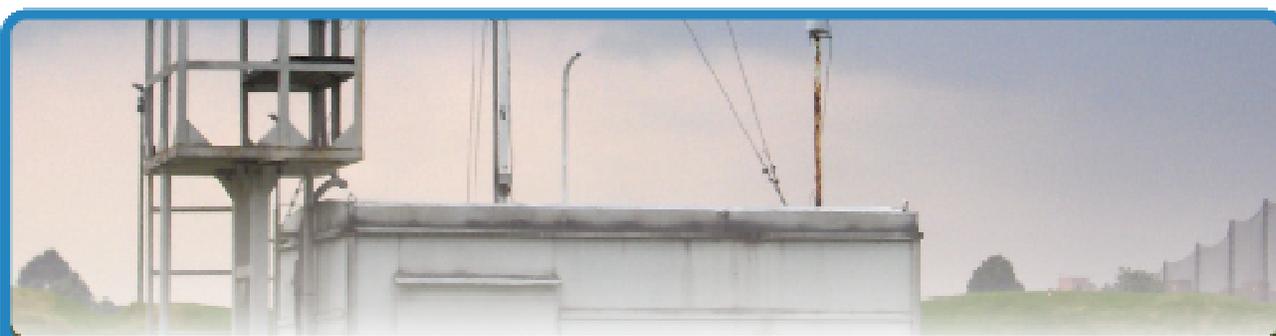


MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL



**PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA
CALIDAD DEL AIRE**

**MANUAL DE OPERACION DE SISTEMAS DE
VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE**

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	ACRÓNIMOS.....	8
3.	TIPOS DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE SEGÚN SU TECNOLOGÍA.....	10
4.	SISTEMAS MANUALES DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	12
4.1.	GENERALIDADES.....	12
4.2.	ETAPAS DE LA OPERACIÓN	13
4.2.1.	TOMA DE MUESTRA.....	13
4.2.1.1.	Determinación de concentración de material particulado: PST, PM10 y PM2.5	14
4.2.1.2.	Determinación de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno	16
4.2.2.	ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	18
4.2.3.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	18
4.2.4.	REPORTE.....	18
4.2.5.	CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD	18
4.2.6.	MANTENIMIENTO DE EQUIPOS Y CALIBRACIÓN.....	18
4.2.6.1.	Rutinas y frecuencias de mantenimiento recomendadas para equipos Hi Vol.....	19
4.2.6.2.	Calibración de equipos muestreadores de partículas Hi Vol	19
4.2.6.3.	Equipos muestreadores de tres gases	20
4.2.6.4.	Calibración de equipos muestreadores de tres gases.....	21
5.	SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	23
5.1.	GENERALIDADES DE LA OPERACIÓN	23
5.2.	ETAPAS DE LA OPERACIÓN	24
5.2.1.	TOMA DE MUESTRA Y ANÁLISIS	24
5.2.1.1.	Analizador de material particulado (PST, PM10 y PM2.5).....	24
5.2.1.2.	Analizador de óxidos de azufre (SOx)	25
5.2.1.3.	Analizador de óxidos de nitrógeno (NO/NO ₂ /NO _x).....	27
5.2.1.4.	Analizador de ozono (O ₃).....	29
5.2.1.5.	Analizador de monóxido de carbono (CO)	30
5.2.1.6.	Analizador de hidrocarburos metánicos y no metánicos	31
5.2.1.7.	Otros elementos necesarios para la operación de SVCA automáticos.....	32
	Herramientas, equipamiento e instrumental de uso general.....	33
5.2.2.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	33
5.2.3.	REPORTE.....	35
5.2.4.	ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD	35
5.2.5.	MANTENIMIENTO DE EQUIPOS	35
5.2.5.1.	Revisión de los analizadores de calidad del aire.....	36
5.2.5.2.	Verificación de la calibración de los analizadores de calidad del aire	46
5.2.5.3.	Verificación del correcto funcionamiento de calibradores multigas.....	52
6.	SISTEMAS HÍBRIDOS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE	58
7.	ELEMENTOS COMUNES EN TODOS LOS SVCA.....	59
7.1.	PROGRAMA DE CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD.....	59

7.1.1.	OBJETIVOS DEL PROGRAMA DE CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD	60
7.1.2.	SECUENCIA METODOLÓGICA DE IMPLEMENTACIÓN.....	61
7.1.3.	PLANEACIÓN DEL PROGRAMA DE CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD	62
7.1.4.	IMPLEMENTACIÓN.....	62
7.1.5.	EVALUACIONES.....	63
7.1.6.	REPORTES.....	63
7.1.7.	CARACTERÍSTICAS ORGANIZATIVAS DE UN PROGRAMA DE CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD .	64
7.1.8.	OBJETIVOS DE CALIDAD DE DATOS	64
7.1.9.	ESTABLECIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD DE DATOS	66
7.1.10.	ELEMENTOS DE ASEGURAMIENTO DE CALIDAD.....	67
7.1.10.1.	Documento Control.....	67
7.1.10.2.	Objetivos y políticas de aseguramiento de la calidad	67
7.1.10.3.	Organización	67
7.1.10.4.	Planeación de la calidad	68
7.1.10.5.	Entrenamiento.....	68
7.1.10.6.	Preparación del SVCA	69
7.1.10.7.	Mantenimiento Preventivo.....	69
7.1.10.8.	Recolección de la muestra.....	69
7.1.10.9.	Análisis de la muestra.....	71
7.1.10.10.	Reporte de errores en los datos.....	71
7.1.10.11.	Control de calidad	71
7.1.10.12.	Verificación y Calibración.....	73
7.1.10.13.	Acciones correctivas.....	75
7.1.10.14.	Costos de la calidad.....	75
7.1.10.15.	Pruebas inter- laboratorios y dentro del laboratorio.....	75
7.1.10.16.	Procedimientos de auditoria.....	75
7.1.10.17.	Validación de datos	76
7.1.10.18.	Análisis estadístico de los datos	84
7.2.	MANEJO DE MUESTRAS Y CADENA DE CUSTODIA	85
7.2.1.	MANEJO DE LA MUESTRA	85
7.2.1.1.	Etiquetado e Identificación de la Muestra	85
7.2.1.2.	Colección de la Muestra	86
7.2.1.3.	Transporte	86
7.2.2.	CADENA DE CUSTODIA.....	87
7.3.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GENERADA EN LOS SVCA.....	92
7.3.1.	BASES DE DATOS.....	92
7.3.1.1.	Manejo y presentación de las variables de calidad del aire	92
7.3.1.2.	Manejo y presentación de las variables de meteorología.....	95
7.3.2.	MANEJO ESTADÍSTICO DE DATOS	96
7.3.2.1.	Cálculo de los promedios en el tiempo.....	96
7.3.2.2.	Brechas de datos	97
7.3.2.3.	Interpolación y ajuste.....	97
7.3.2.4.	Promedio aritmético	97
7.3.2.5.	Promedio geométrico.....	98
7.3.2.6.	Concentración máxima por hora.....	98
7.3.2.7.	Estimación de la media móvil.....	99
7.3.2.8.	Comparación de los valores de concentración con la norma	102
7.3.2.9.	Cálculo del número de excedencias	108
7.4.	INDICADORES DE OPERACIÓN Y DESEMPEÑO DEL SVCA	108
7.4.1.	ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE CAPTURA DE DATOS.....	109
7.4.2.	ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE DATOS VÁLIDOS.....	109

7.4.3.	CONSISTENCIA DE LOS DATOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DEL AIRE	112
7.4.4.	CONSISTENCIA DE LOS DATOS RELACIONADOS CON LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.....	114
7.5.	GENERACIÓN DE REPORTES.....	114
7.6.	REPORTE DE LA CALIDAD DEL AIRE	115
7.6.1.	INFORMACIÓN SOBRE SVCA, ESTACIONES Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN	115
7.6.2.	CONTENIDO DEL INFORME ANUAL DE CALIDAD DEL AIRE	117
7.6.3.	CONTENIDO DE INFORMES MENSUALES Y TRIMESTRALES DE CALIDAD DEL AIRE	118
7.6.4.	CONTENIDO DEL INFORME DE CALIDAD DEL AIRE PRESENTADO EN LAS PÁGINAS WEB.....	119
7.6.5.	CÁLCULOS Y CONTENIDO DE UN INFORME METEOROLÓGICO ANUAL	121
7.6.6.	CONTENIDO DE UN INFORME DE CAMPAÑAS DE MONITOREO	132
7.6.7.	ÍNDICE NACIONAL DE CALIDAD DE AIRE.....	132
7.6.7.1.	Contaminantes del índice nacional de calidad del aire	133
7.6.7.2.	Rangos del índice nacional de calidad del aire	133
7.6.7.3.	Puntos de corte del índice nacional de calidad del aire	133
7.6.7.4.	Cálculo del índice nacional de calidad del aire	135
7.6.8.	CONTENIDO DE UN PLAN DE CALIDAD.....	139
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de SVCA según su tecnología	11
Figura 2. Proceso general de operación de un SVCA Manual	12
Figura 3. Ejemplo flujo de proceso de un SVCA Manual	13
Figura 4. Pasos previos a la realización de la toma de muestras de material particulado	14
Figura 5. Pasos a realizar durante la toma de la muestra de material particulado.....	15
Figura 6. Pasos a realizar después de la toma de la muestra de material particulado	15
Figura 7. Pasos previos en la realización de la toma de muestras de SO ₂ y NO _x	16
Figura 8. Pasos a realizar durante la toma de la muestra de SO ₂ y NO _x	17
Figura 9. Pasos a realizar después de la toma de la muestra de SO ₂ y NO _x	17
Figura 10. Equipo Muestreador de 3 Gases.....	20
Figura 11. Montaje del calibrador de burbuja	21
Figura 12. Proceso general de operación de un SVCA Automático.....	23
Figura 13. Esquema analizador Beta.	25
Figura 14. Diagrama de Flujo Analizador de SO ₂	27
Figura 15. Diagrama de Flujo Analizador NO _x	28
Figura 16. Diagrama de Flujo Analizador O ₃	30
Figura 17. Diagrama de Flujo Analizador CO.....	31
Figura 18. Proceso de tomas de muestras hasta el procesamiento de la información	34
Figura 19. Ejemplo captura y manejo de la información	35
Figura 20. Pruebas automáticas internas y externas de equipos analizadores.	36
Figura 21. Proceso de revisión de un analizador de partículas suspendidas totales (PST).....	37
Figura 22. Proceso de revisión de un analizador de partículas menores a 10 micras (PM10)	38
Figura 23. Proceso de revisión del analizador de material particulado PM10	40
Figura 24. Proceso de revisión del analizador de dióxido de azufre (SO ₂).....	41
Figura 25. Proceso de revisión del analizador de óxidos de nitrógeno (NO/NO _x)	42
Figura 26. Proceso de revisión del analizador de ozono (O ₃)	43
Figura 27. Proceso de revisión del analizador de monóxido de carbono (CO)	44
Figura 28. Proceso de cambio de filtros en los analizadores de gases	45
Figura 29. Ilustración del proceso de verificación de la calibración de los analizadores de gases.....	46
Figura 30. Proceso de calibración.....	47
Figura 31. Principio de funcionamiento de un calibrador multigas	53
Figura 32. Burbujeador (soap bubbler flow-meter) usado como patrón de medición de flujo volumétrico.....	54
Figura 33. Ilustración del montaje para verificar la operación del calibrador multigas	56
Figura 34. Verificación del correcto funcionamiento de un calibrador multigas	57
Figura 35. Proceso general de operación de un SVCA Híbrido	58
Figura 36. Ciclo de los programas de AC para vigilancia de calidad del aire	61
Figura 37. Ejemplo etiqueta de la muestra	86
Figura 38. Ejemplo de la forma de cadena de custodia	88
Figura 39. Ejemplo de cadena de custodia del laboratorio	89
Figura 40. Ejemplo de metodología para la estimación de la media móvil para 8 horas de un conjunto de datos	100
Figura 41. Ejemplo de metodología para la estimación de la media móvil para 3 horas de un conjunto de datos	101
Figura 42. Media móvil de ocho horas de series temporales con datos inválidos	102
Figura 43. Diagrama de comparación de la concentración de contaminante con la norma de 8 horas	106
Figura 44. Descripción de un diagrama de caja	112
Figura 45. Gráfica de series de tiempo donde se validan picos de O ₃ en horas de la madrugada.....	113
Figura 48. Nomograma para cálculo de estabilidad atmosférica según Pasquill	130
Figura 49. Ejemplo de distribución horaria de la altura de la capa de mezcla para determinada zona de estudio	131

