

EARTHWATCH

**SISTEMA MUNDIAL DE VIGILANCIA
DEL MEDIO AMBIENTE**

GEMS/Aire
Serie de Manuales de Metodología

Volumen 1

**Aseguramiento de la calidad
en el monitoreo
de la calidad del aire urbano**



**Programa de las Naciones Unidas
para el Medio Ambiente**

PNUMA

**Organización Mundial
de la Salud**



En 1974, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) establecieron conjuntamente un programa conocido como GEMS/Aire para monitorear y evaluar la calidad del aire urbano a escala mundial. GEMS/Aire integra el Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente de las Naciones Unidas. Sus objetivos iniciales fueron ayudar a los países participantes a desarrollar sistemas de monitoreo del aire; incrementar la comparabilidad, compatibilidad y validez de los datos de calidad del aire urbano a escala global; fomentar el intercambio internacional de información sobre los niveles y tendencias de la contaminación del aire y proporcionar evaluaciones integrales pertinentes para la calidad del aire urbano y otros temas relacionados. En la primera fase, se incluyeron datos normalizados sobre dióxido de azufre (SO₂) y material particulado en suspensión (MPS) provenientes de 86 ciudades de 45 países para fines de evaluación e información. Se recopilaban datos sobre otros contaminantes a partir de fuentes publicadas y cuestionarios.

Actualmente, el programa GEMS/Aire está desarrollando una significativa reorientación de sus acciones en respuesta a los retos de la década del 2000: el aumento continuo de la población urbana, la necesidad de apoyar a los países en la gestión de la calidad de aire y la urgencia de integrar los objetivos ambientales con los relacionados con la salud.

En 1992, GEMS/Aire entró en su segunda fase con el nuevo objetivo general de proporcionar la información integral necesaria para una gestión racional de la calidad del aire. A partir de esto, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Proporcionar un marco internacional para lograr un monitoreo coordinado y válido de la calidad del aire urbano, un manejo efectivo de los datos y la disseminación de información confiable.
- Desarrollar metodologías adaptadas a las necesidades específicas de los países participantes en cuanto al monitoreo y evaluación integrales de la calidad del aire urbano.
- Realizar evaluaciones integrales que incluyan niveles y tendencias de la calidad del aire urbano, fuentes de contaminación y alternativas de disminución, así como efectos potenciales sobre la salud y el ambiente.
- Fortalecer las redes de monitoreo de la calidad del aire urbano, así como las capacidades para evaluar este problema, en los países en desarrollo.

Ahora, GEMS/Aire se propone ampliar sus operaciones, de tal manera que estas incluyan no solo la recolección de datos sobre calidad del aire sino también toda la información adicional que sea necesaria para la gestión de la calidad del aire. La perspectiva de GEMS/Aire será ampliada a fin de que considere el ecosistema y otros temas de contaminación del aire, además de los impactos relacionados con la salud. La variedad de contaminantes medidos se ampliará y no solo tomará en cuenta los MPS y el SO₂ sino también el óxido de carbono (CO), el óxido nitroso (NO₂), el óxido nítrico (NO), el ozono (O₃), el plomo (Pb) (y otros, según se requiera); la prioridad estará puesta en el CO. Los procedimientos de aseguramiento y control de calidad estrictamente definidos e implementados desempeñarán un papel crucial en la tarea de asegurar la comparabilidad y la compatibilidad de los datos obtenidos de la red de GEMS/Aire. Estas propuestas se aprobaron durante una reunión de expertos designados por los gobiernos, llevada a cabo en Ginebra, en noviembre de 1991.

GEMS/Aire
Serie de Manuales de Metodología

Volumen 1

**Aseguramiento de la calidad
en el monitoreo
de la calidad del aire urbano**

WHO/EOS/94.1
UNEP/GEMS/94.A.2

©PNUMA Y OMS 1994

El contenido de este documento no necesariamente refleja las opiniones y políticas del PNUMA, de la OMS ni de las organizaciones de apoyo. Las designaciones usadas y las presentaciones no expresan las opiniones del PNUMA ni de la OMS sobre el estatus legal de algún país, territorio, ciudad o área, ni sobre sus autoridades ni sobre la delimitación de sus fronteras. Las eventuales referencias a productos comerciales o a fabricantes específicos no constituyen aval ni recomendación alguna de parte del PNUMA ni de la OMS. Los precios mencionados en este documento son referenciales, han sido considerados únicamente para efectos de orientación y están sujetos a modificación. Ni el PNUMA ni la OMS asumen responsabilidad alguna frente a cualquier acción tomada como resultado de esta información.

Traducción realizada por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/CEPIS), agencia especializada de la Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS).

Para fines bibliográficos, refiérase a esta publicación de la siguiente manera:

PNUMA/OMS 2002

Manuales de Metodología de GEMS/Aire. Volumen 1. Aseguramiento de la calidad en el monitoreo de la calidad del aire urbano

Traducción del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/CEPIS)

El documento original es el siguiente:

UNEP/WHO

GEMS/AIR Methodology Reviews Vol. 1. Quality Assurance in Urban Air Quality Monitoring

WHO/EOS/94.1, UNEP/GEMS/94.A.2

UNEP Nairobi

El documento original está disponible en:

United Nations Environment Programme (UNEP)

Global Environment Monitoring System, Programme Activity Centre (GEMS PAC)

P. O. Box 30552, Nairobi, Kenia

World Health Organization (WHO)

Prevention of Environmental Pollution (PEP)

CH-1211 Ginebra 27, Suiza

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	LOS OBJETIVOS DEL MONITOREO	4
3.	EL PAPEL DEL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD EN LA ARMONIZACIÓN DE DATOS	6
4.	CONTAMINANTES PRIORITARIOS DEL AIRE URBANO	8
5.	METODOLOGÍAS PARA EL MONITOREO DEL AIRE	9
6.	METODOLOGÍAS DE ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD (AC y CC)	11
6.1.	Objetivos del AC y del CC	11
6.2.	Características organizativas de los programas de AC y CC	12
6.3.	Rasgos operacionales de los programas de AC y CC	12
6.3.1.	Diseño y manejo de redes	13
6.3.2.	Selección de sitios	14
6.3.3.	Evaluación y selección del equipo	16
6.3.4.	Infraestructura del sitio y operación de rutina	17
6.3.5.	Mantenimiento y calibración del equipo	19
6.3.6.	Revisión y validación de datos	22
7.	USO E INTERCAMBIO DE DATOS	26
8.	RESUMEN	28
9.	REFERENCIAS	29
	LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	31
ANEXO 1:	AGENDA 21 DE LA CNUMAD Y MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE	32
ANEXO 2:	CONTAMINANTES PRIORITARIOS DEL AIRE URBANO	33
ANEXO 3:	METODOLOGÍAS DE MONITOREO DEL AIRE	38

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación se basa principalmente en un documento preparado por el Sr. J. S. Bower del Warren Spring Laboratory, del Reino Unido, para una reunión de expertos designados por los gobiernos participantes de GEMS/Aire, realizada en Ginebra del 5 al 8 de noviembre de 1991. El documento también se discutió en una reunión de grupos de trabajo de expertos del PNUMA-HEM/OMS/GEMS/Aire, que se llevó a cabo en el GSF Research Centre for Environment and Health, en Neuherberg, Munich, del 7 al 11 de setiembre de 1992.

Deseamos agradecer al Sr. J. S. Bower por su dedicación en la preparación del documento original y a todos quienes participaron en dicha reunión, en particular a los presidentes y relatores, por su entusiasmo y por el gran esfuerzo que desplegaron. También agradecemos al Dr. V. Mohnen y al Sr. J. Durham por revisar críticamente el texto final y por sus valiosas recomendaciones, así como a las Sras. A. B. Murray, P. Mandry, D. Mitchell y al Sr. H. C. Eerens por su dedicación y esfuerzo en la preparación de los documentos finales.

PREFACIO

La magnitud de la contaminación del aire en nuestras ciudades se ha venido incrementando desde la Revolución Industrial. Recientemente, el crecimiento de las ciudades en todo el mundo, el incremento en el uso de vehículos, la industrialización acelerada y las deficiencias existentes tanto en los reglamentos ambientales como en los de planificación han perjudicado la salud y el ambiente en diversas regiones. Los resultados obtenidos por la red de GEMS/Aire, basados en cerca de 20 años de recolección y evaluación de datos sobre contaminantes comunes del aire en alrededor de 50 países, muestran que gran parte de la población mundial vive en ciudades donde la concentración de contaminantes del aire sobrepasa los niveles considerados como una amenaza para la salud humana (guías de la OMS). A pesar de que las concentraciones ambientales de ciertos contaminantes del aire (SO₂, partículas y plomo) están disminuyendo en algunos países, no sucede lo mismo con otros.

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo de 1992 ha establecido que el deterioro ambiental en las ciudades constituye un área que requiere atención inmediata. La Agenda 21, el plan de acción con miras al desarrollo sostenible para el siglo XXI, destaca en varios capítulos la importancia de la contaminación del aire urbano y exhorta a los gobiernos locales y nacionales, así como a la comunidad internacional, a incrementar los esfuerzos que despliegan para obtener información confiable y accesible sobre las concentraciones de contaminantes, sus fuentes y sus efectos. Las ciudades deberán desarrollar planes integrales de gestión de la calidad del aire e introducir medidas efectivas de control. De este modo, el monitoreo de la calidad del aire resulta fundamental para dos fines: la determinación de la magnitud y las fuentes de los problemas de contaminación y el establecimiento de una base para desarrollar estrategias de control apropiadas y para evaluar su éxito.

GEMS/Aire tiene como nuevo objetivo brindar la información integral necesaria para la gestión racional de la calidad del aire. El programa ampliará su cobertura geográfica y pondrá énfasis en los países en desarrollo, mejorará la calidad de los datos e incrementará el uso de otros datos (meteorológicos, estadísticas de tránsito y de producción, etcétera). Los nuevos objetivos de GEMS/Aire están diseñados para ayudar a las ciudades a obtener e interpretar la información requerida para desarrollar estrategias de disminución de los contaminantes. Todos los países, ya sea industrializados, en transición o en desarrollo, requieren información básica y clara sobre diferentes aspectos referidos a las técnicas de medición. La Serie Manuales de Metodología de GEMS/Aire intenta responder a esta necesidad.

La serie se concibió durante una reunión de expertos designados por distintos gobiernos participantes en GEMS/Aire, cita llevada a cabo en noviembre de 1991. La serie intenta abarcar la gama completa de metodologías usadas en la red de GEMS/Aire. Los manuales presentan el estado de la cuestión en lo que se refiere a diferentes metodolo-

gías, sus aplicaciones apropiadas, y brinda las referencias necesarias para acceder a bibliografía más detallada.

Uno de los beneficios que tienen las ciudades que pertenecen a una red como GEMS/Aire es que se pueden beneficiar de la experiencia de los demás participantes. Al comparar información de diferentes lugares, es posible trazar paralelismos, identificar estrategias apropiadas para situaciones similares y evaluar las perspectivas de éxito para alcanzar las metas seleccionadas. Al mismo tiempo, es posible realizar evaluaciones internacionales sobre la situación de la calidad del aire urbano. Estas tareas cobran creciente importancia ya que gran parte de aspectos de la contaminación del aire se reconoce como transfronteriza, continental y global por naturaleza; por tanto, se requieren acciones de carácter internacional. Para maximizar el uso de datos de diferentes fuentes, estos deben ser comparables y compatibles. Las ciudades solo pueden obtener el máximo beneficio de la red si los datos se armonizan.

El firme cumplimiento de los procedimientos definidos y acordados sobre aseguramiento de la calidad y control de calidad —lo que debe incluir un acuerdo sobre los requisitos y la presentación de los datos— es el enfoque más prometedor para lograr la comparabilidad y compatibilidad a escala internacional. Igualmente, el aseguramiento de la calidad y el control de calidad exhaustivos constituyen un requisito para obtener información significativa sobre mediciones realizadas en diferentes lugares y momentos, incluso dentro de una red homogénea que usa metodologías normalizadas y es manejada por un solo operador. De este modo, una de las características principales de esta serie será el enfatizar las técnicas y requisitos específicos de AC y CC para las diferentes metodologías. El Harmonisation of Environment Measurement Centre del PNUMA (PNUMA-HEM) ha participado en la preparación de estos manuales, que —esperamos— contribuirán a armonizar las mediciones de la calidad del aire urbano en los próximos años.

