemento elástico, de manera que podemos determinar el cambio y convertir a una variable eléctrica, la cual, posteriormente se hace corresponder con un valor de presión atmosférica.

6.1.4.4 Temperatura.

Los equipos más utilizados para la medición de la temperatura ambiente son aquellos cuya resistencia cambia con la temperatura (RTD por sus siglas en inglés: Resistance Temperature Detectors). Los termistores y sensores de platino son actualmente incluidos en la gama de sensores para temperatura, y cuentan con una linealidad aceptable y un voltaje preciso de medición proporcionados por modernos sistemas de adquisición de datos.

El efecto de la radiación solar y el viento pueden afectar significativamente el desempeño de los sensores de temperatura. Por esta razón, es esencial el uso de escudos de radiación con aspiración forzada o convectiva.

6.1.4.5 Humedad relativa.

Los equipos comúnmente utilizados para el monitoreo de la humedad relativa son los higrómetros eléctricos. Cuentan con una delgada película higroscópica, cuya resistencia y capacitancia son afectadas por la presencia de humedad. Los circuitos de medición proporcionan la salida de la señal, la cual es convertida a voltajes escalados y lecturas de la humedad contenida en el aire.

6.1.4.6 Precipitación pluvial.

Existen dos tipos de equipos para el monitoreo de la precipitación pluvial: medidor de pesaje (weighting type gauge) y medidor de conteo (tipping bucket type gauge); y sus diseños están determinados por sus principios de operación.

El medidor de pesaje cuenta con una gráfica tipo tambor que gira, mientras la lluvia se va depositando en el recipiente, el mecanismo de balanza mueve una plumilla que registra la cantidad de lluvia acumulada.

El medidor de conteo está provisto de una balanza con dos charolas, una de cada lado; la lluvia depositada cae sobre una de ellas y cuando ésta se llena levanta a la otra que ya está vacía, continuando así el proceso. Cada ciclo de levantamiento y caída de las charolas es contabilizado por un sistema electrónico, y ya que están diseñadas para recibir un volumen establecido de líquido, es posible determinar la cantidad de precipitación pluvial.

6.1.5 Sistema de adquisición de datos (SAD).

La tecnología para la adquisición de datos está en constante cambio, debido a que la mayoría de los equipos de medición actualmente cuentan con componentes de transmisión automática de datos más complejos y completos. Por esto, ahora es posible obtener instantáneamente gran cantidad de información, lo que a su vez permite detectar oportunamente problemas de operación que pueden afectar la calidad de los datos generados. Sin embargo, este incremento en la rapidez de obtención de datos instantáneos debe estar acompañado de un incremento en la capacidad de análisis por parte del SMCA, de lo contrario se formará un cuello de botella al momento de elaborar los reportes de calidad del aire. Actualmente se requiere dedicar más tiempo al análisis de datos, lo que demanda un esfuerzo coordinado para asegurar que los sistemas de manejo de datos cumplen con el desempeño necesario (EPA, 2008).

Cualquiera que sea el SAD utilizado, es necesario considerar dos principales fuentes de error entre el equipo de medición (analizador, monitor o sensor) y el dispositivo de almacenamiento: 1) la señal de salida del equipo de medición, y 2) los errores de registro del SAD; los cuales pueden ser reducidos si se utiliza una transferencia digital de los datos, ya que a ésta no le afectan los problemas que tiene la transferencia análoga, como atenuación de la señal, ruido, señales parásitas, de configuración, entre otros (EPA, 2008).

6.1.6 Sistema de calibración.

La calibración se define como la comparación de un estándar de medición, o de un equipo, con un estándar o equipo de mayor exactitud, para detectar y cuantificar imprecisiones y reportarlas o eliminarlas mediante un ajuste (EPA, 2008). En este sentido, la calibración es la actividad de control de calidad más importante dentro de la medición, ya que establece la relación del valor medido por un equipo con la de un valor convencionalmente real, dando validez y trazabilidad a la medición.