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Herramientas básicas para realizar el mantenimiento de las estaciones automáticas.....	33
Tabla 2. Ejemplo de la composición de la mezcla de gases del cilindro usado para la verificación de la calibración de los analizadores de gases	48
Tabla 3. Periodicidad de las operaciones de control de la calibración de los analizadores de gases.....	50
Tabla 4. Criterios para la verificación de la exactitud de analizadores de gases	51
Tabla 5. Formato de calibración de SPAN y CERO	51
Tabla 6. Formato de calibración multipunto.....	52
Tabla 7. Descripción del significado de los parámetros de calibración de equipos automáticos	52
Tabla 8. Desarrollo de un Programa de Control y Aseguramiento de la Calidad	60
Tabla 9. Actividades rutinarias de AC para cada estación de vigilancia	73
Tabla 10. Procedimientos de calibración.....	74
Tabla 11. Ejemplo de tabla de validación de datos en campo	78
Tabla 12. Tipos de banderas que invalidan los datos	82
Tabla 13. Tipos de banderas que no invalidan los datos.....	82
Tabla 14. Conversión de dirección del viento	83
Tabla 15. Cuestionario de evaluación de la cadena de custodia para métodos manuales.....	90
Tabla 16. Evaluación del manejo de los reportes desde la estación automática hasta el centro general de información del SVCA.	91
Tabla 17. Variables iniciales de calidad del aire a ser incluidas dentro del SISAIRES.....	92
Tabla 18. Pesos moleculares de algunas sustancias contaminantes	94
Tabla 19. Nombres y unidades de variables de meteorología	95
Tabla 20. Datos de concentración de ozono y resultados de los cálculos de la media móvil para dichos datos.....	100
Tabla 21. Límites máximos permisibles por contaminante criterio según Resolución 601 de 2006	103
Tabla 22. Disponibilidad de datos para calcular los promedios anuales en el SVCA estudiado	110
Tabla 23. Información sobre los SVCA.....	115
Tabla 24. Información sobre las estaciones	116
Tabla 25. Información sobre la configuración de las mediciones por contaminante	117
Tabla 26. Disponibilidad de datos meteorológicos existentes en el SVCA evaluado	121
Tabla 27. Ejemplo para la presentación del resumen meteorológico anual por horas para una estación	124
Tabla 28. Resumen de valores promedios mensuales de las variables climáticas en el SVCA evaluado durante el año 2002.....	125
Tabla 29. Longitud de aspereza superficial en metros.....	128
Tabla 30. Categorías de estabilidad para períodos diurnos, condiciones convectivas	129
Tabla 31. Categorías de estabilidad para períodos nocturnos, condiciones estables.....	129
Tabla 32. Presentación de resultados obtenidos para altura de mezcla y estabilidad atmosférica	130
Tabla 33. Puntos de corte del ICA	134
Tabla 34. Efectos a la salud de acuerdo con el rango y valor del Índice de Calidad del Aire.....	136
Tabla 35. Acciones preventivas de acuerdo al rango y al valor del Índice de Calidad del Aire.....	137

1. INTRODUCCIÓN

El PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE está conformado por dos manuales que guían el proceso de diseño y operación de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire.

El Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) contiene todos los lineamientos y elementos conceptuales para el diseño de un SVCA y el Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire explica los procedimientos para operar un SVCA.

EL MANUAL DE DISEÑO DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE incorpora los lineamientos a tener en cuenta para llevar a cabo el diseño y la operación de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire en el país. Contiene las generalidades sobre los sistemas de vigilancia de calidad del aire, la explicación de los sistemas de vigilancia de la calidad del aire en el marco de los planes de gestión de calidad del aire, las etapas generales para el diseño de un sistema de vigilancia de la calidad del aire y los pasos relacionados con la revisión inicial y la fase final de elaboración del diseño del sistema, dependiendo del sistema de vigilancia que se requiera instalar. De igual manera, presenta los parámetros de diseño de un sistema de vigilancia de la calidad del aire y criterios para realizar modificaciones a los sistemas de vigilancia, así como los recursos necesarios para el montaje, operación y seguimiento de estos sistemas de vigilancia. Finalmente, cuenta información relacionada con clasificación de áreas-fuente de contaminación y validez de la información recolectada en campañas de monitoreo.

EL MANUAL DE OPERACIÓN DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE incorpora los lineamientos a tener en cuenta para llevar a cabo la operación de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire en el país. Contiene los tipos de sistemas de vigilancia de la calidad del aire según su tecnología y presenta en detalle los sistemas manuales, automáticos e híbridos de vigilancia de la calidad del aire. Así mismo, se presentan elementos comunes a todos los sistemas de vigilancia de la calidad del aire como el programa de control y aseguramiento de la calidad del aire, el análisis de la información generada y la generación de reportes.

2. ACRÓNIMOS

PGCA	Plan de Gestión de la Calidad del Aire
SVCA	Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire.
SEVCA	Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire
SVCAI	Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire Industrial
EPE	Estación de Propósito Especial
IE	Inventario de Emisiones
SISAIRE	Sub-Sistema de Información sobre Calidad del Aire.
atm	Unidad de presión, atmósfera. Donde 1 atm \approx 101.325KPa \approx 760 mmHg
AC	Aseguramiento de Calidad
cm	Unidad de longitud, centímetro
CC	Control de Calidad
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
HCT	Hidrocarburos Totales
Hg	Mercurio
H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico
in	Unidad de longitud, pulgadas
INVIAS	Instituto nacional de vías
IVA	Impuesto al Valor Agregado
KPa	Unidad de presión, kilo-Pascal. Donde 101.325KPa \approx 1 atm
l	Unidad de volumen, litros
ml	Unidad de volumen, mililitros
mm	Unidad de longitud, milímetros
mm Hg	Unidad de presión, milímetros de mercurio. Donde 760 mm Hg \approx 101.325 KPa
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
N ₂	Nitrógeno
NH ₄ ⁺	Ión amonio. También puede ser escrito sin el superíndice que indica el valor de su carga eléctrica.
NO	Monóxido de nitrógeno
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
N ₂ O ₃	Trióxido de dinitrógeno
N ₂ O ₄	Tetróxido de dinitrógeno
N ₂ O	Óxido nitroso
N ₂ O ₅	Pentóxido de dinitrógeno
NO _x	Óxido de Nitrógeno
OH ⁻	Ión hidroxilo
Pb	Plomo
PCB's	Bifenilos policlorinados
PST	Partículas suspendidas totales
PM	Material particulado
PM2.5	Material particulado menor a 2.5 micrómetros
PM10	Material particulado menor a 10 micrómetros
ppm	Partes por millón
SIG	Sistema de información geográfico

SO _x	Óxidos de azufre
VOC	Compuestos orgánicos volátiles
SENA	Servicio Nacional de Aprendizaje
IVE	Modelo para elaborar inventario de emisiones de vehículos (International Vehicle Emission Model)
µm	Unidad de longitud, micrómetro

3. TIPOS DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE SEGÚN SU TECNOLOGÍA

De acuerdo con el tipo de instrumentos que utilizan para su operación los SVCA podrán ser:

SVCA Manuales: SVCA constituidos totalmente por equipos manuales (muestreadores y semiautomáticos).

SVCA Automáticos: SVCA constituidos totalmente por equipos y sistemas automáticos (analizadores automáticos).

SVCA Híbridos: SVCA constituidos por la combinación entre equipos manuales y automáticos.

Como ya se ha planteado anteriormente, un SVCA independientemente del tipo de tecnología que emplee, tiene como principal objetivo medir la cantidad presente de contaminantes en el aire de determinadas regiones o áreas en un periodo de tiempo determinado.

Para realizar las mediciones de la concentración de contaminantes atmosféricos, los SVCA están conformados por equipos que bien pueden ser muestreadores manuales o semiautomáticos o analizadores propiamente dichos.

Los muestreadores, son equipos que como su nombre lo indica, solo pueden ser empleados para la recolección de muestras, las cuales posteriormente deben ser llevadas al laboratorio para desarrollar los análisis físico-químicos pertinentes y realizar las respectivas cuantificaciones de la presencia del contaminante deseado. Estos equipos pueden ser de dos tipos: manuales o semiautomáticos. Por otra parte se tienen los analizadores, que funcionan de manera automática, y a diferencia de los muestreadores, no solamente recolectan la muestra sino que internamente cuentan con los accesorios necesarios para que a partir de procedimientos como fluorescencia UV, quimioluminiscencia, absorción infrarroja, absorción de rayos beta y microbalanza, para determinar las concentraciones de cada contaminante específicamente. En las secciones 4.2 y 5.2 de este manual se encuentran resumidos los principios de funcionamiento tanto para los equipos manuales, como para los automáticos.