Esperamos que usted encuentre esta publicación útil y quedamos a la espera de sus observaciones.

J. W. Huismans
Director Ejecutivo Adjunto
Coordinación y Evaluación Ambiental
Earthwatch

1. INTRODUCCIÓN

Existe una creciente toma de conciencia sobre la necesidad de una acción concertada y efectiva para mejorar la calidad del aire en los medios urbanos. La contaminación del aire se está convirtiendo en uno de los principales factores de la calidad de vida de la población urbana porque representa un riesgo tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Sin embargo, para elaborar planes apropiados de gestión de la calidad del aire es necesario, en primer lugar, contar con información confiable sobre el estado de la contaminación, punto que ha sido reconocido en la Agenda 21 de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, llevada a cabo en Rio de Janeiro, en junio de 1992 (anexo 1). El nivel de concentración de contaminantes específicos se debe medir en diferentes intervalos de tiempo y espacio. Resulta particularmente importante conocer la calidad de estas mediciones. No es posible tomar decisiones informadas a partir de datos poco seguros. Además, el realizar mediciones sin contar con los medios para asegurar que los objetivos de calidad de los datos se cumplan constituye un desperdicio de recursos.

Aseguramiento de la calidad

Sistema de actividades que asegura que las mediciones cumplan las normas de calidad definidas con un nivel establecido de confiabilidad.

De este modo, el AC y el CC constituyen una parte esencial de todos los sistemas de medición. Ambos incluyen toda la secuencia de actividades que aseguran que una medición cumpla las normas de calidad establecidas con un nivel establecido de confiabilidad. Básicamente, el AC se refiere a la gestión general de todo el proceso, gestión que permite obtener datos de una calidad definida, mientras que el CC comprende las actividades realizadas para obtener cierta exactitud y precisión en la medición. Antes de emprender un programa de medición, es necesario diseñar un plan detallado de AC que cubra todos los aspectos de aseguramiento y control de la calidad (véase el recuadro). El programa de AC cubrirá todas las fases importantes que se deben cumplir antes de la medición, desde la definición de los objetivos de calidad de los datos, el diseño del sistema y la elección del sitio hasta la evaluación y uso del equipo y la capacitación del operador. Las funciones de control de calidad incluirán directamente las actividades relacionadas con la medición; es decir, la operación de la red, la calibración, el manejo de los datos, la verificación y la capacitación del personal.

La importancia tanto del AC como del CC se reconoció en una reunión de expertos designados por los gobiernos, convocada por el PNUMA y la OMS en Ginebra, en ro-

viembre de 1991, con el objeto de revisar el programa GEMS/Aire y recomendar su posterior desarrollo (OMS/PNUMA, 1992). Los expertos consideraron que era esencial elaborar un plan de aseguramiento de la calidad para la red a fin de garantizar la comparabilidad y compatibilidad de los datos provenientes de diferentes lugares. Recomendaron también fortalecer las medidas de AC y CC del programa GEMS/Aire y buscar recursos financieros y de otra índole para apoyar las actividades de AC y de CC; entre estas últimas se incluyeron auditorías, intercalibración de la red y preparación de patrones primarios. La revisión de los pasos incluidos en el desarrollo de un programa de aseguramiento de la calidad para GEMS/Aire condujo indirectamente a esta publicación.

Desarrollo de un plan de aseguramiento de la calidad

Definir los objetivos del monitoreo => Objetivos relacionados con la calidad de los datos (exactitud, precisión, completitud, representatividad, comparabilidad)

Aseguramiento de la calidad:

- Diseñar la red de monitoreo;
- seleccionar los sitios;
- seleccionar instrumentos y diseñar un sistema de muestreo;
- desarrollar un programa de capacitación.

Control de calidad:

- Preparar protocolos (procedimientos normalizados de operación y mantenimiento de registros) para la operación en los sitios y para el mantenimiento de los equipos;
- preparar protocolos para la calibración de los equipos;
- preparar un cronograma de visitas al sitio;
- preparar los protocolos para la inspección, verificación y validación de datos.

Evaluación de la calidad:

- Cronograma para auditorías y reportes.

Este manual describe los principales elementos del programa de aseguramiento de la calidad para el monitoreo de la calidad del aire. No pretende ser un manual integral sino ofrecer un panorama de los diversos aspectos que deben considerarse en esta tarea. A pesar de estar pensado para los usuarios de la red de GEMS/Aire, brinda información básica a todas las personas interesadas en los principios del monitoreo de la calidad del aire.

Para obtener información más detallada, remítase a diversos manuales oficiales; por ejemplo, el manual de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (1989-1993) y las guías y normas preparadas por la ISO, el Comité Europeo para la Normalización (CEN), OCDE (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos) y otros. En este documento se identifican los objetivos generales relacionados con el AC y con el CC en los programas de monitoreo y se abordan las características organizacionales. También se brindan algunos consejos prácticos sobre la elección de metodologías y los procedimientos de control de calidad para aquellos que estén interesados en realizar un monitoreo de la calidad del aire urbano. Se toman en cuenta algunas preguntas clave como las siguientes: *¿por qué* monitorear?, *¿qué* contaminantes prioritarios se deben investigar?, *¿dónde* y *cómo* se puede realizar mejor el monitoreo? y *¿cómo* se puede garantizar la confiabilidad de las mediciones?

El manual describe los principios generales del AC y del CC. Los procedimientos operativos detallados que adopten las organizaciones particulares dependerán de los objetivos locales del monitoreo así como de la disponibilidad de personal y de otros recursos. Sin embargo, la adopción de un enfoque consistente de AC y de CC será de gran importancia para asegurar el éxito de cualquier red de monitoreo.

2. LOS OBJETIVOS DEL MONITOREO

El primer paso para diseñar e implementar un sistema de monitoreo del aire es definir sus objetivos generales. Generalmente, cada organización tiene sus propios objetivos específicos para monitorear el aire. Entre ellos, se pueden mencionar los siguientes: evaluar cuán expuestos se hallan la población y el ecosistema a los contaminantes del aire; determinar el cumplimiento de los criterios establecidos de calidad del aire; proveer una base segura para el desarrollo de planes de gestión de la calidad del aire; e informar al público acerca de la calidad del medio ambiente. Otros objetivos técnicos más específicos se enumeran a continuación: identificar las fuentes o los riesgos de contaminación; apoyar en la planificación del uso del suelo, así como en la planificación y la gestión del tránsito; identificar los patrones de exposición espaciales y temporales; y determinar las tendencias de largo plazo. Los objetivos específicos de la calidad de los datos (OCD) se derivarán de los objetivos del monitoreo. Los OCD son las especificaciones reales que se necesita cumplir para diseñar el estudio, lo que incluye el nivel de incertidumbre que el usuario de los datos está dispuesto a aceptar. Los OCD definen los requerimientos que deben cumplir las mediciones a fin de que permitan dar respuesta a las preguntas formuladas al momento de determinar los objetivos del monitoreo. Los OCD incluyen características tales como la exactitud, la precisión, la completitud, la representatividad y la comparabilidad de los datos.

En algunas ocasiones, la utilidad de las mediciones de la calidad del aire se puede incrementar en gran medida en combinación con datos provenientes de otras fuentes. Por ejemplo, cuando se evalúan los efectos probables de la contaminación del aire sobre la salud humana, se debe contar con información sobre la distribución de la población, la exposición y la epidemiología, así como con mediciones de la calidad del aire en interiores y de la exposición personal. Del mismo modo, se pueden necesitar como información de base los inventarios detallados sobre la emisión de contaminantes y datos meteorológicos para desarrollar enfoques de control y reglamentación basados en un análisis costo-efectividad, ya sea a escala nacional o local. Las concentraciones de contaminantes en el aire, las emisiones y la meteorología se relacionan entre sí y el uso coordinado de estos datos es posible mediante diversos enfoques de elaboración de modelos de la contaminación del aire.

Objetivos típicos del monitoreo

- Establecer una base científica sólida para el desarrollo de políticas;
- determinar el cumplimiento de los criterios establecidos por la ley;
- evaluar la exposición de la población y del ecosistema;
- información pública;
- identificar las fuentes de contaminación y los riesgos de contaminación;
- evaluar las tendencias de largo plazo.

Todo sistema de monitoreo debe definir claramente sus objetivos generales. El establecimiento de objetivos difusos, excesivamente restrictivos o ambiciosos puede desembocar en programas inapropiados desde el punto de vista del análisis costo-efectividad y con datos poco útiles. En esas condiciones, será imposible optimizar el uso del personal y de los otros recursos destinados al monitoreo del aire. Los objetivos del monitoreo y de calidad de los datos se deben especificar claramente para optimizar el diseño de redes, seleccionar los contaminantes prioritarios apropiados y los métodos adecuados de medición, así como determinar el nivel necesario de AC, de CC y de manejo de datos.

3. EL PAPEL DEL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD EN LA ARMONIZACIÓN DE DATOS

Las redes descentralizadas o de operadores múltiples son comunes en muchos países. Muchas de las complejidades operativas de este tipo de redes están presentes en las redes internacionales, como GEMS/Aire. Se debe prestar especial atención para asegurar que los datos obtenidos por dichas redes sean comparables y compatibles de tal manera que se puedan realizar evaluaciones significativas. La calidad aceptable y conocida de los datos, la trazabilidad y la comparabilidad son esenciales para garantizar el éxito de dichas redes.

Existen diversos enfoques para armonizar las mediciones de las redes. Un método que podemos describir como *orientado al ingreso de datos* se basa en la especificación de las técnicas operativas y el instrumental requerido con un gran nivel de detalle. Los manuales operativos brindan instrucciones precisas en todos los aspectos del uso de instrumentos, de las prácticas de monitoreo, de las técnicas de apoyo y del manejo de datos. Generalmente, este esquema enfatiza la elaboración cuidadosa de documentos para garantizar el cumplimiento de las metodologías establecidas. Este enfoque puede funcionar adecuadamente para armonizar las mediciones de redes que operan con objetivos consistentes en líneas generales, con un nivel comparable de desarrollo técnico y de disponibilidad de recursos. Sin embargo, no resulta práctico ni apropiado para redes con diseños generales sustancialmente diferentes, que usan distintas técnicas genéricas de monitoreo o que tienen niveles variables de financiamiento y de personal calificado.

El tipo de enfoque que probablemente resulta más productivo para la comparabilidad de los resultados obtenidos de redes heterogéneas es el enfoque *orientado hacia la producción de datos*. Este tipo de enfoques se concentra en la especificación de objetivos generales de los datos en función de parámetros como la calidad de los mismos (exactitud y precisión), tasas de recolección de datos, consistencia de largo plazo y trazabilidad respecto a los patrones absolutos o aceptados de metrología. Este enfoque enfatiza la convergencia de los resultados mediante la adopción de un enfoque común sobre los criterios que guían las metodologías y los objetivos del monitoreo, así como sobre el AC. Los pasos que se deben seguir para diseñar un plan de AC para este tipo de red se resumen en el recuadro de la sección 1 y se explican detalladamente en las siguientes secciones. La adhesión estricta a los procedimientos internos y externos de aseguramiento de la calidad permite asegurar la comparabilidad y la compatibilidad de los resultados de las redes y estaciones que usan diferentes metodologías y equipos y que trabajan con diversos niveles de complejidad. Por ello, el aseguramiento de la calidad se puede considerar como una de las principales herramientas para armonizar las mediciones.

En algunos casos, puede ser útil establecer diferentes rangos de calidad de datos (con los requisitos correspondientes para el nivel de aseguramiento de la calidad) apropiados para las organizaciones que operan sitios o subredes a diferentes escalas, complejidades

y niveles de desarrollo técnico. Las diferencias en los objetivos de calidad de los datos reflejarán las variaciones en los objetivos de monitoreo para estas diferentes situaciones.