Antes de implementar cualquier actividad de medición, se recomienda que los equipos (analizadores, monitores, muestreadores y sensores) sean revisados para asegurar que se encuentran dentro de las tolerancias de calibración, y de no ser así, los equipos deberán ser debidamente calibrados in-situ.

Dentro de los principales equipos con los que se debe contar para llevar a cabo la calibra-

ción están: el calibrador dinámico, la fuente de aire cero y los gases de calibración para los analizadores automáticos, medidores de flujo para los monitores de partículas, y un estándar de transferencia de flujo de alto volumen (kit de placas) para los muestreadores de alto volumen.

6.1.6.1 Calibrador dinámico.

El calibrador dinámico es un equipo utilizado, en conjunto con la fuente de aire cero y los gases de calibración, para calibrar los analizadores automáticos. Cuenta con dos dispositivos, uno para el gas y otro para el aire cero, con los cuales se controla el flujo de cada uno para introducirlos en una cámara de mezclado, en donde el aire cero diluye la concentración del gas. El control de los flujos permite que el calibrador dinámico envíe concentraciones constantes hacia los analizadores. Actualmente, los calibradores dinámicos cuentan con un software que permite generar diferentes concentraciones, requiriendo únicamente como información: la tasa de flujo total de salida y la concentración del gas de calibración.

El algoritmo que utiliza el calibrador es el siguiente:

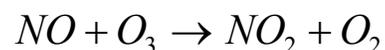
$$C_f = C_i \frac{G_f}{G_f + A_f}$$

Donde:

C_f = Concentración final del gas diluido;
 C_i = Concentración del gas de calibración;
 G_f = Flujo de gas;
 A_f = Flujo de aire.

Para la calibración de analizadores de ozono, un calibrador dinámico puede contar con un dispositivo para la generación de este gas. La mayoría de estos dispositivos genera el ozono haciendo fluir aire cero a través de una cámara en donde una lámpara emite una cierta cantidad de luz ultravioleta. La cantidad de ozono puede ser regulada ya sea por la intensidad de la luz, variando el voltaje de la lámpara, o por la variación del flujo de aire.

Asimismo, con un dispositivo generador de ozono, el calibrador dinámico puede realizar la calibración del canal de NO_2 de los analizadores de NO_x . Ya que el NO_2 es medido indirectamente, esta medición debe ser verificada mediante una titulación en fase gaseosa, la cual consiste en mezclar una cantidad de NO con ozono, produciendo cantidades estequiométricas de NO_2 como se muestra en la siguiente reacción:



Debido a que la reacción es estequiométrica, es decir uno a uno, conocemos la cantidad de NO_2 dada la cantidad de NO introducida.

6.1.6.2 Fuente de aire cero.

La fuente de aire cero es un equipo que cuenta con dispositivos catalíticos y filtros. Toma el aire del exterior y lo conduce a través de estos dispositivos para eliminar la humedad y los gases que puedan interferir en la calibración de los analizadores como hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, entre otros. En algunos casos, en vez de la fuente de aire cero, se utilizan cilindros llenos de aire al cual se le aplicó el mismo procedimiento de purificación.

6.1.6.3 Gases de calibración.

Los gases de calibración son aquellos gases envasados en cilindros y cuyo método de producción permite establecer la trazabilidad a estándares de referencia certificados.

Es recomendable que los gases adquiridos sean aquellos que fueron sometidos a un protocolo de trazabilidad establecido por la US-EPA.

Para la calibración de analizadores, se puede utilizar una mezcla de gases. El tipo y cantidad de éstos, dependerá del tipo de gases que se monitorean en una estación. La relación comúnmente utilizada es CO a 2500 ppm, NO a 25 ppm y SO₂ a 25 ppm, en balance nitrógeno.

6.1.6.4 Medidores de flujo de bajo volumen.

Los medidores de flujos son utilizados para tres propósitos: 1) verificación de los controladores de

flujos de un calibrador dinámico, 2) verificación de flujos de un analizador, y 3) verificación de flujos de los monitores de partículas.