Cabe mencionar que la principal ventaja de los equipos semiautomáticos en comparación con los manuales, es que permiten la recolección de muestras durante varios días, sin necesidad de la presencia del operador para el cambio del medio de muestreo (filtro en el caso de material particulado). Por ejemplo, un equipo semiautomático de material particulado realiza un muestreo cada 24 horas al igual que uno manual pero después de dicho período, el mismo equipo cambia el medio filtrante e inicia un nuevo monitoreo y así sucesivamente hasta que se agoten los medios filtrantes para los cuales tiene capacidad.

En los siguientes capítulos se presentan los procesos de operación para SVCA Manuales y SVCA Automáticos así como algunas particularidades de los SVCA Híbridos teniendo en cuenta que estos últimos usan la combinación de procedimientos de los dos anteriores. En la Figura 1 se presenta un esquema de dichos sistemas.

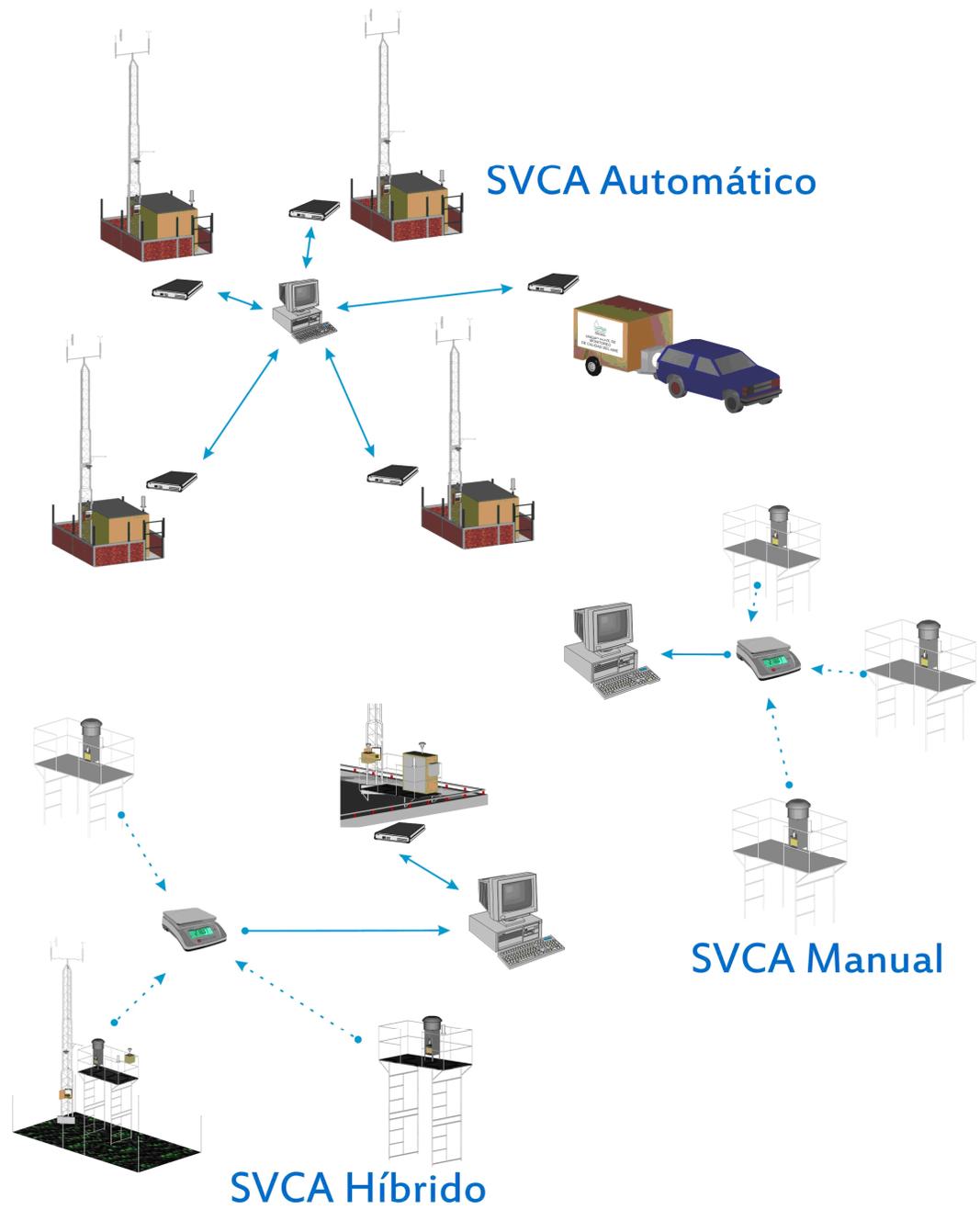


Figura 1. Tipos de SVCA según su tecnología

4. SISTEMAS MANUALES DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE

A continuación se describen los procedimientos para la determinación de concentración de contaminantes para los parámetros que hacen parte de un SVCA Manual.

4.1. GENERALIDADES

Los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire manuales se caracterizan por requerir un laboratorio como apoyo para el análisis de las muestras tomadas. Requieren además, una rutina para la recolección de las muestras, de acuerdo con una periodicidad preestablecida.

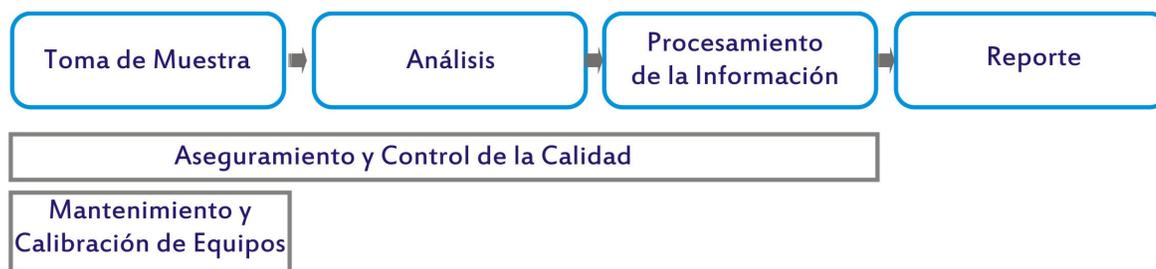


Figura 2. Proceso general de operación de un SVCA Manual

La Figura 2 muestra las etapas generales de operación de un SVCA manual. Como se observa, el sistema consta de cuatro etapas principales y dos de apoyo, como son: Aseguramiento y Control de la Calidad y Mantenimiento y Calibración de los Equipos.

La operación de todo SVCA debe estar amparada en un plan que defina la secuencia en la cual se desarrollarán cada una de las etapas y los responsables de su ejecución, de modo que el proceso se mecanice y se lleve a cabo garantizando la calidad de la información tomada.

El mecanismo que garantiza la efectividad del proceso y la calidad de la información es el Plan de Calidad del SVCA, el cual deberá desarrollarse a lo largo de todo el proceso a fin de garantizar la confiabilidad de la información reportada. Dentro de este plan se incluyen las actividades de mantenimiento y calibración de equipos, que garantizan su operatividad y la veracidad de las lecturas y registros de las muestras tomadas.

Dentro de la elaboración del Plan de Calidad se debe hacer un flujo detallado del proceso que permita establecer actividades rutinarias y no rutinarias a realizar. La Figura 3 muestra un ejemplo de flujo de proceso específico. Posteriormente, serán descritas las etapas de toma de muestra, análisis, procesamiento de la información, generación de reportes, control y aseguramiento de calidad y mantenimiento de equipos, involucradas bajo el marco de operación de un SVCA Manual.

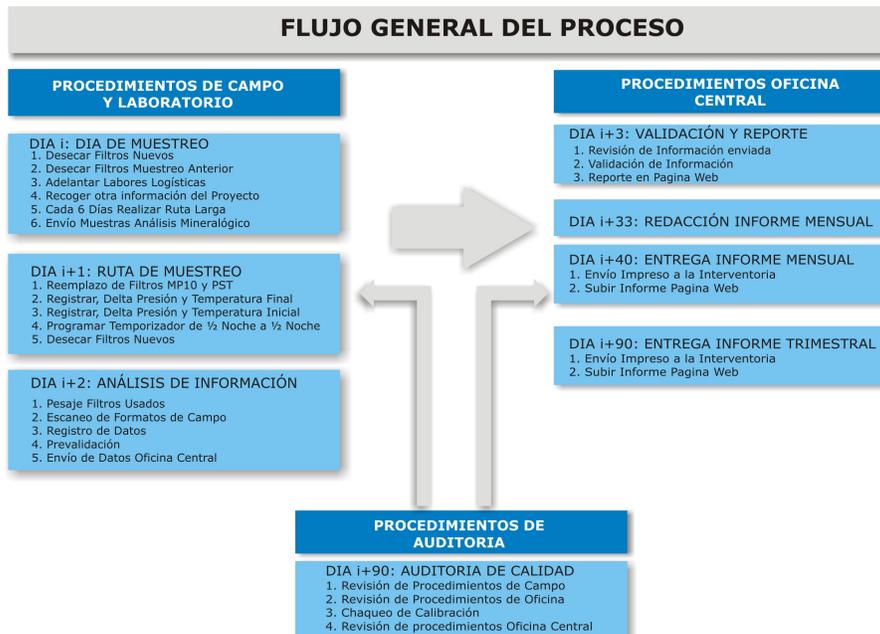


Figura 3. Ejemplo flujo de proceso de un SVCA Manual¹

4.2. ETAPAS DE LA OPERACIÓN

4.2.1. TOMA DE MUESTRA

Esta etapa comprende todos los procedimientos relacionados con la toma de muestras en un SVCA Manual y está compuesta por las siguientes fases:

- Actividades previas a la toma de la muestra: Actividades de preparación y acondicionamiento de filtros y medios previos al inicio de la ruta de muestreo. Esta actividad se lleva a cabo en el laboratorio.
- Toma de Muestra: Comprende todas las actividades de toma de muestra que se desarrollan en campo.
- Actividades posteriores a la toma de la muestra: Son las actividades que se llevan a cabo en laboratorio con la muestra tomada.

A continuación se muestran los diagramas de flujo para la determinación de los contaminantes criterio durante la operación de un SVCA Manual.

¹ Tomado de Plan de Calidad de la Red de Calidad del Aire Zona Minera-CORPOCESAR

4.2.1.1. Determinación de concentración de material particulado: PST, PM10 y PM2.5

La Figura 4, la Figura 5 y la Figura 6 detallan cada una de las actividades a realizar previamente a la realización de la toma de la muestra, durante la toma de la muestra y de manera posterior a su realización².