Si bien la autoridad coordinadora central de AC y CC desempeña un papel crucial en asegurar la consistencia y la calidad generales del ingreso de datos para dichas redes, debe enfatizarse que el punto crucial del aseguramiento de la calidad estará en el nivel de los operadores locales. Muchas metodologías de AC y CC solo se pueden aplicar exitosamente con una participación diaria y con un conocimiento detallado de las condiciones y problemas locales.

Al garantizar niveles definidos de AC en redes diferentes, también se puede asegurar que los datos puedan ser significativamente comparados y cotejados en una escala mayor, lo cual permitirá el máximo uso posible de las mediciones; por ejemplo, estudios comparativos de los efectos de las diferentes estrategias de control, etcétera, en estudios regionales y globales. Para ello, también es necesario facilitar el acceso a los datos, lo cual implica conocer la existencia de los datos, saber dónde se encuentran y en qué forma y calidad están disponibles. En el futuro, el PNUMA-HEM brindará este tipo de información.

4. CONTAMINANTES PRIORITARIOS DEL AIRE URBANO

Los contaminantes más comunes del aire en exteriores en un contexto urbano son el monóxido de carbono, el ozono, los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre, las partículas en suspensión y el plomo. Además, cada vez se presta mayor atención a otras sustancias tóxicas del aire, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH, por sus siglas en inglés: *polycyclic aromatic hydrocarbons*), y a los aerosoles ácidos. La medida en que los diferentes elementos contribuyen a los problemas de calidad del aire dependerá de una amplia variedad de factores, entre los cuales están los niveles de industrialización y de control, los principales tipos de transporte y las características meteorológicas y topográficas. Además, cuando se evalúa la exposición humana, se debe considerar la contribución de los contaminantes del aire en interiores, que pueden diferir considerablemente de los contaminantes del aire en exteriores. La elección de contaminantes que deberán ser monitoreados influirá en diversos factores de la red; por ejemplo, en la elección del sitio y en el instrumental. Los niveles esperados de contaminantes también desempeñarán un papel en la determinación de los objetivos de aseguramiento de la calidad (por ejemplo, mayor rigor para elementos traza, menor rigor para contaminantes de alta densidad). Las características principales de estos contaminantes se analizan en el anexo 2.

5. METODOLOGÍAS PARA EL MONITOREO DEL AIRE

Si el enfoque para asegurar la armonización de datos se basa en el rendimiento de los procedimientos de AC y de CC acordados y no en metodologías específicas, se pueden considerar diferentes tecnologías únicamente sobre la base de su capacidad para cumplir los objetivos establecidos para la red y, por ende, los objetivos derivados de calidad de los datos. El anexo 3 incluye un resumen de los rasgos de diferentes metodologías de monitoreo del aire. Las técnicas específicas para contaminantes particulares se explican detalladamente en otros manuales. La OMS y el PNUMA (OMS-PNUMA, 1976) han desarrollado una guía integral para métodos de medición seleccionados. El Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, de la Organización Panamericana de la Salud, la Sociedad de Cooperación Técnica Alemana y el Departamento del Distrito Federal de México, han publicado un manual de introducción al monitoreo de la calidad del aire (Martínez y Romieu, 1997) que describe más detalladamente los métodos de muestreo sobre la base de documentos previos de esta misma serie (PNUMA-OMS, 1994b, 1994c).

Las metodologías de monitoreo del aire se pueden dividir en cuatro tipos genéricos: muestreadores pasivos, muestreadores activos, analizadores automáticos en línea y sensores remotos. Existe un quinto tipo, pero es menos común: los bioindicadores. Las principales ventajas y desventajas de las diferentes técnicas se resumen en el cuadro 1. Los objetivos de calidad de los datos son la herramienta final para seleccionar la tecnología. Otros aspectos que se deben tomar en cuenta para esta selección son las limitaciones económicas locales y la disponibilidad de personal calificado. Generalmente, tiende a producirse un balance entre el costo de los instrumentos, la complejidad, la confiabilidad y el rendimiento. Los sistemas más costosos brindan datos más exactos pero, por lo general, su manejo es más complejo.

Debido a que los costos de inversión y los costos operativos de las técnicas disponibles varían ampliamente, se recomienda elegir la tecnología más sencilla y económica que pueda cumplir con los objetivos de monitoreo establecidos. Muchas de las funciones del monitoreo básico, estudios de sondeo y selección de sitios se pueden realizar con métodos de muestreo activos y pasivos. Los analizadores automáticos son costosos y tienen muchas desventajas operativas; por ello, se deben usar únicamente para mediciones de largo plazo (por lo general, de 5 a 10 años) o cuando los objetivos de calidad de los datos así lo requieran; por ejemplo, para mediciones temporales. Sin embargo, el uso de analizadores automáticos más simples, prácticos y resistentes con tecnologías emergentes, como los sensores de sólidos, puede incrementar sustancialmente su aplicación en el futuro. Los sensores remotos pueden realizar mediciones que integren componentes múltiples a lo largo de una ruta especificada, pero debido a su costo y complejidad, su uso se limita actualmente a aplicaciones especiales. Del mismo modo, a pesar de que las técnicas de biomonitoreo pueden ser una manera más económica y flexible de identificar los niveles efectivos de contaminación o las áreas donde se requiere una medición más detallada, no están suficientemente desarrolladas para que sean aplicadas en programas normalizados de monitoreo.

Las metodologías de medición de la calidad del aire en interiores no difieren sustancialmente de aquellas usadas en exteriores, aunque los sensores remotos y las técnicas excesivamente ruidosas o intensivas, como los muestreadores de alto volumen, son claramente inapropiados. Ya que habitualmente la medición en interiores se orienta a evaluar la exposición humana, se prefieren técnicas portátiles y ligeras. Se requerirá análisis automático si los efectos agudos debido a la exposición a contaminantes son de importancia, a pesar de las dificultades que implica miniaturizar analizadores continuos y complejos así como sistemas de registro de información. Por ello, la mayor parte de mediciones del aire en interiores usan muestreadores pasivos o técnicas de muestreo activas.

Cuadro 1. Técnicas instrumentales de monitoreo del aire

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	COSTO DE INVERSIÓN
Muestreadores pasivos	Muy económicos. Muy simples. Útiles para estudios de línea de base y de sondeo.	No han sido comprobados para algunos contaminantes. Generalmente, solo brindan promedios mensuales y semanales.	\$ 2 a 4 por muestra
Muestreadores activos	Económicos. De fácil manejo. Operación y rendimiento confiables. Existe una base de datos histórica.	Brindan promedios diarios. Requieren mano de obra intensiva. Requieren análisis de laboratorio.	\$ 2.000 a 4.000 por unidad
Analizadores automáticos	Comprobados. Alto rendimiento. Datos horarios. Información en línea y costos directos reducidos.	Complejos. Costosos. Demandan alta calificación. Costos altos y recurrentes.	\$ 10.000 a 20.000 por analizador
Sensores remotos	Brindan datos a lo largo de una ruta o rango definidos. Útiles cerca de fuentes y para mediciones verticales en la atmósfera. Mediciones de componentes múltiples.	Muy complejos y costosos. Difíciles de mantener, operar, calibrar y validar. No siempre son comparables con analizadores convencionales.	> \$ 200.000 por sensor

6. METODOLOGÍAS DE ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD (AC y CC)

6.1 Objetivos del AC y del CC

La práctica adecuada del AC y del CC es necesaria para asegurar la integridad y calidad de los datos a fin de alcanzar los objetivos generales del monitoreo. Los objetivos fundamentales de un programa de AC y CC se pueden resumir como sigue:

- i) Los datos obtenidos de los sistemas de medición deben representar las concentraciones ambientales en las diversas áreas bajo investigación.
- ii) Las mediciones deben ser lo suficientemente exactas y precisas como para alcanzar los objetivos específicos del monitoreo.
- iii) Los datos deben ser comparables y reproducibles. Los resultados de las redes deben ser internamente consistentes y comparables con normas internacionales u otras normas aceptadas, si existen.
- iv) Los resultados deben ser consistentes en el tiempo. Esto es particularmente importante si los datos se van a analizar con miras a determinar tendencias de largo plazo.
- v) Con frecuencia, se requiere una tasa anual de recolección de datos no menor de 75%-80% para cumplir la mayoría de los objetivos. Si se realizan comparaciones estacionales significativas, la pérdida de datos se debe distribuir equitativamente a lo largo del año, en la medida de lo posible.

Objetivos del AC y del CC

- Datos representativos de las condiciones ambientales;
- mediciones exactas y precisas;
- datos comparables y reproducibles;
- resultados trazables con respecto a los patrones metrológicos;
- mediciones consistentes en el tiempo;
- recolección adecuada de datos.

6.2 Características organizativas de los programas de AC y CC

Los aspectos de aseguramiento y control de calidad de los datos se abordan mejor en la etapa inicial del estudio de monitoreo. Los objetivos del monitoreo, así como las limitaciones económicas y la disponibilidad de personal capacitado, influyen en el alcance y complejidad del programa de AC y CC.

Los principios generales de la práctica del AC y del CC se aplicarán a todo tipo de metodología de monitoreo. Sin embargo, los detalles del programa y del personal requerido dependerán en gran medida del tipo de instrumentos usados. Si se usan muestreadores, se deberá dar mayor énfasis al aseguramiento de la calidad de las actividades de laboratorio, incluido el análisis de las muestras recolectadas; si se utilizan analizadores automáticos, se deberá concentrar esfuerzos en las mediciones. En general, la carga de trabajo que implican las actividades de control de calidad de los datos aumentará de acuerdo con la cantidad de datos producidos.

En cualquier circunstancia, es sumamente importante que todo el personal considere que el AC y el CC son un componente integral y vital de cualquier programa de monitoreo de la calidad del aire. Los operadores deben estar estrechamente familiarizados con los diferentes aspectos relacionados con los procedimientos de operación y manejo de datos de AC y CC. Por otro lado, la comunicación constante entre los supervisores de control de calidad y los operadores brinda la oportunidad de intercambiar ideas y examinar los procedimientos de operación. Esta práctica puede ser efectiva para identificar rápidamente los problemas y mejorar la comunicación entre el personal de operación y los supervisores responsables de la implementación formal de los programas de AC. Un programa adecuado de AC también debe detallar los procedimientos destinados a garantizar un flujo efectivo de información entre las autoridades centrales y los operadores, además de proporcionar una adecuada capacitación en procedimientos de CC.

El AC y el CC se deben considerar como un proceso continuo en el marco del cual se pueden implementar procedimientos más complejos a medida que cambian las circunstancias, surge una nueva necesidad o se dispone de recursos adicionales.

Como requisito mínimo de los programas de AC y CC, se recomienda formalizar y documentar la operación de las redes existentes. Los programas completos de aseguramiento de la calidad y de control de calidad usados, por ejemplo, en las redes nacionales no siempre se pueden aplicar en las inspecciones locales. No obstante, las organizaciones más pequeñas que no cuentan con la capacidad de desarrollar programas internos de AC y de CC deben usar metodologías comprobadas en la medida de lo posible y buscar el asesoramiento de laboratorios reconocidos con experiencia en AC y CC.

6.3 Rasgos operacionales de los programas de AC y CC

Todo programa general de AC y CC se puede subdividir en varios componentes funcionales como se describe a continuación. Todas las decisiones se basan en la necesidad de cumplir los objetivos del monitoreo y los propósitos de calidad de los datos derivados de ellos (sección 2).

Componentes operacionales del AC y CC

- Objetivos generales del monitoreo;
- objetivos de calidad de los datos, derivados de los anteriores;
- estructuras de diseño y de manejo de redes;
- selección de sitios de monitoreo representativos;
- adopción de instrumental efectivo en función de los costos;
- operación y mantenimiento de los sistemas;
- establecimiento de una cadena de calibración y de trazabilidad, y
- verificación, validación y uso de datos.