Existen diferentes equipos para la medición de flujo, entre los más utilizados se encuentran los siguientes:

- Medidores de flujo de burbuja. Consta de una celda sobre un contenedor de una solución jabonosa, la cual genera una película delgada en la sección transversal de la celda. Al pasar el flujo del aire, la película se eleva, y su paso es detectado al inicio y al final de la celda por unos dispositivos ópticos. La electrónica del equipo calcula el flujo considerando el volumen de la celda y el tiempo de recorrido de la película jabonosa.
- Medidores de flujo pistón. Aplican el mismo principio que los medidores de flujo de burbuja, sustituyendo la solución jabonosa por un pistón de grafito de baja fricción. Las ventajas de este equipo son la eliminación de la solución jabonosa y la posibilidad de obtener lecturas automáticamente.
- Medidores de presión diferencial. Estos equipos emplean un dispositivo (orificio crítico, vénturi, entre otros) que restringe el flujo del aire, lo que ocasiona diferencias de presión entre dos puntos, ubicados a la entrada y a la salida del dispositivo. Esta diferencia de presión puede ser interpretada en términos de flujo. Estos equipos son utilizados sólo para la verificación del flujo de los monitores de partículas.

6.1.6.5 Estándares de transferencia de flujo de alto volumen.

Este tipo de equipos son utilizados para la calibración de muestreadores de alto volumen. También son conocidos como kits de placas o kits de calibración. Su principio de operación consiste en desplazar el flujo a través de un orificio que restringe su paso. La restricción ocasiona una variación en la presión del flujo (ΔH) la cual es relacionada a un flujo estándar (Q_{std}), mediante la calibración anual del kit contra un medidor de flujo de desplazamiento positivo (con coeficientes m y b). La siguiente expresión es la que determina dicha relación.

$$\sqrt{\Delta H \times \frac{T_{std}}{T} \times \frac{P}{P_{std}}} = m \times Q_{std} + b$$

Donde:

T_{std} = Temperatura estándar, 273 K

T = Temperatura ambiente durante la calibración del muestreador, K.

P_{std} = Presión estándar, 760 mmHg.

P = Presión atmosférica durante la calibración, mgHg.

El equipo puede contar con placas con diferente número de orificios o con una manivela que permite variar el área por donde fluye el aire, esto hace que se puedan tener varias mediciones para establecer una relación lineal del flujo y la caída de presión.

Como se puede ver, la variedad de equipos para diferentes propósitos es extensa, por lo que se hace necesario contar con algunos criterios para una selección adecuada. Estos criterios se presentan en la siguiente sección.

6.2 Criterios de selección de equipos de medición de la calidad del aire.

El proceso de selección y compra de los equipos para el monitoreo de la calidad del aire es determinante para la calidad de los datos que se generen. Una mala selección pone en riesgo la calidad de éstos y puede conllevar a no lograr los objetivos planeados. Por esto es importante tener toda la información relativa a las especificaciones de los equipos que deban adquirirse, para asegurar que cumplen con los requisitos de calidad preestablecidos.

Los analizadores, monitores y muestreadores que satisfacen los requerimientos de la US-EPA como métodos equivalentes o de referencia para el monitoreo de aire ambiente son los únicos que deben ser considerados para conformar estaciones de monitoreo de la calidad del aire. Cuando no están disponibles este tipo de equipos, pueden utilizarse aquellos con eficacia y exactitud demostrada, únicamente para propósitos de investigación.