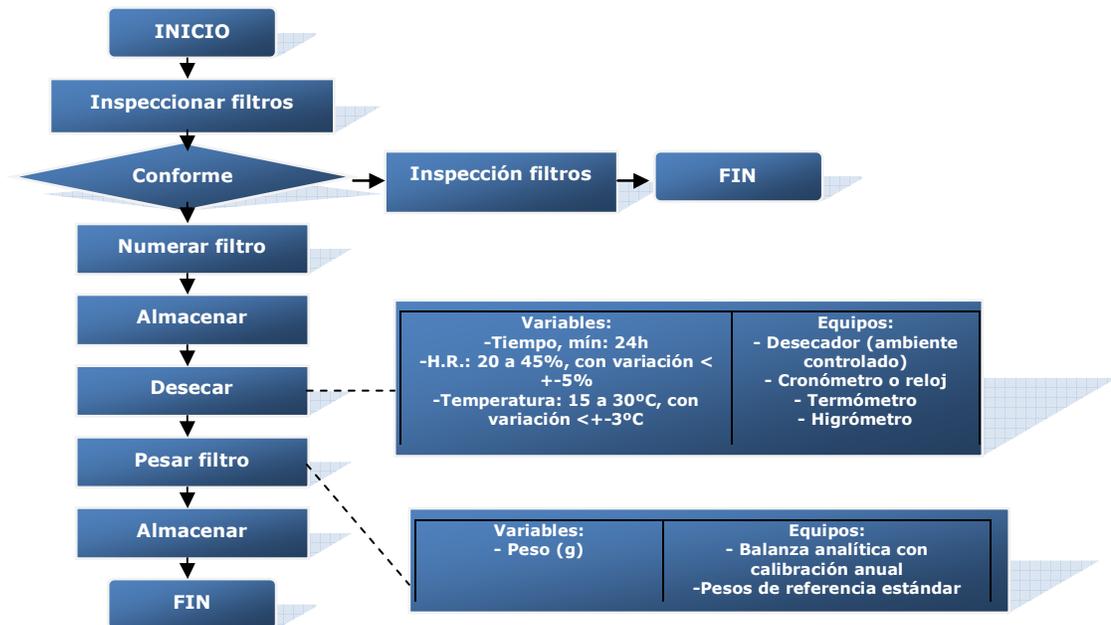


Figura 4. Pasos previos a la realización de la toma de muestras de material particulado

² Tomado de Diagramas de Flujo Área Metropolitana del Valle de Aburra

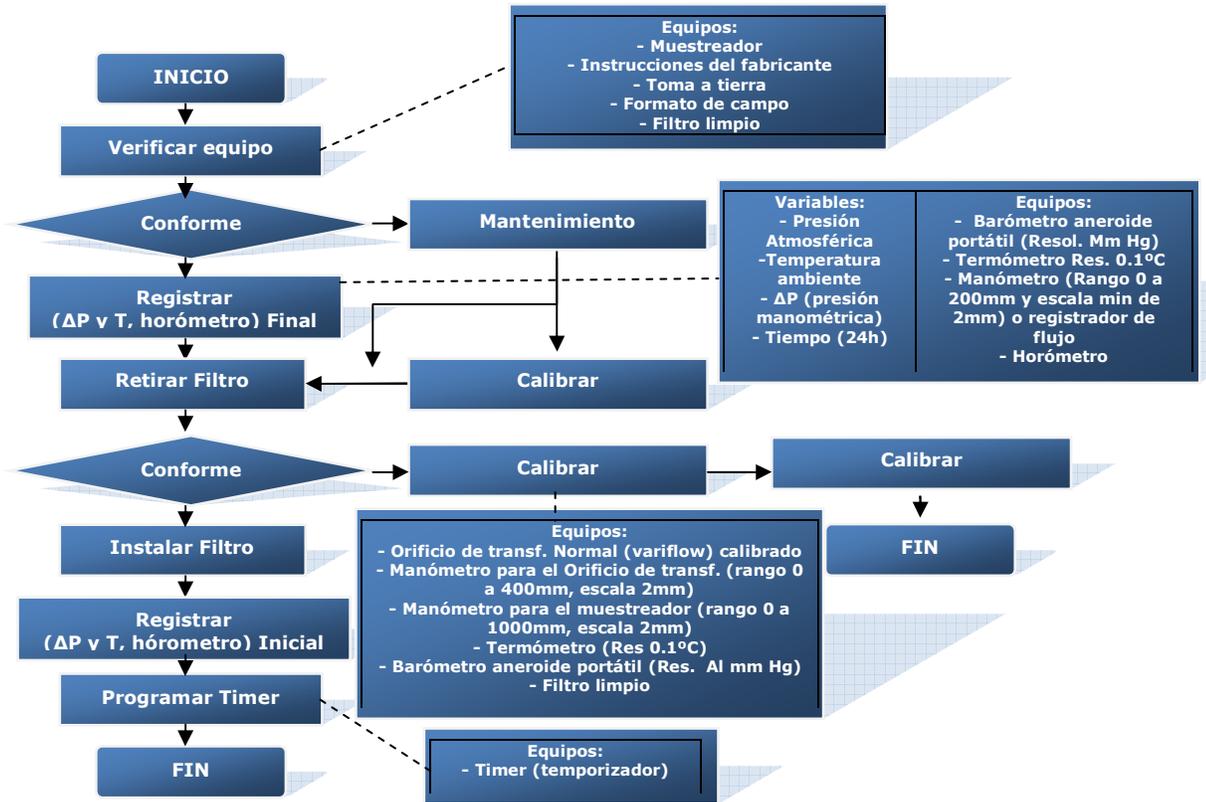


Figura 5. Pasos a realizar durante la toma de la muestra de material particulado

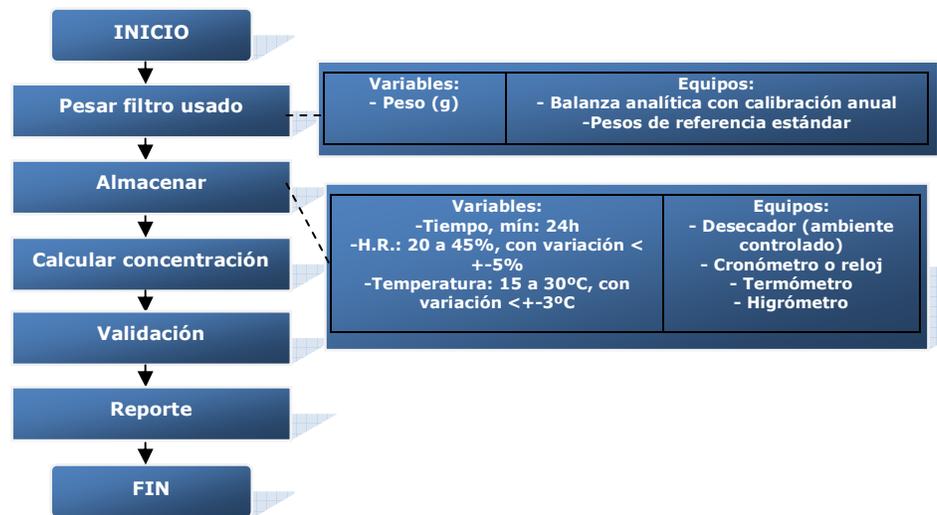


Figura 6. Pasos a realizar después de la toma de la muestra de material particulado

4.2.1.2. Determinación de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno

La Figura 7, la Figura 8 y la Figura 9 detallan cada una de las actividades a realizar previamente a la realización de la toma de la muestra, durante la toma de la muestra y de manera posterior a su realización².



Figura 7. Pasos previos en la realización de la toma de muestras de SO₂ y NO_x

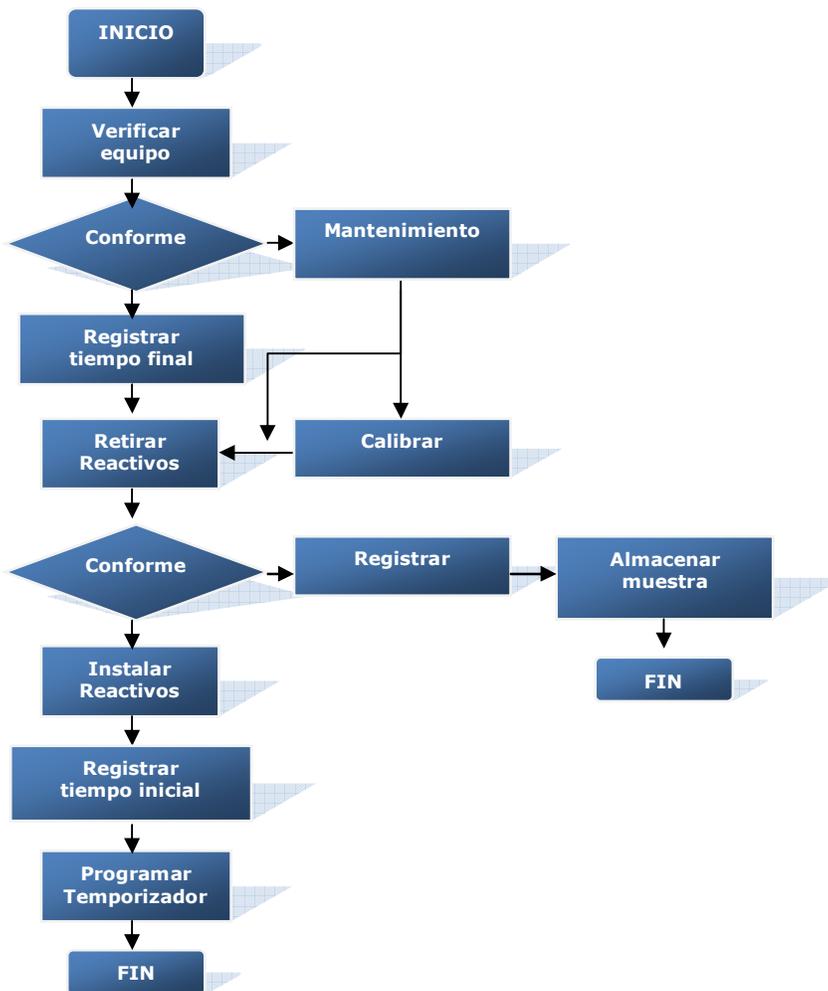


Figura 8. Pasos a realizar durante la toma de la muestra de SO₂ y NO_x



Figura 9. Pasos a realizar después de la toma de la muestra de SO₂ y NO_x

4.2.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO

Comprende todas aquellas actividades que se realizan en el laboratorio con el fin de obtener las concentraciones de los contaminantes medidos.