6.3.1 Diseño y manejo de redes

No existe ninguna regla fija para el diseño de redes, ya que todas las decisiones estarán determinadas, en última instancia, por los objetivos generales del monitoreo. En la práctica, el número y la distribución de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire requeridas en cualquier red de extensión dependen del área cubierta, la variabilidad espacial de los contaminantes medidos y de los datos necesarios para su uso. Si la identificación o cuantificación de los peligros para la salud pública asociados con la contaminación del aire es un factor importante, el diseño de redes debe considerar la necesidad de estudios epidemiológicos y de la información derivada de ellos. Se pueden requerir enfoques relacionados con el sitio o con el contaminante.

Las redes nacionales pueden tener diversas funciones. Esto ocurre a menudo con los programas de medición de contaminantes múltiples (Bower et al., 1985). De manera alternativa, las redes se pueden optimizar para realizar tareas específicas, tales como evaluar la exposición de los ecosistemas o determinar si se cumplen los requisitos establecidos para contaminantes individuales (Bower et al., 1991b). En general, este enfoque ofrece ventajas financieras y logísticas, pero obviamente no se puede optimizar para todas las funciones de la red.

Se pueden identificar dos enfoques diferentes sobre el diseño de la red, apropiados para el ámbito nacional o local. El primer enfoque usa un patrón de localización diseñado a

partir de cuadrículas para proporcionar información detallada sobre la variabilidad espacial y los patrones resultantes de exposición de contaminantes. Una técnica más flexible incluye la localización de estaciones de monitoreo o sitios de muestreo en lugares representativos, seleccionados cuidadosamente sobre la base de los usos requeridos para la información y de los patrones conocidos de emisión y dispersión de los contaminantes bajo estudio. Este enfoque requiere el establecimiento de menos sitios y, en consecuencia, su implementación es más económica; sin embargo, los sitios se deben seleccionar cuidadosamente si se quiere que los datos medidos sean significativos.

La adopción de principios adecuados de organización y administración también puede ser importante para asegurar el éxito del programa de monitoreo del aire. Por lo general, las redes se pueden organizar de manera centralizada —donde una organización está a cargo de todas las actividades vinculadas con la operación, el AC y el manejo de datos— o descentralizada —donde algunas o todas las responsabilidades mencionadas se delegan a otras entidades—. Ambos métodos tienen ventajas y desventajas, pero en las redes demasiado descentralizadas se corre el riesgo de duplicar esfuerzos, de experimentar una logística demasiado compleja y problemas de gestión, así como inconsistencias en la implementación de las metodologías de AC y CC.

Los principios generales del diseño de redes se desarrollan detalladamente en otras publicaciones de la OMS y el PNUMA (OMS y PNUMA, 1977; OMS, 1976), así como en Martínez y Romieu (1997). En la siguiente sección se detallan las metodologías de selección de sitios.

6.3.2 Selección de sitios

En las ciudades, el monitoreo se realiza generalmente en sitios seleccionados, y no en puntos localizados en una cuadrícula. Los sitios deben ser representativos de tipos específicos de lugares de la ciudad; por ejemplo, el centro de la zona urbana, zonas industriales, residenciales o en las aceras (*kerbside*). La selección apropiada debe considerar diversos datos; entre ellos, los siguientes:

Objetivos generales del monitoreo. Estos generalmente determinarán los tipos apropiados de áreas seleccionadas para el estudio. Por ejemplo, el monitoreo orientado hacia el tránsito puede incluir estaciones ubicadas en zonas de tránsito peatonal o cerca de las carreteras, mientras que los estudios epidemiológicos pondrán énfasis en los entornos periurbanos *versus* los entornos céntricos donde se produce la exposición humana.

Fuentes y emisiones. La recopilación de datos de emisiones generalmente es un importante primer paso en la selección de los sitios. Si no es posible hacer un inventario total de emisiones, pueden resultar útiles las estadísticas referidas a la distribución de la población y al uso de vehículos automotores.

Meteorología y topografía. Las condiciones meteorológicas y las características topográficas predominantes influirán en la dispersión de contaminantes del aire y, en el caso de contaminantes secundarios, en su producción en la atmósfera. Si se usan modelos adecuados de dispersión, junto con datos de emisiones, se podrá obtener una evaluación preliminar de las concentraciones probables de contaminantes y se identificarán los posibles "puntos clave". Las mediciones de contaminantes posteriores también se pueden usar para probar los modelos en los que se fundamentan las predicciones y brindarán una base para efectuar predicciones en las áreas donde el monitoreo no es posible.

Calidad del aire. Es probable que en las ciudades blanco ya se haya realizado un monitoreo. De no ser así, es posible diseñar estudios de sondeo para proporcionar información sobre los problemas de contaminación en la localidad. Estas inspecciones suponen el uso de muestreadores pasivos y de laboratorios de monitoreo móviles.

Simulaciones de los modelos. Si estuviesen disponibles, los resultados de las simulaciones de los modelos se pueden usar para predecir la dispersión o la deposición del contaminante, lo que puede ser de ayuda en la selección de sitios.

Otros datos. Estos pueden incluir información demográfica, de población, de salud y de uso del suelo. Esta clase de información servirá para identificar los efectos e impactos probables en la salud de la exposición de la población a los principales contaminantes del aire.

Selección de sitios

Los requisitos para esta tarea deben plantearse en función de los siguientes puntos:

- objetivos del monitoreo;
- fuentes y emisiones en el área;
- meteorología y topografía;
- información sobre calidad del aire;
- simulaciones de los modelos;
- información demográfica, de salud y uso del suelo;

y condiciones del lugar:

- accesibilidad (y vandalismo potencial);
- seguridad;
- infraestructura (electricidad, teléfono, etcétera).

El proceso de selección de sitios en una ciudad debe considerar la distribución de los principales contaminantes gaseosos dentro del área urbana. Sin embargo, hay vacíos en nuestro conocimiento de la distribución en el caso de algunos contaminantes, tales como el ozono. Tal vez no sea posible optimizar las mediciones para todos los parámetros de calidad del aire en una ubicación urbana.

La ubicación en un nivel de microescala es importante para asegurar que las mediciones van a ser significativas y representativas. Si se evalúan las concentraciones de línea de base, las estaciones de monitoreo deben separarse adecuadamente de las fuentes locales de contaminantes y de los vertederos. También es importante comprobar la aerodinámica y las condiciones de seguridad del sitio. Algunas consideraciones prácticas también sirven para seleccionar los sitios. Estos deben ser accesibles para las visitas, pero también se deben tomar en cuenta las posibilidades de interferencia del público y vandalismo. Deben existir conexiones eléctricas para el análisis de contaminantes y la infraestructura de la estación, además de un enlace telefónico para la telemetría de datos (en caso de que se use).

6.3.3 Evaluación y selección del equipo

Se debe seleccionar el método más sencillo que cumpla con los objetivos planteados para el monitoreo. Un equipo inapropiado, demasiado complejo o proclive a fallas puede interrumpir severamente el desempeño general de la red, lo que afectaría la utilidad de los datos recopilados. Si se investigan picos de concentración en el corto plazo o los efectos graves de estos picos sobre la salud, sobre el ecosistema y sobre el bienestar, se requerirán analizadores automáticos. En contraste, si solo son de importancia los niveles de base o las tendencias en el largo plazo, resultará adecuado el uso de muestreadores activos o pasivos.

Los analizadores automáticos y los sensores remotos requieren una selección muy cuidadosa. No basta con evaluar las especificaciones del equipo. Algunos parámetros instrumentales se pueden cuantificar fácilmente y por ello a menudo son citados por los fabricantes; entre ellos están especificaciones tales como la linealidad y el tiempo de respuesta, la exactitud y la precisión, el ruido y la desviación, el umbral y rango de detección. Si bien estos factores son importantes, se requiere mayor información. Otras características instrumentales, aunque no están disponibles tan fácilmente, pueden ser esenciales en un contexto práctico; entre estos rasgos tenemos la confiabilidad y la facilidad de operación, la compatibilidad con el equipo ya existente, los requerimientos de mantenimiento y calibración y, especialmente en redes remotas, la capacidad para operar sin supervisión durante largos periodos.

Para elegir el equipo puede ser conveniente realizar una prueba integral de los tipos de analizadores preseleccionados. Si hay unidades de demostración disponibles, antes de hacer la selección el equipo se debe evaluar a fondo, tanto en el laboratorio como bajo condiciones reales de operación en el campo. Si no es posible realizar pruebas in situ, or-

ganizaciones como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)¹ o TÜV² (Technischer Überwachungs-Verein) ayudarán a identificar equipos que cumplan con las normas mínimas de desempeño establecidas.

Como regla general, en los estudios de monitoreo solo se deben usar métodos de medición e instrumentos comprobados y aceptados.

6.3.4 Infraestructura del sitio y operación de rutina

Luego de seleccionar los sitios de monitoreo y los analizadores adecuados, el siguiente componente de importancia en todo esfuerzo de AC y de CC es el diseño del sistema de muestreo. La configuración del muestreo es un componente crucial y a menudo pasado por alto en el sistema de monitoreo, ya que puede determinar la exactitud y representatividad de todas las mediciones realizadas.

Algunos requisitos comunes a los muestreadores activos y a los analizadores automáticos en los diferentes sistemas de muestreo son los siguientes:

- i) Las concentraciones de todos los contaminantes de interés medidos no se deben alterar cuando pasan a través del sistema de muestreo. Esto puede requerir el uso de materiales inertes si se están estudiando gases reactivos.
- ii) El tiempo de permanencia de los gases en el sistema se debe minimizar y el diseño debe tratar de reducir la interacción entre la corriente de aire y los materiales de muestreo.
- iii) Para minimizar el retraso en la respuesta del sistema, la tasa de flujo total debe ser lo suficientemente alta para producir un flujo excesivo respecto a los requerimientos de la tasa total de flujo del analizador.
- iv) Se debe minimizar la caída de presión dentro del sistema de muestreo, ya que esta afecta el resultado de los detectores del contador de fotones o iones y electrones comúnmente empleados en los analizadores de gas.
- v) Cualquier sustancia que pudiera dificultar el análisis o la operación de los analizadores, como partículas y agua condensada, deben removerse de la muestra.

¹ Los métodos apropiados se publican en el Registro Federal como "aprobados por la EPA" para el monitoreo oficial de la calidad del aire de contaminantes criterio. Esto no incluye métodos destinados a evaluar contaminantes no criterio. Hay copias gratuitas disponibles en el Center for Environmental Research Information, Office of Research and Development, US EPA 26 W. Martin Luther King Drive, Cincinnati OH 45268, USA.

² TÜV Bayern Zentrale, P. O. Box 210420, D-80674, Munich, Alemania, fax: + 49 89 5791 1551.

-
-
- vi) El sistema de muestreo debe ser confiable y fácil de mantener. Si los tubos colectores no se limpian cuidadosamente, pueden causar una pérdida importante en la muestra de los gases reactivos. Es necesario limpiarlos en intervalos regulares.

En vista de la rigidez (e incompatibilidad mutua) de algunos de los criterios mencionados, puede que aún no se haya diseñado el sistema de muestreo perfecto. En la práctica, el diseño adoptado generalmente depende de un equilibrio entre los gases bajo estudio, los analizadores usados y los recursos disponibles.

También se debe destacar la importancia del control de la temperatura en las estaciones de monitoreo. Muchos analizadores de gas tienen un coeficiente de respuesta significativo a la temperatura y algunos pueden fallar bajo temperaturas extremas. Se requiere un buen control térmico del equipo a través del uso de aire acondicionado y calentadores, según convenga.

Las visitas documentadas y frecuentes al sitio también constituyen un componente esencial de todo esquema de AC y CC, aunque la frecuencia de visitas requeridas varía de una red a otra. Los sistemas de telemetría pueden proporcionar un método eficiente y efectivo en función de los costos para la adquisición de datos a partir de redes con un gran número de analizadores automáticos, pero su adopción no excluye la necesidad de que el personal efectúe visitas regulares al sitio y de que la información se valide. Estas visitas se deben realizar a medida que surjan problemas de operación, limitaciones geográficas o cuando el personal disponible lo permita.