Se recomienda al momento de la selección de equipos considerar:

- **Objetivos del monitoreo.** Los equipos seleccionados deben coadyuvar al cumplimiento de los objetivos del monitoreo. Una vez que se han seleccionado los contaminantes a monitorear se debe establecer el método de medición requerido, y elegir los equipos que emplean dicho método.
- **Costo inicial y costos de operación.** Se puede dar el caso en que los costos de operación de un equipo barato son mayores que los costos de operación de un equipo con un costo inicial mayor. Por esto es recomendable consultar la cantidad y costos de los consumibles y refacciones que requerirá el equipo en el corto, mediano y largo plazo. También es fundamental la consideración de capacitación y mantenimiento del equipo.
- **Disponibilidad de insumos en el mercado y servicios de mantenimiento.** En algunos casos, los fabricantes especifican el tiempo de disponibilidad de refacciones, consumibles y accesorios para un equipo, dado que los van descontinuando en función de los avances tecnológicos. Así mismo, también debe considerarse la capacidad del proveedor para prestar los servicios de mantenimiento, en caso de que el SMCA no cuente con el personal calificado para realizar dicha actividad.
- **Especificaciones de desempeño del equipo.** Se deben considerar las especificaciones técnicas del equipo tales como rango, ruido, límite mínimo de detección, precisión, exactitud, entre otros.
- **Garantía.** Se debe evaluar el tiempo y el alcance de la garantía por parte del proveedor. Es recomendable que esta sea por al menos un año y que cubra el reemplazo de componentes defectuosos o dañados.

Las especificaciones mínimas de desempeño establecidas por la US-EPA (US-EPA, 2008), para los analizadores automáticos, se presentan en el Cuadro 16.

Una vez que han sido seleccionados los equipos, se debe llevar a cabo su instalación en la estación de medición y las actividades de puesta en marcha pertinentes.

Parámetro de desempeño	Unidades	SO2	O3	CO	NO2
Rango	ppm	0-0.5	0-0.5	0-50	0-0.5
Ruido	ppm	0.005	0.005	0.50	0.005
Límite mínimo de detección	ppm	0.01	0.01	1.0	0.01
Interferencia equivalente Individual Total	ppm	±0.02 0.06	±0.02 0.06	±1.0 1.5	±0.02 0.04
Corrimiento de cero, 14 y 24 horas	ppm	±0.02	±0.02	±1.0	±0.02
Corrimiento de span 24h 20% Rango 80% Rango	%	±20.0 ±5.0	±20.0 ±5.0	±10.0 ±2.5	±20.0 ±5.0
Tiempo de respuesta	min	20	20	10	20
Tiempo de ascenso	min	15	15	5	15
Tiempo de descenso	min	15	15	5	15
Precisión 20% Rango 80% Rango	ppm	0.01 0.015	0.01 0.01	0.5 0.5	0.2 0.3

Cuadro 16. Especificaciones de desempeño para métodos automáticos.

6.3 Instalación y puesta en marcha de los equipos de monitoreo de la calidad del aire.

Para llevar a cabo la instalación de los equipos en la estación de monitoreo, primero se debe verificar que la infraestructura esté completa y cumpla con los requerimientos establecidos en el manual del fabricante.

Al recibir cualquier equipo nuevo el usuario deberá leer cuidadosamente el manual correspondiente y entender las secciones referentes a:

- el desempaque y verificación de los componentes que han sido recibidos,
- la revisión de posibles daños durante el transporte,
- la verificación de conexiones (mangueras y conexiones eléctricas),
- la instalación,
- la calibración,
- la operación,
- la frecuencia y los procedimientos de mantenimiento preventivo,
- el listado de fallas más comunes y las acciones correctivas,
- la lista de accesorios y de partes de refacción; y
- los diagramas de conexiones.

La mayoría de los proveedores establecen periodos de tiempo específicos para realizar el cambio de algún equipo o componente defectuoso o con vicios ocultos. Por lo que se recomienda realizar la revisión de los equipos lo más pronto a la fecha de recepción , antes de llevarlos a la estación de medición, inclusive, es altamente recomendable que el equipo se mantenga en observación unos cuantos días, antes de dejarlo en operación definitiva dentro de una estación de medición.

Para la instalación de los equipos es imprescindible seguir paso a paso las indicaciones que se establezcan en el manual, ya que en ocasiones, no se atienden actividades que parecen irrelevantes, sin embargo, se pueden provocar daños tanto al equipo como al operador. Por ejemplo, algunos equipos



se entregan con seguros o tornillos de transporte para asegurarlo y así evitar un daño, si estos no son removidos antes de poner en marcha al equipo, éste puede dañarse.