Este proceso se compone de las siguientes fases:

- **Análisis de laboratorio:** Técnicas y procedimientos analíticos realizados en la muestra para obtener valores que puedan ser relacionados posteriormente con la concentración del contaminante respectivo.
- **Cálculos:** Manejo de los datos tomados durante la medición, que conjuntamente con los resultados del laboratorio, permiten estimar la concentración de un determinado contaminante.

4.2.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Consiste en la determinación de ciertos factores puntuales que pudieron afectar la medición para proceder a su validación y posterior inclusión en la base de datos. Durante esta etapa se realiza el análisis y la consolidación de los datos con el fin de llegar a conclusiones acerca de la calidad del aire correspondiente al dominio del SVCA. Es en esta etapa donde se deben cumplir los objetivos previstos para el sistema. En el capítulo con las etapas comunes a todos los SVCA (Capítulo 9), se muestra la forma en que debe realizarse el procesamiento de la información.

4.2.4. REPORTE

El reporte es el resultado del trabajo operativo del SVCA que es entregado a la comunidad. Dependiendo del SVCA, dicho reporte tendrá unas características específicas como su publicación en páginas web o a través de informes periódicos. La forma específica de los reportes se presenta en el capítulo etapas comunes a todos los SVCA (Capítulo 9) donde se muestran los componentes mínimos de cada uno de los reportes.

4.2.5. CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Consiste en el conjunto de procesos y requerimientos que garantizan la confiabilidad de la información. Esta actividad debe llevarse a cabo a lo largo de todas las etapas de la operación del SVCA. El capítulo Etapas comunes a todos los SVCA (Capítulo 7) describe la forma como se debe llevar a cabo el Programa de Control y Aseguramiento de la Calidad. Todo SVCA debe tener un Plan de Calidad implementado que garantice la confiabilidad de la información.

4.2.6. MANTENIMIENTO DE EQUIPOS Y CALIBRACIÓN

Cada SVCA debe tener un programa de mantenimiento preventivo y correctivo. Este programa define las acciones generales a seguir para evitar fallas en el sistema, así como para corregir cualquier problema de operación, lo cual redundará en la confiabilidad de los datos. En dicho sistema se definen las rutinas de chequeo y limpieza de partes, así como también las frecuencias de estas actividades. Se recomienda referirse al manual del fabricante para rutinas de mantenimiento específicas.

El mantenimiento de los equipos garantizará la continuidad en la toma de muestras en el SVCA. Un estricto programa de mantenimiento preventivo y correctivo debe incluirse en el Plan de Calidad del SVCA. De todos los mantenimientos realizados, tanto preventivos como correctivos, se debe llevar registro según se especifique en dicho plan.

4.2.6.1. Rutinas y frecuencias de mantenimiento recomendadas para equipos Hi Vol

Por cada visita al lugar:

- Verificar el nivel del flujo antes y después de la toma de la muestra.
- Verificar el contador de tiempo antes y después de la toma de la muestra.
- Revisar los empaques de la placa de fijación y observar si existe algún desgaste.

Mensualmente:

- Llevar a cabo la calibración del muestreador.
- Limpiar todo polvo el área del cabezote (inlet) de muestreo.

Trimestralmente:

- Verificar el número de horas de operación desde el último cambio de escobillas. Por lo regular, las escobillas del motor deben reponerse después de 600 a 1.000 horas de operación con un voltaje normal de línea. Una vez cambiadas las escobillas, debe recalibrarse el muestreador de alto volumen. Sin embargo, esto no debe hacerse sino hasta después de un período inicial de asentamiento para asegurar el acoplamiento adecuado de las escobillas contra la armadura del motor. Se debe inspeccionar la armadura y cambiar el motor si la armadura muestra un desgaste excesivo. Inspeccionar el cableado en busca de alambres quemados. Limpiar el polvo del motor.
- Inspeccionar el estado de todos los empaques, reponer si se encuentran con desgastes excesivos.
- Operación del registrador de flujo. Asegurarse que la pluma pueda moverse libremente, de no ser así, revisar el registrador para determinar la causa. Si la impresión es ilegible, verificar que la pluma no se encuentre seca; reponerla de ser necesario. Una vez cambiada la pluma, encender el muestreador brevemente, con un filtro en su lugar, para confirmar que está funcionando correctamente.
- Realizar el procedimiento de calibración de acuerdo con las instrucciones del fabricante del equipo y con los procedimientos de los métodos de medición de contaminantes.
- Control de flujo. Revisar el controlador de flujo por ausencia de registro de flujo o si se registran valores bajos, excesivos o erráticos.

4.2.6.2. Calibración de equipos muestreadores de partículas Hi Vol

El equipo muestreador de alto volumen está provisto de un dispositivo de control de flujo, cuya acción sobre el circuito eléctrico conectado al motor regula su velocidad y por lo tanto, su capacidad de succión. La calibración se fundamenta en la posición del dispositivo de control de flujo que permite una aspiración de aire en el rango deseado, es decir de 1,1 a 1,7 m³/min. En resumen, la calibración del equipo consiste básicamente en una verificación del flujo.

El equipo debe ser calibrado en los siguientes casos o eventos:

- Una vez sea instalado.
- Después de cambio de motor.
- Después de cambio de escobillas.
- Cuando se cambia el sitio de muestreo.

- Periódicamente, por lo menos cada tres meses.
- Después de 360 horas de medición.

La calibración del equipo se realiza con la ayuda de un kit de calibración, el cual puede ser un juego de platos o un sistema con una resistencia de flujo variable. El juego de platos consiste en un tubo metálico y cinco platos intercambiables, con diferentes orificios que permiten varios tipos de flujo. El sistema de resistencia de flujo variable es un tubo metálico con un par de discos que permiten obtener varias aberturas al girar uno de los discos. Cada uno de estos kits de calibración posee una ecuación de calibración con su respectiva curva, la cual se obtiene a través de un patrón primario o medidor de volumen estándar de desplazamiento positivo, denominado Rootsmeter®.

Por lo anterior, la calibración del equipo depende del tipo: si es volumétrico o másico. Los procedimientos de calibración y los respectivos formatos deben desarrollarse de acuerdo con el documento de referencia Quality Assurance Handbook Vol II, Part II de la EPA.

4.2.6.3. Equipos muestreadores de tres gases

El equipo muestreador de gases tipo Rack, es un instrumento que utiliza un sistema húmedo de absorción de gases con químicos en estado líquido, que sirve para medir dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. Este equipo consta de una caja metálica con tapa móvil y dos compartimentos. El primer compartimento tiene una bomba de vacío cuyas características cumplen las especificaciones recomendadas por el Código Federal de Regulaciones de la EPA³ (motor de 1700 rpm, 0,5 HP, presión máxima de 20 psi, 110-115 voltios y 23 pulgadas de mercurio de capacidad de vacío a nivel del mar).

En el segundo compartimento se encuentra el tren de muestreo, que va conectado a la bomba de vacío y consta de un tubo distribuidor conectado en serie a tres colectores de vidrio de boro silicato (burbujeadores) que contienen la solución absorbente para NO_x, SO₂, y un tercero, vacío, que hace las veces de trampa colectora de humedad (burbujeador trampa). El flujo de aire que pasa a través del sistema es controlado por orificios críticos, el cual es calibrado antes y después de la colección de la muestra (24 horas). El sistema es protegido por un filtro de membrana de 8 micras colocado entre la entrada de la muestra y el primer burbujeador, y por una trampa de humedad (sílica gel) colocada entre el burbujeador trampa y la bomba de vacío (ver Figura 10).

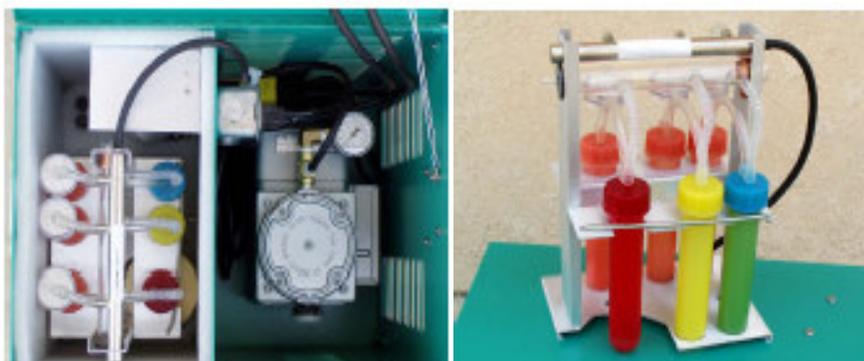


Figura 10. Equipo Muestreador de 3 Gases⁴

³ US EPA CFR 40 Appendix A to Part 50—Reference Method for the Determination of Sulfur Dioxide in the Atmosphere

⁴ RAC 3 Gas Sampler User's Guide.

Adicionalmente, el colector de NO_x va empotrado en una pequeña nevera refrigerada con hielo seco o hielo con salmuera para mantener el sistema a baja temperatura.

4.2.6.4. Calibración de equipos muestreadores de tres gases

Este procedimiento se efectúa empleando una unidad de calibración tipo burbuja, tal como se describe a continuación:

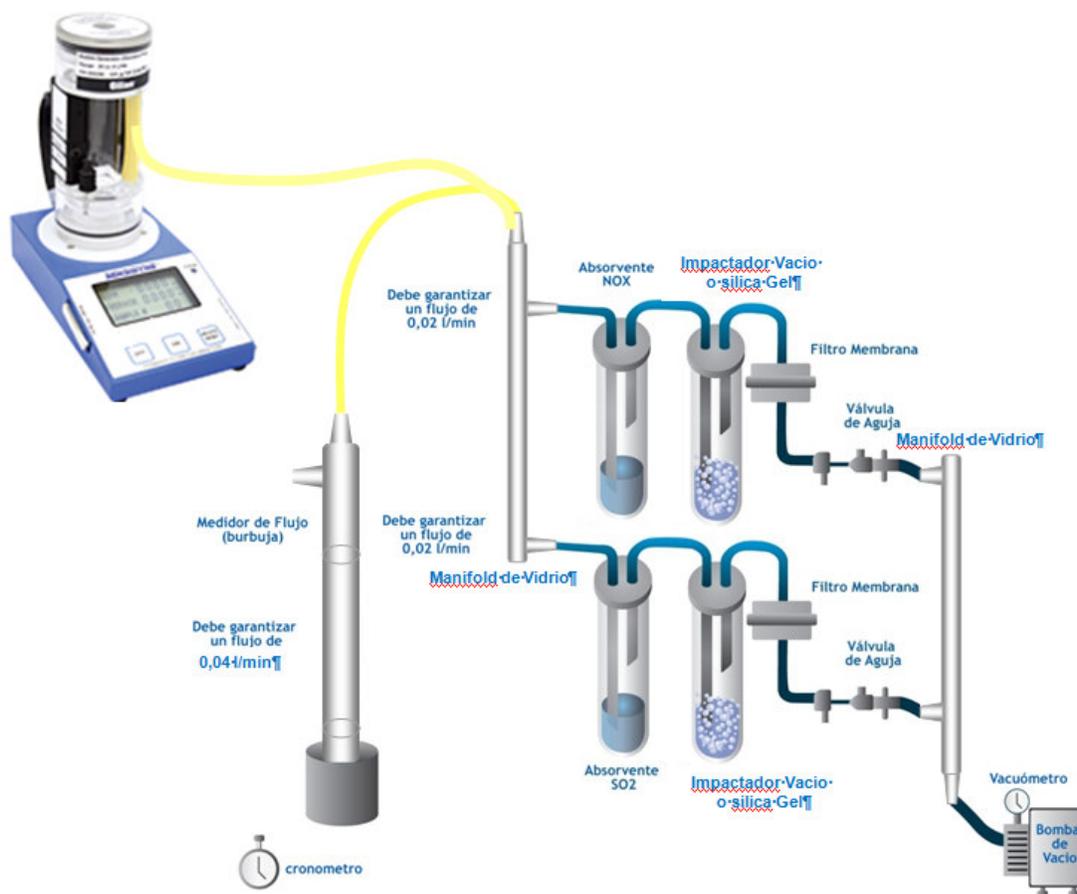


Figura 11. Montaje del calibrador de burbuja

- Ensamblar el equipo como muestra la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**
- Llenar los tubos de muestreo con 50 ml de agua destilada.
- Revisar las conexiones.
- Encender la bomba de vacío y verificar la presión manométrica.
- Verificar el funcionamiento de los burbujeadores en el tren de muestreo.
- Formar una burbuja, medir y registrar el tiempo de viaje entre las marcas de volumen

conocido en el calibrador de burbuja, repitiendo esta operación como mínimo tres veces; hasta que los tiempos de recorrido no difieran entre sí en más del 5%. Registrar la información en el formato para calibración de orificios críticos.

- Promediar el tiempo de viaje para 8 corridas.
- Corregir el volumen desplazado a condiciones de referencia (760 mm Hg y 25 °C)
- Dividir el volumen corregido por el tiempo promedio para determinar la tasa de flujo.
- La tasa de flujo para cada orificio de flujo crítico debe localizarse entre 180 y 220 ml/min, si no se cumple esta condición debe desecharse el orificio.

5. SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE

A continuación se describe la metodología para determinar las concentraciones de los parámetros contaminantes presentes en el aire ambiente usando un SVCA Automático.

5.1. GENERALIDADES DE LA OPERACIÓN

Los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire automáticos no requieren análisis posterior de la muestra tomada. Por medio de métodos ópticos o eléctricos se analiza la muestra directamente proporcionando datos en tiempo real, de modo que se puedan tomar acciones inmediatas ante la ocurrencia de un evento de concentraciones altas de algún contaminante.

La Figura 12 muestra las etapas generales de operación de un SVCA automático. Como se observa, está conformado por tres secciones principales y dos de apoyo: Aseguramiento y Control de la Calidad y Mantenimiento y Calibración de Equipos.



Figura 12. Proceso general de operación de un SVCA Automático

El análisis de la muestra es realizado de manera continua por el equipo, con base en las propiedades físicas o químicas del gas y sus posibles reacciones ante ciertos fenómenos, que generalmente están relacionados con la incidencia de energía en diferentes longitudes de onda. Por esta razón, los analizadores automáticos emplean principalmente métodos ópticos y electrónicos para la determinación de la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos.

La operación de todo SVCA Automático debe estar amparada bajo un plan que defina cada una de las etapas de ejecución y los responsables del desarrollo de tales etapas, de modo que el proceso se mecanice y se lleve a cabo garantizando la calidad de la información tomada. El mecanismo que garantiza la efectividad del proceso y la calidad de la información es el Plan de Calidad del SVCA el cual debe desarrollarse a lo largo de todo el proceso.

Dentro de este plan se debe incluir el mantenimiento preventivo y correctivo, al igual que la calibración; labores que aseguran la operatividad de los equipos y la veracidad en la lectura de las muestras tomadas. En el Plan de Calidad se debe elaborar un flujo detallado del proceso que permita establecer actividades rutinarias y no rutinarias a realizar.

Para que el esquema anterior se cumpla, se debe tener en cuenta que cada estación automática deberá tener un sistema de comunicaciones adecuado (teléfono fijo, celular, radio, etc.). De otra forma será necesaria una rutina de recolección de información, que en gran medida anularía las

ventajas de la automatización. A continuación se describen cada una de las etapas de operación para un SVCA Automático.

5.2. ETAPAS DE LA OPERACIÓN

5.2.1. TOMA DE MUESTRA Y ANÁLISIS⁵

Esta etapa comprende los procedimientos relacionados con la toma de la muestra y su análisis en un SVCA Automático. A continuación se describen los métodos empleados por los equipos para el análisis de la muestra.

5.2.1.1. *Analizador de material particulado (PST, PM10 y PM2.5)*

Principio de Operación: Absorción Beta

En este método para la medición de partículas el material es recolectado del aire ambiente por medio de una cinta. La intensidad de los rayos Beta es medida después de que éstos son atenuados por el material particulado. La intensidad es relacionada con la masa del material particulado depositada en la cinta, después de haber efectuado las respectivas correcciones debidas a la absorción de la cinta.

El Carbono-14 o el Prometio-147 son utilizados como fuentes Beta en niveles apropiados de radiación, posteriormente tales radiaciones son detectadas con un centelleador plástico. En la Figura 13 se presenta un esquema del funcionamiento de este tipo de equipos.

⁵ Tomado y complementado de Informe de técnicas y estrategias de monitoreo utilizadas por el DAMA en sus estaciones de monitoreo ambiental.

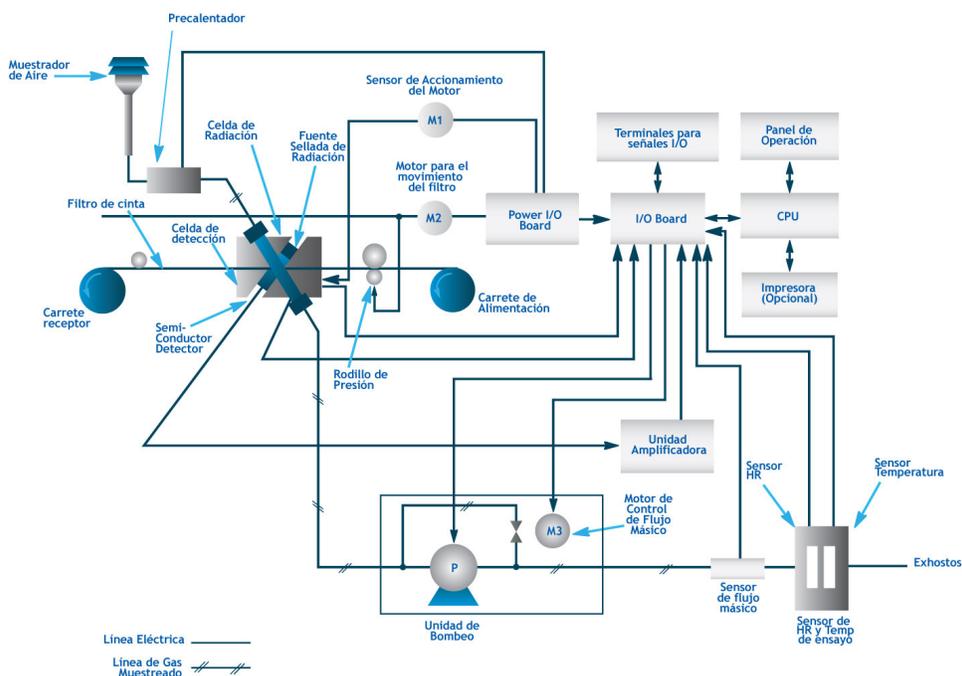


Figura 13. Esquema analizador Beta⁶.

Principio de Operación: Tapered Element Oscillating Microbalance - TEOM

Este sistema de medición utiliza un filtro intercambiable montado al final de un tubo hueco afilado. El extremo ancho del tubo es fijo. El elemento afilado vibra en su frecuencia natural; el aire de muestra pasa a través del filtro, en donde se depositan las partículas. La frecuencia de vibración natural disminuye conforme aumenta la masa de material particulado en el filtro, mientras la electrónica del equipo monitorea esta frecuencia.

Este equipo basa su lectura considerando la relación física entre la masa depositada en el filtro y la frecuencia de vibración del elemento. El cambio en tiempo real de la masa es combinado con la exactitud del flujo controlado, con el ánimo de garantizar una medición precisa de la concentración del material particulado depositado.

5.2.1.2. Analizador de óxidos de azufre (SOx)

Principio de Operación: Fluorescencia Ultravioleta

Este método está basado en la energía de luz discreta descargada o fluorescencia característica de la molécula de dióxido de azufre SO₂ cuando es irradiada con luz ultravioleta. Esta luz fluorescente está también en la región ultravioleta (UV) del espectro, aunque a una longitud de onda distinta que la radiación incidental.

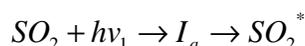
Una de las ventajas de este método de detección es que la medición a longitudes de onda comprendidas entre 190 y 230 nm, presenta poca interferencia de la fluorescencia debida a otras sustancias que puedan estar presentes en el aire ambiente y que no corresponden a lo que se

⁶ Tomado del catálogo del equipo PARTICULATE MONITOR FPM 222-223 DKK TOA Corporation

desea medir. La luz es detectada por un tubo fotomultiplicador que produce un voltaje proporcional a la intensidad de la luz, la cual, a su vez, es traducida a concentraciones de SO₂ por medio de factores de calibración.

Esta tecnología utiliza dos tipos de luz, una fuente UV continua, mecánicamente interrumpida, o una fuente de luz UV electrónicamente pulsada. A longitudes de onda específicas, tanto el vapor de agua como el oxígeno, pueden distorsionar la fluorescencia de los óxidos de azufre.

Una lámpara de Xenón emite la radiación UV, la cual pasa a través de una cámara de reacción donde las moléculas de SO₂ son excitadas debido a la energía radiada, disipando parte de la energía con movimientos vibracionales y rotacionales. La reacción que describe este fenómeno es:



Debido a que por naturaleza, todo cuerpo o sustancia tiende a recuperar su estado inicial, las moléculas de SO₂ excitadas, comienzan a emitir una radiación superior en longitud de onda a la radiación aplicada (aproximadamente 350 nm) generando así una luz fluorescente que es detectada por el tubo fotomultiplicador (PMT), la cual es proporcional a la concentración de SO₂ en la cámara de reacción.