Diversas operaciones esenciales para maximizar la integridad de los datos y la tasa de recolección se deben llevar a cabo in situ. Estas incluyen las siguientes:

- i) Examinar todos los datos obtenidos en el registro desde la última visita.
- ii) Asegurar el funcionamiento adecuado del equipo, de acuerdo con los procedimientos normalizados de operación.
- iii) Calibrar los instrumentos y realizar verificaciones, según convenga.
- iv) Minimizar toda inoperatividad de los instrumentos hasta donde sea posible, mediante la previsión de problemas antes de que se agraven.
- v) Ejecutar funciones de rutina esenciales, tales como cambios de los filtros para partículas y limpieza del tubo colector.
- vi) Realizar auditorías internas en los sistemas de calibración automática (si estuvieran instalados).
- vii) Instalar un equipo nuevo o reemplazar las unidades cuando sea necesario.
- viii) Asegurar que se cumplan los criterios iniciales de localización.

Para realizar estas funciones de manera eficiente y sistemática, se debe crear un calendario de visitas regulares a todos los sitios de monitoreo (se suele elegir una frecuencia semanal o mensual). Se debe llenar un registro integral de calibración y una lista de verificación de los instrumentos después de cada visita para una auditoría posterior de AC y CC.

Funciones de la visita al sitio

- Revisar todos los datos obtenidos en el registro desde la última visita;
- Asegurar el funcionamiento adecuado del equipo;
- Realizar controles de calibración y diagnóstico;
- Anticipar problemas futuros;
- Cambiar filtros y limpiar los tubos colectores;
- Instalar y reemplazar el equipo, y
- Verificar las condiciones externas del sitio.

6.3.5 Mantenimiento y calibración del equipo

La importancia de los procedimientos de mantenimiento para los analizadores de la calidad del aire nunca será suficientemente enfatizada. Solo a través del tratamiento adecuado de los instrumentos, los sistemas de monitoreo podrán operar satisfactoriamente y durante periodos prolongados en el campo. En todos los casos, los cronogramas para el reemplazo de las partes que se pueden deteriorar, los controles de diagnóstico y la puesta a punto del equipo deben seguir las recomendaciones del fabricante. El tratamiento de los analizadores automáticos de contaminación del aire producirá sin duda gastos operativos significativos, tanto en lo que se refiere a recursos financieros como a recursos de personal capacitado. El uso de analizadores automáticos puede no ser aconsejable en los países donde no existe la infraestructura ni los recursos apropiados para ello.

Es importante reconocer que se necesitarán recursos en una medida que rebasará ampliamente los costos iniciales de inversión de capital si se elige usar tecnologías complejas de monitoreo del aire. Será necesario invertir capital de manera permanente en el equipo a fin de apoyar los esfuerzos de monitoreo, mantener el equipo en estado operativo y asegurar que se recolecten datos significativos.

La calibración adecuada de los equipos de monitoreo automático es esencial para obtener datos de calidad del aire exactos y reproducibles. Para la mayoría de contaminantes gaseosos del aire, esto incluye el uso de cilindros para la transferencia de gas o tubos permeables para generar un rango reproducible en el equipo y así determinar la respuesta del sistema a una concentración predeterminada del contaminante del aire bajo análisis.

Una determinación adicional correspondiente al “punto cero” o la respuesta del sistema cuando no existe ningún contaminante (una medición hecha usando cilindros de gas cero o aire depurado apropiadamente) es suficiente para proporcionar una “calibración de dos puntos”, adecuada para muchas finalidades. En algunos casos, se requerirán calibraciones “de múltiples puntos” que incluyen rangos de concentración; por ejemplo, después del servicio o de la reparación del equipo o si se sospecha de la existencia de problemas de linealidad.

Las especificaciones del fabricante sobre el cilindro o el tubo permeable no siempre son confiables para las calibraciones de campo. Se deben usar mezclas de gases certificadas o fuentes trazables a patrones aceptados o absolutos de metrología (por ejemplo, el U. S. National Institute of Science and Technology [NIST], el U. K. National Physical Laboratory [LNF], etcétera). Más aún, es altamente deseable que las fuentes de calibración se prueben en el laboratorio antes de usarse en el sitio o durante su vida operativa. Para este fin se pueden usar varias técnicas de calibración primarias (Lampert y Stevenson, 1991) que se resumen en el cuadro 2. En general, se deben usar dos o más métodos de estos para cada calibración a fin de minimizar el riesgo de errores sistemáticos.

Los patrones primarios de ozono se basan en el método de fotometría ultravioleta y usan un fotómetro diseñado especialmente para esta finalidad, además de un generador de ozono de estabilidad conocida. Para efectos de control, el fotómetro usado en la normalización se debe comparar con otros analizadores, usando el mismo generador de ozono.

La dilución dinámica de los cilindros de alta concentración es un método de calibración confiable para los analizadores de NO y SO₂. Una ventaja de este método es que los cilindros de alta concentración generalmente son más estables que los de baja concentración (los habitualmente usados para las calibraciones de instrumentos en el campo). Para garantizar flujos confiables del gas del cilindro y del gas de dilución (con aire cero), se deben usar controladores de flujo en ambos canales.

La dilución estática de una pequeña cantidad de contaminantes en un recipiente de volumen conocido se puede usar para preparar estándares de NO, NO₂, CO y SO₂. Sin embargo, se tiene que construir una instalación especial para aplicar esta técnica.

La titulación en fase gaseosa (TFG) se puede usar para comparar las calibraciones primarias de NO y de ozono. Este método usa la reacción entre el NO y el ozono para producir NO₂ y O₂. El método de TFG también permite verificar la eficiencia del convertidor de NO₂ a NO en los analizadores de NO_x por quimioluminiscencia que haya que chequear.

Cuadro 2. Métodos primarios para la calibración de gas y la trazabilidad

(+ = método apropiado; — = no aplicable)

Método/contaminante	CO	SO ₂	NO	NO ₂	O ₃	Observaciones sobre la trazabilidad del método
Cilindro comercial	+	—	—	—	—	Concentraciones no asumidas; se deben verificar a través de métodos independientes, según convenga
Tubos permeables	—	+	—	+	—	Absoluto (en peso); los tubos comerciales deben ser trazables respecto a los estándares
Dilución estática	+	+	+	+	—	Método absoluto (volumen)
Dilución dinámica	+	+	+	+	—	Depende del desempeño del controlador del cilindro y del flujo de masa
Titulación en fase gaseosa	—	—	+	—	+	Técnicas comparativas y no absolutas (O ₃ / NO)
Fotometría UV	—	—	—	—	+	Método absoluto (absorción UV)

La frecuencia y el tipo de calibraciones de campo requeridas por un analizador se deben definir en el plan de aseguramiento de calidad para la red. Un esquema habitual incluirá la calibración automática cada 24 horas a través del uso en el lugar de hornos de tubos permeables o cilindros de gas y la calibración manual mediante fuentes independientes usadas durante cada visita. Además de estos procedimientos específicos del sitio, debe disponerse todo lo necesario para las intercalibraciones de la red realizadas en forma regular (generalmente, de 6 a 12 meses) por un equipo de auditoría.

Estas auditorías del desempeño son una evaluación *cuantitativa* de los sistemas de medición (incluidas la adquisición y la reducción de datos). Generalmente, incluyen la medición o análisis de un material de referencia asociado con un valor o composición conocida (y trazable respecto a los estándares metrológicos). Si bien una auditoría del desempeño determinará cuándo un sistema de medición está fuera de control, la acción correctiva apropiada no siempre será evidente. En estos casos, puede requerirse una auditoría de los sistemas técnicos. Esta es una evaluación *cualitativa* in situ de un sistema de medición que permite la evaluación y documentación de todas las instalaciones, equipos, sistemas, registros, validación de datos, operaciones, actividades de mantenimiento, pro-

cedimientos de calibración, requisitos de reporte y procedimientos de CC según se definen en el plan de aseguramiento de la calidad adoptado para toda la red.

Este enfoque integral de la calibración de redes no siempre es apropiado o posible, en especial en el caso de países que no cuentan con laboratorios equipados para la preparación de gases patrón primarios o su metrología. Sin embargo, cuando se usan sistemas avanzados de monitoreo, es importante que se establezcan, correspondientemente, sistemas sofisticados de calibración, a fin de asegurar la integridad de los datos. En general, se podrá asegurar una trazabilidad y una armonización adecuadas si se cuenta con una provisión de gases patrón de laboratorios o empresas apropiadamente equipados, además de auditorías internas y de auditorías del desempeño externo y de los sistemas técnicos con materiales normalizados de referencia, trazables a los laboratorios nacionales (por ejemplo, el NIST y el NPL).

Las técnicas primarias de calibración e intercalibración de gases se tratan con mayor detalle en el volumen II de esta serie (PNUMA-OMS, 1994a).

6.3.6 Revisión y validación de datos

Además de todas las guías de infraestructura y de operación de la red que hemos descrito hasta el momento, a fin de asegurar una implementación exitosa se deben tomar medidas adicionales para la aplicación del control de la calidad y del aseguramiento de la calidad con el objetivo de maximizar la integridad de los datos. En cualquier red de monitoreo de aire, aunque esté bien implementada u operada, un mal funcionamiento del equipo, por errores humanos, fallas de energía, interferencias y otros problemas con la red de monitoreo del aire, se pueden generar datos incorrectos: estos se deben eliminar antes de crear o usar una base de datos final y validada.

Muchos sistemas de telemetría y de monitoreo de datos disponibles en el mercado permiten identificar datos y factores de calibración sospechosos y fuera de rango. Sin embargo, la aplicación de criterios rígidos en la aceptación de datos y la exclusión automática de los datos señalados no necesariamente garantizan una óptima calidad. Por ejemplo, una consecuencia común de seguir estas rutinas preestablecidas de rechazo de datos es la exclusión de mediciones extremas de contaminantes (pero válidas) sencillamente porque están fuera de los valores límite establecidos o aceptados.

La revisión continua de los datos producidos por personal capacitado constituye un enfoque más flexible para la validación de datos. Este proceso de revisión es un componente importante de los programas de aseguramiento de la calidad de la red; sirve tanto para excluir los datos erróneos o inválidos como para informar a tiempo a los operadores de campo sobre cualquier funcionamiento inadecuado del equipo o sobre cualquier problema que requiera atención. Para la revisión de datos se pueden usar resúmenes diarios de datos y compilaciones regulares (mensuales y estacionales) de los datos gráficos y cuadros de control de calibraciones. La experiencia, el sentido común y la iniciativa del

personal encargado de examinar los datos son prerequisites para el éxito del proceso de revisión.

**Validación de datos: una operación
de alta calificación**

- Revisar rápidamente todos los datos;
- Usar listas y gráficos;
- aprovechar el sentido común y la experiencia.

Los indicadores obvios para corregir el desempeño de los analizadores son los valores cero y el valor de rango. Si varían en gran medida dentro de un periodo determinado, los datos ambientales recolectados se pueden considerar cuestionables. Todos los valores negativos de los contaminantes se deben rechazar a menos que provengan de un grado aceptable de inexactitud del instrumento (una característica común de muchos tipos de analizadores continuos). Además, los límites de detección superiores e inferiores del equipo determinan los valores más altos y más bajos posibles; las lecturas que estén fuera de este rango se deben eliminar de la base final de datos.

Los valores de los datos que muestran alteraciones súbitas y los lapsos de ascenso y caída excesivos también se deben tomar con cuidado, aunque ciertas condiciones atmosféricas o la presencia de fuentes contaminantes cercanas pueden dar lugar a fluctuaciones extremas en los niveles de contaminantes ambientales. Bower (1989) trata con detalle algunos de estos criterios.

Algunos criterios menos formales también se pueden usar para evaluar la calidad de los datos y eliminar los datos incorrectos:

- i) Las características específicas para una estación particular pueden ser un indicador importante de la calidad de los datos. Los alrededores de la estación, el grado de protección, las fuentes y los puntos receptores locales pueden influir en las mediciones. Por ejemplo, no se esperaría hallar niveles altos de NO en un sitio rural muy temprano por la mañana, pero estos niveles serían fácilmente explicables en un área urbana congestionada por las emisiones del tránsito.
- ii) La fuerte relación existente entre las concentraciones de contaminantes y la dispersión atmosférica u otras condiciones meteorológicas también pueden ser un indicador positivo de la integridad de los datos. Cuando los datos son dudosos, se deben considerar parámetros tales como la estación, la velocidad y dirección del viento, la precipitación y la radiación solar. Por ejemplo,

normalmente se esperaría que los altos niveles de ozono se asocien con condiciones anticiclónicas soleadas o, más excepcionalmente, que se produzcan debido a incursiones estratosféricas asociadas con la actividad frontal. Los altos niveles de ozono asociados con climas lluviosos y sin brillo se deben considerar como preocupantes.