Después de esto, se sugiere realizar una prueba inicial de las características de desempeño como flujo, ruido y tiempo de respuesta, así como una verificación multipunto, en el caso de los analizadores. La aceptación o el rechazo de un equipo deben basarse en los resultados de estas pruebas de desempeño. Es importante que los equipos se mantengan operando dentro de las especificaciones establecidas por el fabricante, con el fin de evitar daños o poder hacer válida la garantía en caso de que se presente alguna falla en cualquier componente.

Las actividades de operación, mantenimiento y calibración de los equipos para el monitoreo de la calidad del aire se presentan en el Manual 4.

7. REFERENCIAS

- CENMA, 2003. Elaboración de Reglamentos y Protocolos de Procedimientos para el Aseguramiento de la Calidad del Monitoreo de Contaminantes Atmosféricos. Santiago de Chile, 98 pp.
- CFR, 2004. Code of Federal Registers Title 40. Protection of Environment, Part 58 - Ambient Air Quality Surveillance.
- Cochran, W.G. (1995). Técnicas de muestreo. Décima primera impresión. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México.
- DOF, 1993. Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993. Métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. Diario Oficial de la Federación del 18 de octubre de 1993. SEMARNAT, México.
- DOF, 2005. NOM-025-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM10. y partículas menores de 2.5 micrómetros PM2.5 de la calidad del aire ambiente. Diario Oficial. México. Septiembre.
- Janhke, J. (1993). Continuous Emission Monitoring. Van Nostrand Reinhold, Ontario, Canada.
- Jáuregui E. O. (2000). El Clima de la Ciudad de México. Editorial Plaza y Valdéz, S.A. de C.V.. 1ª edición.
- Johnson, R. y Wichern, Dean. 1982. Applied Multivariate Statistical Analysis. Prentice-Hall International, Inc.
- Martínez, A.P., Romieu, I. (1997). Introducción al Monitoreo Atmosférico. Hermes Impresores, México
- NAPS, National Air Pollution Surveillance Network, 2004. Quality Assu-

rance and Quality Control Guidelines. Environmental Technology Centre Analysis and Air Quality Division, Toxicology and Environmental Health 1984;13:205-227. Report No. AAQD 2004-1, Environment Canada, Canada, 44 pp.

- NZ, 2009. Good-practices guide for air quality monitoring and data management. December 2000. Published by the Ministry for the Environment of New Zealand, ISBN 0-478-24005-2. 105 pp.
- OMS-CEPIS, 2004. Guías para la Calidad del Aire. Ginebra, Suiza, 236 pp.
- SMA (2000). Proyecto “Bases Para el Manejo de la Zona Oriente del Valle de México”. Secretaría del Medio Ambiente del G.D.F.
- U.S. EPA (1997a). “Revised Requirements for Designation of Reference and Equivalent Methods for PM_{2.5} and Ambient Air Quality Surveillance for Particulate Matter”. 40 CFR Part 53 and 58. Federal Register, 62(138):38763-38854. July 18.
- US-EPA (1997b). Guidance for Network Design and Optimum Site Exposure for PM_{2.5} and PM₁₀. EPA-454/R99-002. December.
- US-EPA 2008. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems Volume II: Ambient Air Quality Monitoring Program. U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Air Quality Assessment Division. Research Triangle Park, NC, USA. Report No.: EPA-454/B-08-003
- US-EPA 2008b. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems Volume IV: Meteorological Measurements Version 1.0 (Draft). U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Analysis Division, Measurement Technology and Ambient Air Monitoring Groups. Research Triangle Park, NC, USA. Report No.: EPA-454/D-06-001.
- WHO, 2005, World Health Organization. Guidelines for Air Quality. p. 82 Consulta realizada en Agosto de 2006 <http://www.who.int/peh/>