La absorción de radiación por las moléculas de SO₂ cumple la Ley de Lambert - Beer, que se puede expresar de la siguiente forma:

$$A = \log\left(\frac{I_a}{I_o}\right) = a \cdot x \cdot C_{SO_2}$$

Donde:

A= Absorbancia de SO₂ (adimensional)

I_a= Intensidad de la luz ultravioleta en cualquier punto del sistema (radiación resultante)

I_o= Intensidad de la luz ultravioleta incidente (radiación incidente)

a = Coeficiente de absorción del SO₂ o absorbidad molar (l/mol.cm)

x = Longitud de la trayectoria o camino óptico recorrido o tamaño de la celda (cm)

C_{SO₂} = Concentración molar de SO₂ (mol/l)

El coeficiente de absorción es propio de cada sustancia y se puede encontrar en diferentes fuentes bibliográficas relacionadas con las técnicas de análisis cuantitativo para sustancias químicas⁷.

La Figura 14 muestra un diagrama de flujo correspondiente a un analizador de dióxido de azufre empleando la técnica de fluorescencia ultravioleta.

⁷ Tutorial relacionado con la ley de Lambert - Beer. [on line]:
<http://teaching.shu.ac.uk/hwb/chemistry/tutorials/molspec/beers1.htm>

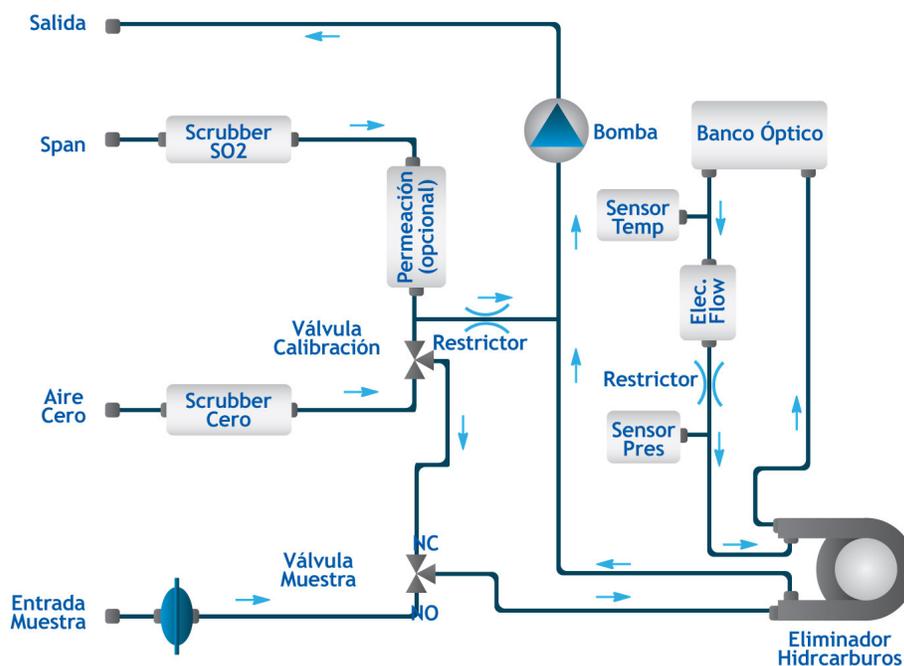


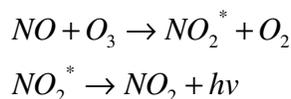
Figura 14. Diagrama de Flujo Analizador de SO₂
(Tomado del manual del analizador de SO₂ Modelo SIR S-5001)

5.2.1.3. Analizador de óxidos de nitrógeno (NO/NO₂/NO_x)

Principio de Operación: Quimioluminiscencia

La quimioluminiscencia es una técnica empleada en la determinación cuantitativa de la concentración de alguna sustancia en particular presente en una mezcla comúnmente conocida como *analito*. Es especialmente útil cuando el analito se encuentra en muy bajas concentraciones. El método se fundamenta en emplear la energía emitida por una sustancia química que haya sido excitada previamente a través de radiación generada para lograr tal fin, similar al principio de operación de los métodos por fluorescencia y por espectroscopia de emisión atómica.

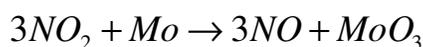
Para el caso de medición de los óxidos de nitrógeno, el principio de medición consiste en provocar la reacción del monóxido de nitrógeno con el ozono para formar dióxido de nitrógeno. Parte de estas moléculas que se forman se encuentran en estado excitado como consecuencia del salto de electrones a niveles de energía más altos. Estas moléculas excitadas, al volver a su estado fundamental emiten una radiación quimioluminiscente detectable:



El aire que es succionado por el analizador desde el ambiente, es filtrado y dividido en dos líneas de flujo, cada uno de las cuales llega a una respectiva cámara. En una de las líneas de flujo la muestra de aire filtrado no sufre ningún tipo de sometimiento a energías radiantes, ni a agentes químicos, es decir, corresponde al valor blanco o testigo. En la segunda línea de flujo, se incita a

La reducción del NO₂ a NO mediante acción catalítica. La primera línea de flujo llega a una cámara de reacción, donde se determina la concentración total de NO_x, y la segunda, finaliza en una cámara de reacción diferente a la anterior donde se determina la concentración de NO. La concentración de NO₂ es obtenida por la diferencia matemática entre las concentraciones de NO_x y NO.

La luz emitida es medida en el tubo fotomultiplicador (PMT) después de pasar por un filtro óptico de banda angosta. La intensidad de luz recibida por el PMT es proporcional a la concentración de NO. La medición de NO₂ se logra convirtiendo el NO_x de la corriente de aire en NO, haciendo pasar la corriente de aire por un catalizador de molibdeno a 315 °C, que convierte el NO_x a NO como se describe en la siguiente reacción:



La Figura 15 muestra un diagrama de flujo correspondiente a un analizador de dióxido de nitrógeno empleando la técnica de quimioluminiscencia.

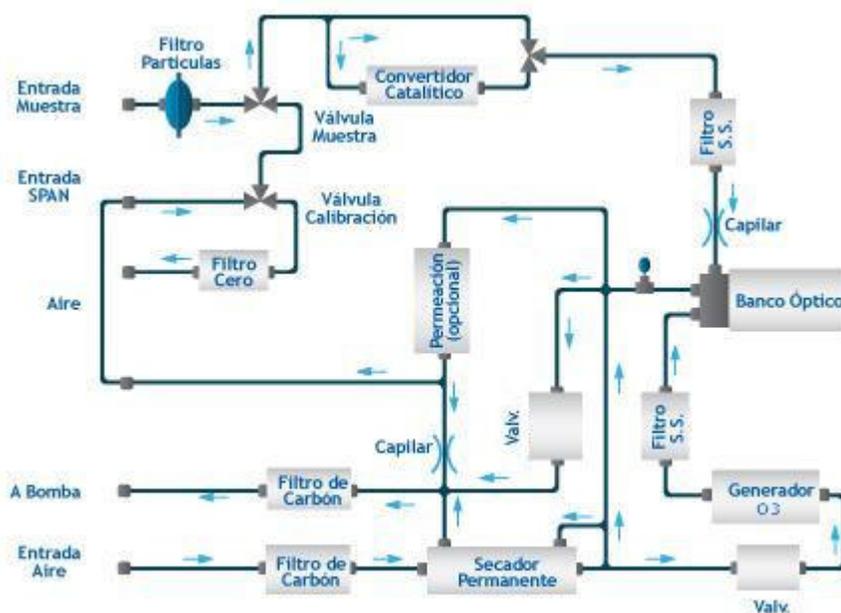


Figura 15. Diagrama de Flujo Analizador NO_x⁸

⁸ Tomado del manual del Analizador de SO2 MODELO SIR S-5012 NO_x

5.2.1.4. Analizador de ozono (O₃)

Principio de Operación: Absorción Ultravioleta

La determinación de ozono por absorción ultravioleta se basa también en la Ley de Lambert - Beer⁹:

$$A = \log\left(\frac{I_a}{I_o}\right) = a \cdot x \cdot C_{O_3}$$

Donde:

A= Absorbancia de O₃ (adimensional)

I_a= Intensidad de la luz ultravioleta en cualquier punto del sistema (radiación resultante)

I_o= Intensidad de la luz ultravioleta incidente (radiación incidente)

a = Coeficiente de absorción del O₃ o absorbidad molar (l/mol.cm)

x = Longitud de la trayectoria o camino óptico recorrido o tamaño de la celda (cm)

C_{O₃} = Concentración molar de O₃ (mol/l)

Cabe anotar que también existen analizadores de ozono cuyo principio de detección se basa en la quimioluminiscencia del ozono al reaccionar con etileno (C₂H₄). Este método presenta como desventaja, en comparación con la determinación por absorción UV, que requiere de agentes químicos reaccionantes.

El principio de operación del equipo es similar al analizador de óxidos de nitrógeno, la muestra de aire succionada por la bomba del equipo es filtrada y bifurcada en dos flujos iguales, uno de estos flujos atraviesa una sección que contiene óxidos de molibdeno como catalizador, el cual atrapa el ozono de la muestra que es empleada como patrón en la medida, para lo cual es dirigida a una celda de medición. El otro flujo pasa directamente a una celda de medición diferente sin atravesar por ningún lecho de catalizador. En las celdas se lleva a cabo el proceso de irradiación de las muestras (la radiación UV es generada por una lámpara de mercurio) y la absorbancia en ambas celdas es determinada por un PMT.

La señal de absorbancia de ambas celdas son traducidas internamente por el analizador a señales eléctricas y la diferencia entre estas señales es proporcional y equivalente a la concentración de ozono presente en la muestra de aire ingresada originalmente al equipo. Este valor de concentración es traducido a una señal digital la cual es reportada por el datalogger y almacenado en la unidad de procesamiento del analizador, para su posterior transferencia a la central de información del SVCA.

La Figura 16 muestra un diagrama de flujo correspondiente a un analizador de ozono empleando la técnica de absorción ultravioleta.