- iii) La hora del día también es importante, ya que las variaciones diurnas en los patrones de emisión y en las condiciones meteorológicas pueden ejercer una influencia particularmente fuerte en las concentraciones de O_3 y NO_x . Por ejemplo, altos niveles de ozono durante la noche —si bien posibles bajo ciertas condiciones— serían sumamente sospechosos a menos que se asocien con alguna evidencia de inicio de transporte vertical (por ejemplo, un aumento súbito en la velocidad del viento).
- iv) La relación entre los diferentes contaminantes también puede aportar claves para determinar la validez de los datos; por ejemplo, no se esperarían altos niveles de ozono si se incrementan los niveles de NO_x .
- v) La continuidad temporal y espacial de los niveles de contaminación es otro factor que se debe considerar al examinar los datos medidos. Los resultados obtenidos de una red a menudo pueden indicar integralmente si las observaciones hechas en un sitio particular son excepcionales o cuestionables.

Si bien algunas de las técnicas de revisión discutidas se pueden codificar algorítmicamente y usarse como alertas para identificar datos sospechosos, muchas en la actualidad no se pueden implementar con facilidad para que cumplan estas funciones. Sin embargo, el uso de "sistemas expertos" para validar los datos de las redes de monitoreo puede ser posible en el futuro. Debido a que la revisión "manual" de los datos es un ejercicio que requiere alta capacitación —lo cual incluye un conocimiento adecuado del comportamiento del contaminante, las características del instrumento, experiencia y criterio—, el desarrollo de sistemas expertos para la validación de datos puede ser de utilidad para muchas organizaciones. Sin embargo, en la actualidad se debe evitar la dependencia excesiva en procedimientos automáticos de evaluación y validación de datos.

Aspectos de la revisión de datos

- Historia y características del instrumento;
- factores de calibración y variaciones;
- datos negativos o fuera de rango;
- características del sitio de monitoreo;
- efectos de la meteorología;
- hora del día y año;
- niveles de otros contaminantes, y
- observaciones de otros sitios.

7. USO E INTERCAMBIO DE DATOS

Una base de datos final y validada sobre calidad del aire es, por sí sola, de utilidad limitada. Para que se la aplique en la elaboración de políticas, en el manejo de la contaminación del aire, en la investigación científica sobre sus efectos, los datos se deben cotejar, analizar y diseminar. Los resúmenes anuales —y, de preferencia, mensuales— de datos constituyen un nivel mínimo de la administración de esta información. Estos resúmenes pueden usar métodos sencillos de análisis estadístico y gráfico. Los formatos apropiados para este propósito se pueden diseñar fácilmente (véase, por ejemplo, Broughton et al., 1993). Un reporte más regular de datos, por día u hora, puede ser apropiado para algunos objetivos de la red (por ejemplo, los sistemas de alerta de *smog*), aunque en tales casos, se debe poner de manifiesto que los datos diseminados pueden no estar plenamente validados y la calidad puede no estar asegurada.

La diseminación de datos provisionales o validados solo representa un primer paso para alcanzar los objetivos del monitoreo. Esta información debe proporcionar antecedentes a los encargados de tomar decisiones, así como una base para elaborar y verificar hipótesis científicas y modelos de los procesos relacionados con la calidad del aire y con su impacto en el hombre y su ambiente. Para maximizar el uso de las mediciones ambientales de calidad del aire en su totalidad, se debe contar con datos sobre otros factores socioeconómicos y geográficos compatibles y de calidad óptima. Por ejemplo, el uso de datos para profundizar nuestro conocimiento de los procesos de emisión y dispersión atmosférica que incrementan las concentraciones de contaminantes requiere acceder a mediciones meteorológicas y de emisión. Otro ejemplo: para evaluar el impacto de las condiciones de calidad del aire en el ecosistema o en la salud se requiere información sobre distribuciones poblacionales, epidemiología, factores sociales y efectos sobre la salud.

Generalmente, los datos del monitoreo y de las emisiones se usan para elaborar estrategias de reducción de los efectos; esto es, para manejar la contaminación del aire en el ámbito local o nacional. La importancia de una base de datos de monitoreo mundial, tal como GEMS/Aire, reside en que se puede usar para evaluar el impacto de las medidas de control en el largo plazo y para estimar la situación de las ciudades de las que solo se cuenta con datos limitados, al compararlas con ciudades "representativas" similares.

Las bases de datos de calidad del aire tienen a su disposición una variedad de metodologías analíticas comprobadas, algunas de las cuales se tratan en una publicación de la OMS-PNUMA (OMS-PNUMA, 1980). Sin embargo, en el análisis final, el nivel y los medios apropiados de tratamiento de datos estarán determinados en gran medida por el uso de datos que se ha concebido al inicio. Se debe considerar el uso de sistemas de información geográfica, especialmente cuando se pretende combinar los datos de contaminación con los de epidemiología y otras fuentes coordinadas geográficamente (sociales, económicas y demográficas).

La transmisión de datos puede involucrar varios métodos:

- (1) Papel: bajo la forma de informes o documentos escritos;
- (2) computadora: disquetes o CD-ROM, y
- (3) electrónico: medios de radiodifusión o enlaces directos con la base de datos.

Asimismo, los datos transferidos pueden incluir bases de datos anuales validadas o en borrador, estadísticas promedio y de resumen ya procesadas, o resultados del análisis, gráficos y mapas. Los formatos para la transmisión de datos también se deben armonizar dentro de una red y se deben diseñar según los requisitos y capacidades de la red.

8. RESUMEN

Existe una necesidad clara de información confiable que documente la calidad del aire y la respuesta a las medidas de control en áreas urbanas. Esta información proporciona la base para la toma de decisiones y el desarrollo de estrategias de planificación. Para tener la certeza de que nuestras decisiones estarán bien fundamentadas, se debe garantizar que las mediciones registradas reflejen genuinamente la situación existente; en otras palabras, los datos deben ser de una calidad claramente definida y documentada.

Por lo tanto, el AC y el CC constituyen una característica esencial de cualquier programa exitoso de monitoreo ambiental. En su sentido más amplio, estos procesos cubren todos los aspectos de la operación de una red (desde el diseño de los sistemas y la selección del sitio, pasando por la selección, operación, calibración y mantenimiento del equipo, y la capacitación de los operadores, hasta la revisión y validación de datos). La implementación exitosa de cada componente de un esquema de AC y de CC es necesaria para asegurar el éxito del programa completo y, en consecuencia, del esfuerzo general de monitoreo.

Este documento proporciona una visión panorámica de los principios de AC para el monitoreo de la calidad del aire. Los pasos básicos que se deben seguir en la formulación de un plan de AC se resumen en el recuadro de la sección 1. En el análisis final, las medidas precisas de AC y de CC que necesitará una organización dependerán en gran forma de los objetivos individuales del monitoreo y de los recursos disponibles. La intención al publicar este documento es ayudar a obtener el mejor valor posible —es decir, los datos de más alta calidad— de un sistema de monitoreo de la calidad del aire.

Aseguramiento de la calidad y control de la calidad de los datos

Una reflexión final



Una cadena es únicamente tan fuerte como su eslabón más débil

9. REFERENCIAS

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (1989-1993). Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, vol. I, Principles, EPA 600/9-76-005 (revisado en agosto de 1993); vol. II, Ambient Air Specific Methods, EPA 600/4-77-027a; vol. III, Stationary Source Specific Methods, EPA 600/4-77-027b; vol. IV, Meteorological Measurements, EPA/4-90-003 (revisado en agosto de 1989). Copias disponibles sin costo alguno en el Center for Environment Research Information, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, 26 W. Martin Luther King Drive, Cincinnati, OH 45268, USA.

Bower, J. S. (1989). A Pragmatic View on Optimising Performance of Air Monitoring Networks, *Measurement and Control*, 22.

Bower, J. S.; Lam, K. K. y Lam, S. H. (1985). Air quality in Hong Kong, 1984/5. Informe del HKEPA TR 3.85, Hong Kong.

Bower, J. S.; Broughton, G. F. J.; Dando, M. T. et al. (1991b). Urban NO₂ Concentrations in the UK in 1987, *Atmos. Environ.*, 25B, 2: 267-283.

Broughton, G. F. J.; Bower, J. S.; Stevenson, K. J. et al. (1993). Air Quality in the UK: A Summary of Results from Instrumented Air Monitoring Networks in 1991/92. Stevenage, Warren Spring Laboratory, informe LR 941 (AP).

Lampert, J. E. y Stevenson, K. J. (1991). Primary Calibration Techniques for Air Quality Monitoring. Comunicación presentada en la International Conference on Measurement and the Environment, Londres, 1991.

Martínez, A. P. y Romieu, I. (1997). Introducción al monitoreo atmosférico. México, D. F.: Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud–Sociedad Alemana de Cooperación Técnica GTZ–Departamento del Distrito Federal.

PNUMA-OMS (1994a). GEMS/AIR Methodology Review Handbook, vol. 2. Primary Standard Calibration Methods and Network Intercalibrations for Air Quality Monitoring.

PNUMA-OMS (1994b). GEMS/AIR Methodology Review Handbook, vol. 3. Measurement of Suspended Particulate Matter in Ambient Air.

PNUMA-OMS (1994c). GEMS/AIR Methodology Review Handbook, vol. 4. Active and Passive Sampling Methodologies for Measurement of Air Quality.

OMS (1976). Manual on Urban Air Quality Management. Copenhagen: Organización Mundial de la Salud (Oficina Regional de Europa).

OMS-PNUMA (1976). GEMS: Selected Methods of Measuring Air Pollutants. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

OMS-PNUMA (1977). GEMS: Air Monitoring Programme Design for Urban and Industrial Areas. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

OMS-PNUMA (1980). Analysing and Interpreting Air Monitoring Data. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

OMS-PNUMA (1992). Urban Air Pollution Monitoring. Report of a Meeting of UNEP/WHO Government-designated Experts. Ginebra, 5-8 de noviembre de 1991, WHO/PEP/92.2, UNEP/GEMS/92.A.1, Ginebra.

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

AC y CC	Aseguramiento de la calidad y control de calidad
CEN	Comité Europeo para la Normalización
CNUMAD	Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo
COV	Compuestos orgánicos volátiles
DMA	Dirección del Medio Ambiente del Reino Unido
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
GEMS	United Nations Global Environment Monitoring System, Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente
ISO	Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization)
MPS	Material particulado en suspensión
NIST	National Institute of Science and Technology, Estados Unidos
NPL	National Physical Laboratory, Reino Unido
OCD	Objetivo de calidad de los datos
OCDE	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos
OMS	Organización Mundial de la Salud
PAH	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (<i>polycyclic aromatic hydrocarbons</i>)
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
SIG	Sistemas de información geográfica
TFG	Titulación en fase gaseosa
TÜV	Technischer Überwachungs-Verein
UV	Ultravioleta

ANEXO 1: AGENDA 21 DE LA CNUMAD Y MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo de 1992 (CNUMAD) identificó el deterioro ambiental en las ciudades como un área que requiere atención inmediata. La Agenda 21, el plan de acción de desarrollo sostenible para el siglo XXI, destaca, en distintos capítulos, la importancia de la contaminación del aire urbano y exhorta a los gobiernos nacionales, locales y a la comunidad internacional a incrementar sus esfuerzos para obtener datos confiables y accesibles sobre las concentraciones, fuentes y efectos de los contaminantes. Al respecto, la Agenda 21 presenta los siguientes planteamientos:

- 1) El desarrollo sostenible requiere la disponibilidad de información exacta y oportuna para ayudar a las autoridades y al público en general a tomar decisiones fundamentadas.
- 2) Es necesario fortalecer las actividades de información de Earthwatch, especialmente en las áreas de aire urbano e investigación de la atmósfera mundial.
- 3) Las organizaciones internacionales que participan en las actividades de recopilación de información sectorial deben formular guías para la evaluación y recolección de datos de forma coordinada y armonizada en el ámbito nacional e internacional.
- 4) Se requiere desarrollar tecnología adecuada para combatir la contaminación atmosférica, sobre la base de una evaluación de riesgos a partir de investigaciones epidemiológicas, a fin de introducir procesos de producción racionales desde el punto de vista ambiental y un sistema de transporte de masas adecuado y seguro. En todas las grandes ciudades se deben instalar programas rigurosos y sistemas de control de la contaminación atmosférica con énfasis en las redes de monitoreo.

ANEXO 2: CONTAMINANTES PRIORITARIOS DEL AIRE URBANO

Presentamos aquí una revisión breve de algunos de los principales contaminantes del aire. Se puede obtener información más detallada de una variedad de fuentes, incluida una serie de documentos y guías de la OMS sobre contaminantes del aire urbano (OMS, 1977-79) y una publicación reciente de la Dirección del Medio Ambiente del Reino Unido (DMA) (QUARG, 1993).

Dióxido de azufre (SO₂)

Este contaminante es un gas ácido incoloro y asfixiante. Las emisiones naturales representan cerca de la mitad de todo el SO₂ atmosférico (PNUMA, 1991). El SO₂ producido por el hombre se crea por la combustión de los componentes de azufre que son un constituyente natural del carbón y el petróleo. Las principales fuentes mundiales incluyen el uso doméstico de combustibles, procesos industriales y plantas de energía. Los vehículos automotores con motor diésel también emiten pequeñas cantidades.

Las altas concentraciones de este contaminante pueden irritar el aparato respiratorio, producir tos o cambios (generalmente reversibles) en la función pulmonar. Este gas también corroe las construcciones de piedra y otros materiales, puede dañar las plantas y contribuye a la formación de lluvia ácida y partículas secundarias.

Las concentraciones ambientales de SO₂ generalmente son más altas en ciudades templadas donde se usa el carbón para la calefacción doméstica. La tendencia a usar combustibles o técnicas de calefacción más limpias ha reducido sustancialmente los niveles de contaminación en algunas ciudades durante los últimos 20 ó 30 años. Las concentraciones ambientales de SO₂ son generalmente más altas en las zonas céntricas de la ciudad, en la acera (*kerbside*) y alrededor de áreas industriales.

Material particulado en suspensión (MPS)

Este término abarca la gama de sólidos finos o líquidos dispersos en la atmósfera, en contraposición con las fracciones de tamaño más grande que se sedimentan rápidamente debido a la fuerza de gravedad. El MPS fue, junto con el SO₂, el primer contaminante que se estudió en las zonas urbanas.

El MPS puede provenir de una gran variedad de fuentes. Estas incluyen la combustión del carbón, los motores diésel, las actividades de construcción e industriales, aerosoles secundarios (formados por la reacción del aire con el amoníaco, los óxidos de azufre y el nitrógeno), así como fuentes naturales, tales como la erosión del suelo y el polen de las plantas. Las partículas varían ampliamente en función del tamaño, la negrura, la composición química y sus posibles efectos sobre la salud. Los sistemas de defensa

biológica del cuerpo neutralizan o eliminan las partículas más grandes. Las partículas más pequeñas (de menos de 10 micrómetros de diámetro) pueden penetrar en los pulmones y generar irritación u obstrucción. Algunos componentes de las partículas finas, tales como el humo del diésel (gasóleo), pueden ser carcinógenos.

Las concentraciones de partículas en zonas urbanas dependen en gran medida de los tipos de fuente y de los patrones de emisión. En consecuencia, las concentraciones pueden variar dentro de las ciudades y de una ciudad a otra.

Óxido de nitrógeno (NO_x)

Las emisiones de óxido de nitrógeno provienen en cantidades similares de dos fuentes: naturales y producidas por el hombre. Sin embargo, las emisiones naturales tienden a distribuirse por igual en el mundo, pero las producidas por el hombre se concentran en los centros poblados (PNUMA, 1991). Los óxidos de nitrógeno más importantes en la atmósfera urbana son el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). De las dos especies, el NO₂ tiene impactos más significativos en la salud y en el ecosistema. También se mide fácilmente mediante diversas metodologías.

Las principales fuentes externas de NO₂ en zonas urbanas son la combustión de vehículos automotores, la producción de energía, las plantas de calefacción y los procesos industriales. Desde estas fuentes se emiten cantidades relativamente limitadas de NO₂; la mayoría de NO₂ en la atmósfera se forma a partir de la oxidación de las emisiones de los óxidos nítricos (NO).

El dióxido de nitrógeno irrita las vías respiratorias y es tóxico en altas concentraciones. Es uno de los componentes del *smog* fotoquímico (véase *ozono*), la lluvia ácida y las partículas secundarias. Junto con el SO₂ y el ozono, también puede dañar los cultivos y la vegetación.

Generalmente, las concentraciones en las zonas urbanas surgen de las emisiones del tránsito. Las concentraciones más altas se producen en las zonas centrales y cerca de las carreteras principales.

Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono se produce por la combustión incompleta de los combustibles fósiles o de los materiales orgánicos y su principal fuente exterior son los vehículos motorizados. Tiene una gran afinidad con la hemoglobina, la sustancia que transporta el oxígeno en la sangre. Cuando el oxígeno es desplazado por el CO, puede conducir progresivamente a la privación de oxígeno y, en casos extremos, a la muerte.

La distribución espacial de las concentraciones de CO en zonas urbanas depende en gran forma del tráfico y, por ello, tiende a seguir la del NO₂. Los niveles son más altos en la acera (*kerbside*), pero disminuyen rápidamente a medida que uno se aleja de las pistas.

Plomo (Pb)

Este es el más común de los metales pesados contaminantes y su única fuente son las emisiones de los vehículos automotores que usan gasolina con plomo. Las emisiones de algunas actividades industriales también pueden ser significativas en escalas locales pequeñas. El plomo es un veneno acumulativo y, en grandes cantidades en el organismo, puede causar daños al sistema nervioso central y producir cambios de conducta y deficiencias intelectuales. Debido a que el tránsito es la principal fuente urbana en los países que usan gasolina con plomo, las distribuciones espaciales tenderán a seguir estrechamente las del CO y NO₂.

Ozono

Este es un contaminante secundario del aire, formado en la tropósfera a partir de las reacciones atmosféricas entre los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de la luz solar. El ozono reacciona fácilmente con materiales biológicos; puede dañar la vegetación y causar irritación de ojos, nariz y garganta, así como tener efectos agudos en las vías respiratorias y dificultades de respiración. El ozono también ataca las pinturas, plásticos y gomas, participa en la formación de lluvia ácida y actúa como un gas de efecto invernadero.

La distribución espacial del ozono es sustancialmente diferente de la que caracteriza a los otros contaminantes comunes del aire urbano. Debido a que se puede formar en la atmósfera en cuestión de horas o días, las concentraciones están temporal y espacialmente separadas de las emisiones de NO_x y COV. Es más, la destrucción química del ozono mediante las emisiones de NO_x cerca de las fuentes resulta en una alta variabilidad de las concentraciones de ozono en escalas espaciales pequeñas. Faltan mediciones sobre dichas variaciones, aunque puede suponerse que las concentraciones urbanas son más bajas donde los niveles de otros contaminantes primarios, como el NO_x y el CO, son más altos.

En la práctica, la exposición de la población al ozono tenderá a ser mayor en el ámbito suburbano que en las zonas centrales de las ciudades y en áreas ubicadas a sotavento de las principales regiones pobladas o industrializadas. Los niveles también tenderán a ser altos en ciudades con topografías de valle, como la ciudad de México, Atenas y Los Angeles.

Otros contaminantes exteriores

Los contaminantes del aire identificados anteriormente se han monitoreado en las zonas urbanas. Sin embargo, recientemente se ha prestado mayor atención a las sustancias tóxicas y al aire ácido. Las sustancias tóxicas del aire incluyen los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) —generados por vehículos automotores, producción de coque y quema de carbón— y los COV, como el benceno (C₆H₆), emitido principalmente por la combustión de la gasolina. Los componentes principales del aire ácido son un aerosol fino de ácido sulfúrico y nítrico (HNO₃ y H₂SO₄, formados por NO₂ y SO₂, respectivamente). Otros contaminantes de interés se enumeran en *Guidelines for Air Quality* de la OMS (OMS, 2000).

Las metodologías de monitoreo, las distribuciones urbanas y los efectos de estos contaminantes no están bien establecidos; se requiere mayor trabajo en estas áreas.

Contaminantes en ambientes interiores

Si bien la calidad del aire generalmente se caracteriza por la medición de las concentraciones de contaminantes en ambientes exteriores, se debe reconocer que los contaminantes en interiores pueden influir en la exposición de las poblaciones y tener efectos sobre la salud.

Los principales contaminantes en ambientes interiores difieren a menudo de aquellos presentes en exteriores. Aunque la calidad del aire en interiores puede ser afectada por las concentraciones ambientales, las tasas de deposición y remoción dentro de los edificios son relativamente altas para la mayoría de contaminantes considerados hasta el momento. De aquí se deduce que los elementos contaminantes con fuentes significativas en interiores suelen ser de la mayor importancia.

Entre los contaminantes clave tenemos al radón de los materiales de construcción y de los suelos; al asbesto (y otras partículas) y al formaldehído presentes en materiales refractarios, planchas de aislamiento de habitaciones y planchas de fibra; al CO, al NO₂ y a las partículas respirables del humo de la calefacción, de la cocina y del cigarrillo. Los materiales orgánicos también pueden ser importantes. Estos incluyen los compuestos volátiles de la combustión, los solventes, los pesticidas, microorganismos y alérgenos viables de seres humanos, animales domésticos y plagas.

Las concentraciones de contaminantes del aire en interiores se caracterizan por su extrema variabilidad temporal y espacial: el problema puede variar en gran medida de un edificio a otro, de región a región y según la época del año. La exposición puede verse afectada por la ventilación del edificio; las técnicas de cocción y calentamiento de alimentos; el sistema de aire acondicionado; la presencia de fumadores y la naturaleza y tipo de edificio. Las inspecciones de calidad del aire en locales cerrados deben prestar especial atención a todos estos factores.

OMS (1977-1997). Environmental Health Criteria. n.ºs 4, 188 (2nd edition) (NO_x); 7 (O₃); 8 (SO₂/SPM) y 13 (CO), Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

OMS (2000). *Guidelines for Air Quality*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

PNUMA (1991). *Urban Air Pollution*. UNEP/GEMS Environmental Library n.º 4, Nairobi: PNUMA.

QUARG (1993). *Urban Air Quality in the UK. The First Report of the Quality of Urban Air Review Group (QUARG)*. ISBN 0 9520771-1-6.

ANEXO 3: METODOLOGÍAS DE MONITOREO DEL AIRE

Las metodologías de monitoreo del aire se pueden dividir en cuatro tipos genéricos: muestreadores pasivos, muestreadores activos, analizadores automáticos en línea y sensores remotos; también es posible hablar de un quinto tipo, menos común: los bioindicadores.

Muestreadores pasivos para especies gaseosas

Estos dispositivos, generalmente en forma de tubo o disco, recolectan una muestra de un contaminante específico mediante la absorción a un sustrato químico seleccionado. Después de la exposición durante un periodo de muestreo específico —usualmente, de unos pocos días a un mes— se retorna el muestreador al laboratorio y se realiza la desorción del contaminante, que se analiza cuantitativamente. El tema de los muestreadores pasivos se discute detalladamente en otro volumen de esta serie (PNUMA/OMS, 1994b).

La ventaja principal del muestreo pasivo es su simplicidad y bajo costo inicial, generalmente unos cuantos dólares por muestreador. En consecuencia, es posible desplegar muchas unidades y generar información útil sobre las distribuciones espaciales del contaminante. Sin embargo, el tiempo de resolución de esta técnica es limitado, ya que solo puede proporcionar información sobre las concentraciones promedio integradas del contaminante.

Debido a su simplicidad y bajo costo inicial, la técnica del muestreo pasivo es apropiada para muchas aplicaciones, ya sea por sí sola o en combinación con analizadores automáticos. Existen técnicas para muchos contaminantes urbanos prioritarios: los elementos para los cuales se dispone de muestreadores pasivos (o bien están en desarrollo) son NO₂, SO₂, NH₃, COV y ozono.

Los muestreadores pasivos son particularmente útiles para los estudios de línea de base, sondeo del área o monitoreo indicativo. También pueden ser útiles en combinación con muestreadores activos o analizadores automáticos. En estos estudios "híbridos", los muestreadores pasivos pueden proporcionar datos geográficos de calidad del aire, mientras que los dispositivos más complejos ofrecen información relacionada con el tiempo, los puntos máximos de concentración y las variaciones diurnas. Este tipo de estudios puede ser particularmente efectivo en función de los costos. Los muestreadores con tubo de difusión para NO₂ se han usado mucho para la selección de sitios de monitoreo y sondeo del área, tanto en la ciudad como en zonas locales de diversos países europeos (Atkins et al., 1987; Bower et al. 1991a; Campbell et al. 1992; PNUMA-OMS 1994b).

Muestreadores activos

A diferencia de los muestreadores pasivos, estos dispositivos requieren energía eléctrica para bombear el aire de la muestra a través de un medio de colección química o física. El volumen adicional de aire de la muestra incrementa la sensibilidad para obtener mediciones promedio diarias. Los muestreadores activos más usados son los burbujeadores acidimétricos para SO₂, el método de filtración de suelos para MPS de la OCDE (ambos se usan conjuntamente) y el método gravimétrico de alto volumen de la EPA para partículas totales o respirables. Las técnicas de muestreo activo para especies gaseosas y material particulado en suspensión se discuten en otros dos volúmenes de esta misma serie (UNEP-OMS 1994b y c).

Las técnicas de muestreo activo están disponibles para los contaminantes gaseosos más comunes —dos ejemplos conocidos incluyen el método de Saltzman para NO₂ y el método de NBKI (solución amortiguadora neutra de yoduro de potasio) para O₃—; sin embargo, estos han sido reemplazados, para la mayor parte de sus funciones, por los analizadores automáticos. Los empaques de filtros y sistemas *denuder* se pueden usar en el análisis de gases ácidos o aerosoles; los sistemas expuestos al aire libre constituyen actualmente el método preferido para las investigaciones de aire ácido.

Aunque algo más complejos y costosos que los muestreadores pasivos (costo unitario: aproximadamente, entre 2.000 y 4.000 dólares), los muestreadores activos son relativamente sencillos de operar y han probado ser sumamente confiables; durante los últimos 15 años, han proporcionado la mayoría de datos de GEMS/Aire. Ya se cuenta con un conjunto extenso de mediciones provenientes de muestreadores activos a escala mundial. Es importante asegurar la continuidad de las mediciones para enriquecer esta base de datos y, de este modo, estar en capacidad de deducir las tendencias a largo plazo.

Analizadores automáticos

A pesar de las considerables ventajas de los muestreadores —facilidad de uso, bajo costo y robustez—, algunas aplicaciones del monitoreo requieren la respuesta en tiempo exacto —en horas o menos— que los analizadores automáticos proporcionan. Estos instrumentos se basan en alguna propiedad física o química del gas que se puede detectar de forma continua, generalmente por métodos optoelectrónicos. El aire de la muestra ingresa a una cámara de reacción donde se puede medir directamente una propiedad óptica del gas, o bien puede producirse una reacción química que genere una luz quimioluminiscente o fluorescente. Un detector de luz produce una señal eléctrica proporcional a la concentración del contaminante.

La gran capacidad de los analizadores automáticos se obtiene a expensas de mayor inversión de capital, costos operativos y de apoyo: estos instrumentos también tienden a ser más susceptibles a los problemas técnicos que los muestreadores, y requieren personal capacitado para su operación rutinaria. Los analizadores automáticos también

requieren métodos de aseguramiento de la calidad más complejos. Los analizadores continuos producen grandes cantidades de datos y generalmente requieren sistemas de telemetría para su adquisición y computadoras para su procesamiento y análisis posterior.

Ya se dispone de técnicas de análisis continuo comprobadas para los principales contaminantes urbanos. Se debe reconocer, sin embargo, que debido a su costo relativamente elevado (usualmente, 20.000 dólares por contaminante) y sus complejidades de operación, resultan poco apropiadas para algunos lugares. No se recomiendan cuando no se cuenta con la infraestructura de soporte necesaria ni con personal calificado.

Es común que las redes modernas usen analizadores automáticos junto con inspecciones realizadas por muestreadores activos y pasivos. En la práctica, estas mediciones a menudo se pueden considerar como complementarias. Las mediciones automáticas no son necesariamente superiores. Se debe evitar el error debido al cese de todas las actividades basadas en muestreadores cuando los analizadores automáticos se utilizan por primera vez.

Sensores remotos

Los analizadores automáticos proporcionan mediciones de un solo contaminante en un punto del espacio. En cambio, los sensores remotos pueden proporcionar mediciones integradas de varios componentes a lo largo de una trayectoria específica en la atmósfera (normalmente > 100 metros). Sistemas más complejos aún pueden proporcionar mediciones de rango con resolución a lo largo de la trayectoria. Los sistemas móviles también pueden proporcionar un mapa detallado en tercera dimensión de las concentraciones de contaminantes dentro de un área, aunque durante un periodo limitado.

Los sensores remotos tienen capacidades únicas en algunas aplicaciones especializadas y pueden ser particularmente útiles para investigaciones cercanas a la fuente y para mediciones verticales en la atmósfera (por ejemplo, la distribución troposférica y estratosférica del ozono). Sin embargo, en su actual nivel de desarrollo comercial, estos dispositivos son muy costosos (> 200.000 dólares) y sumamente complejos. También puede haber dificultades con la validación de datos, el aseguramiento de la calidad y la calibración. Se requieren esfuerzos calificados y un control de calidad cuidadoso para operar con éxito estos sistemas y producir datos confiables (Wilken, 1993).

Bioindicadores

Cada vez cobra mayor interés el uso de bioindicadores para evaluar diversos factores ambientales, incluida la calidad del aire (Peichl et al., 1987; Mathes et al., 1991), en particular, en la investigación de los efectos. El término *monitoreo biológico* o *biomonitoreo* (que, en el caso del aire, implica generalmente el uso de plantas) abarca una gran cantidad de enfoques de muestreos y análisis con grados muy diferentes de complejidad y

desarrollo. Entre estos métodos se incluyen los siguientes: (1) el uso de la superficie de la planta como receptor para contaminantes (por ejemplo, el perejil para el plomo, el musgo para los PAH). Esencialmente, la planta es un muestreador que se debe recoger y analizar en el laboratorio mediante los métodos clásicos; (2) el uso de las capacidades de la planta para la captación y acumulación de contaminantes o sus metabolitos en los tejidos (por ejemplo, púas de abeto para el azufre total, césped para el fluoruro, el azufre y algunos metales pesados). También en este caso el tejido de la planta se debe recoger y analizar con los métodos clásicos; (3) la evaluación de los efectos de los contaminantes en el metabolismo de las plantas o la información genética (por ejemplo, los cloroplastos del abeto para el ozono). La recolección y el análisis requieren técnicas sumamente sofisticadas; (4) la evaluación de los efectos de los contaminantes sobre la apariencia de la planta (por ejemplo, la nicotiana o planta del tabaco para el ozono, los líquenes para el SO₂). La evaluación puede ser realizada por expertos en el campo sin necesidad de un análisis; y (5) el análisis de la distribución de algunas plantas específicas como un indicador de la calidad total del aire (por ejemplo, el tipo y distribución de líquenes para evaluar el efecto fitotóxico total de la contaminación del aire). La evaluación puede ser realizada por expertos en el campo. No se requiere análisis.

Aunque se han formulado guías para distintos métodos de bioindicadores, aún existen problemas pendientes en cuanto a la normalización y armonización de estas técnicas. Algunos problemas son inherentes al procedimiento. Claramente, hay limitaciones con respecto a los tipos de plantas que pueden emplearse en las diferentes regiones. En general, mientras menor sea la variación climática entre los sitios de la red de monitoreo, habrá mayor probabilidad de que se pueda desarrollar una técnica normalizada que permita la comparación significativa de datos. Sin embargo, existen muchas variables cuyos efectos son difíciles de determinar; por ejemplo, los efectos de los factores de estrés biótico (calor, sequía, etcétera) o la adaptación a las condiciones contaminadas. En el estado actual de nuestro conocimiento, es sumamente difícil desarrollar procedimientos de control de la calidad significativos para el uso de bioindicadores en una amplia variedad de lugares.

Dada la complejidad de los problemas, es poco probable que se creen técnicas adecuadas de monitoreo biológico para su aplicación futura a gran escala en una red mundial. Sin embargo, estas técnicas pueden ser útiles para lugares específicos, especialmente para el monitoreo de ecosistemas, y pueden proporcionar información útil a escala regional. También pueden desempeñar un papel en el establecimiento de efectos allí donde no sea primordial obtener un conocimiento detallado de la concentración de contaminantes. En algunas aplicaciones —por ejemplo, las mediciones de ozono basadas en su efecto sobre las plantas—, pueden proporcionar una medida relativamente rápida y ello puede ser preferible a no contar con datos. Sin embargo, este método se debe justificar en el plan de AC. Por ejemplo, se deben plantear objetivos de monitoreo en los que se establezca que solo se realizará una estimación gruesa de la situación; análogamente, se planteará que los correspondientes objetivos de calidad de los datos se podrán cumplir mediante técnicas de monitoreo biológico.

Atkins, D. H. F.; Law, D. V.; Broughton, G. F. J.; Stevenson, K. J. et al. (1987). Identification of Traffic-Related Monitoring Stations for the Implementation of the EC NO₂ Directive in the UK, I. Londres: Mech. E.

Bower, J. S.; Lampert, J. E.; Stevenson, K. J.; Atkins, D. H. F.; y Law, D. V. (1991a). A Diffusion Tube Survey of NO₂ Levels in Urban Areas of the UK, *Atmos. Environ*, 25B, 2: 255-265.

Campbell, G. W.; Cox, J.; Downing, C. E. H.; Stedman, J. R.; y Stevenson, K. J. (1992). A Survey of NO₂ in the UK Using Diffusion Tubes: July to December 1991, Stevenage, Warren Spring Laboratory, Informe LR 893 (AP).

Martínez, A. P. y Romieu, I. (1997). Introducción al monitoreo atmosférico. México, D. F.: Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud-Sociedad Alemana de Cooperación Técnica GTZ-Departamento del Distrito Federal.

Peichl, L. et al. (1987). Übersicht Biologischer Wirkungs-Testsysteme zur Beobachtung unerwarteter Umweltveränderungen: Biosonden, GSF Bericht 28/87, Munich.

Mathes, K. y Weidemann, G. (1991). Indikatoren für Ökosystembelastung, Berichte aus der Ökologische Forschung 2, Forschungszentrum Jülich.

PNUMA-OMS (1994a). GEMS/Air Methodology Review Handbook, vol. 2. Primary Standard Calibration Methods and Network Intercalibrations for Air Quality Monitoring.

PNUMA-OMS (1994b) GEMS/Air Methodology Review Handbook, vol. 3. Measurement of Suspended Particle Matter in Ambient Air.

PNUMA-OMS (1994c) GEMS/Air Methodology Review Handbook, vol. 4. Active and Passive Sampling Methodologies for Measurement of Air Quality.

Wilken, J. (1993). Evaluation of Ambient Monitoring Techniques for Low Levels of NO₂. En Couling, S. (ed.), Measurement of Airborne Pollutants. Butterworth Press. ISBN 0750 6088 54.

Se puede obtener mayor información sobre los temas tratados en este documento dirigiéndose a:

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/CEPIS)

Los Pinos 259, Lima, Perú

Casilla de Correo 4337, Lima 100, Perú

Teléfono: (511) 437 1077 Fax: (511) 437 8289

cepis@cepis.ops-oms.org

<http://www.cepis.ops-oms.org>