⁹ Equipos y sistemas de evaluación continua de contaminantes atmosféricos. [on line]: http://www.personal.us.es/jmorillo/medicion5/evaluacion_continua_resumen.pdf

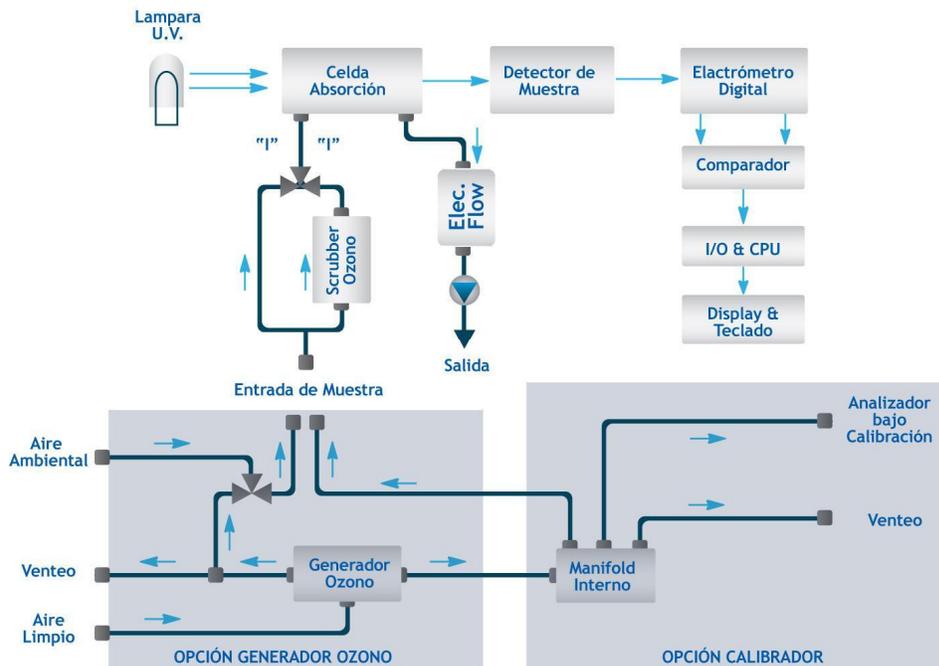


Figura 16. Diagrama de Flujo Analizador O₃¹⁰

5.2.1.5. Analizador de monóxido de carbono (CO)

Principio de Operación: Correlación de Filtro de Gas (GFC)

La incidencia de radiación infrarroja (IR) atraviesa una rueda rotatoria filtrante de gas (una mitad contiene CO y la otra mitad contiene nitrógeno) antes de ingresar a la celda de muestra. Cuando la radiación infrarroja pasa a través de la mitad de la rueda que contiene CO, todas las longitudes de onda absorbidas por el CO son completamente removidas de la radiación, creando un rayo de "referencia" el cual no resulta afectado por el CO en la muestra que se mide. Cuando la energía IR atraviesa la mitad de la rueda que contiene nitrógeno, las longitudes de onda específicas de CO no son removidas de la radiación, y un rayo de "medición" será atenuado por CO en la muestra. La rotación de la rueda de filtro de gas crea un haz que alterna entre fases de "referencia" y "medición". La energía infrarroja que atraviesa el filtro y la celda de muestra es detectada por un sensor de estado líquido y es convertida a un valor de concentración. Los analizadores infrarrojos CFG son, en general, menos sensibles a los gases interferentes, las fluctuaciones de potencia de la fuente IR, la vibración y la acumulación de polvo en el medio óptico¹¹.

La Figura 17 muestra un diagrama de flujo correspondiente a un analizador de monóxido de carbono empleando la técnica de correlación de filtro de gas.

¹⁰ Tomado del manual del Analizador de O₃ MODELO SIR S-5014

¹¹ Informe de técnicas y estrategias de monitoreo utilizadas por el DAMA en sus estaciones de monitoreo ambiental

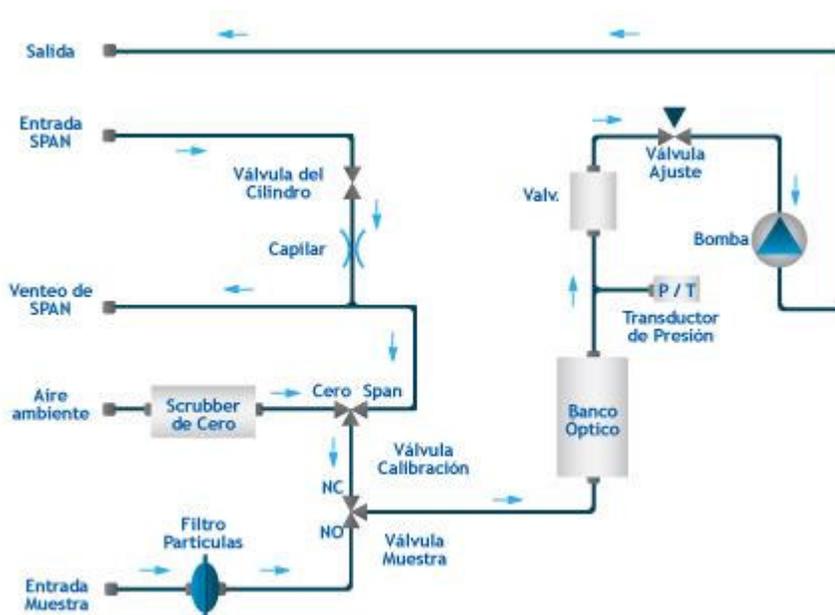


Figura 17. Diagrama de Flujo Analizador CO¹²

5.2.1.6. Analizador de hidrocarburos metánicos y no metánicos

Principio de Operación: Cromatografía de Gases por Ionización de Llama

La muestra de gas es succionada por una bomba eléctrica ubicada en el interior del analizador. El flujo de gas es controlado por el instrumento el cual permite el paso de muestra durante 12 segundos, después no se hace ninguna inyección de aire. El ciclo total se completa cada 3 minutos, dando como resultado un total de 20 ciclos en una hora.

En el comienzo del ciclo, la válvula inyecta el contenido de la muestra en una columna cromatográfica (consiste en un aceite de silicona ubicada sobre un soporte sólido), apareciendo el metano en sentido descendente de la columna y en orden secuencial de tiempo, seguido por otros hidrocarburos pesados.

Alcanzado el fin de la corriente, en sentido descendente de la columna y la vaselina cromatográfica, se lleva a cabo la lectura de la concentración máxima de metano. Posteriormente, los hidrocarburos que permanecen en la columna son lavados a contracorriente para así medir el pico de estos que aparece en la vaselina cromatográfica y dentro del sistema de la columna (el flujo es revertido directo en la columna) para mostrar así el pico medido de hidrocarburos no metánicos.

La muestra es transportada a un detector de llama de hidrogeno donde las concentraciones máximas de hidrocarburos son medidas. De todas las mediciones en el detector se generan señales eléctricas que son amplificadas y registradas en la pantalla y la altura de los picos de los componentes del gas, las cuales se expresan como concentraciones.

¹² Tomado del manual del Analizador de CO MODELO SIR S-5006

5.2.1.7. Otros elementos necesarios para la operación de SVCA automáticos

Con el fin que los equipos automáticos funcionen adecuadamente y puedan ser calibrados, es necesario que cuenten con equipos accesorios y gases patrón que garanticen la confiabilidad de los resultados de la medición. Estos accesorios se muestran a continuación.

Generador de aire cero

Es un sistema simple capaz de producir aire seco de alta calidad libre de partículas. Están diseñados para remplazar cilindros de gas como fuente estándar de calibración.

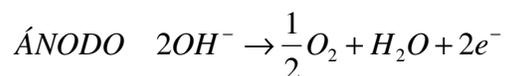
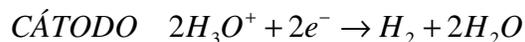
La operación consiste en llevar el aire ambiente al generador de aire cero donde es comprimido y luego purificado usando una combinación de desecantes y filtros. Hay dos juegos de cánister de desecantes, los cuales tienen que ser llenados periódicamente; bajo uso normal, durarán hasta seis meses. El otro juego de cánister contiene carbón, purafil y paladio en alúmina, un catalítico que no es consumible. Se debe tener en cuenta el cambio periódico del filtro.

Calibrador dinámico por dilución

Permite realizar dilución de gases y efectuar calibraciones a los analizadores de gases. Provee estándares de calibración para chequeos multipunto, span y de cero.

Generador de hidrógeno

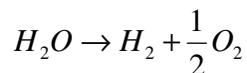
El más importante componente de cada generador es el sistema electrolítico constituido a partir de un número de electrodos en serie. Una característica general de los electrodos Claind es un orificio estrecho que permite que sean ensamblados dentro de una celda completa. Cuando un voltaje continuo es suministrado a los conectores en una terminal electrónica de una celda de modo electrolítica, ocurre la siguiente reacción:



La reacción autopirólisis de agua ocurre así:



La transformación total del agua queda:



El electrolizador produce H₂ y O₂. El oxígeno es disipado sin peligro dentro de la atmósfera, mientras el flujo de hidrogeno va directo a un desecador donde es secado con un rociado a presión a una temperatura de - 57° F (- 40°C). Después es estimulado el generador y los gases producidos por la electrólisis del agua son separados y no pueden volver a combinarse.

Este hidrógeno producido es desmineralizado y requerido para rellenar el tanque interno (cargado automática o manualmente por el operador). La cantidad de agua electrolizada en la unidad depende directamente de la constante de flujo que cruza directo al modulo de celda. Un

electrolito alcalino (escala definida durante la manufactura) es adherido al agua para aumentar la alcalinidad.

Herramientas, equipamiento e instrumental de uso general

Para realizar de manera adecuada la revisión y calibración de las estaciones automáticas, es necesario contar con una serie de herramientas e instrumentos básicos, los cuales se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Herramientas básicas para realizar el mantenimiento de las estaciones automáticas

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Hombre Solo de 10"	1
Alicate	1
Martillo	1
Brocha de 2"	1
Juego de llaves Bristol en pulgadas	1
Juego de llaves Bristol en milímetros	1
Juego de destornilladores (4 pala + 2 estrella)	6
Pinza recta	1
Corta Frío aislado	1
Bisturí	1
Pinza curva	1
Llave expansiva de 6"	1
Juego de limas (4 x 160 mm x 10pcs)	10
Juego de destornilladores de precisión (4 pala + 2 estrella)	6
Brújula	1
Multímetro digital TM - 178	1
Termómetro de referencia	1

Estos implementos son indispensables para efectuar los diversos procedimientos de mantenimiento revisión y calibración de los equipos que conforman las estaciones automáticas de calidad del aire. Sin embargo, en caso de ser necesario, las actividades de revisión y calibración que requieran de un desarrollo más complicado o de mayor duración deberán ser ejecutadas con algunos equipos adicionales que se incluyen en los procedimientos específicos.

Entre estos equipos y herramientas se puede mencionar el burbujeador, utilizado para evaluar el adecuado funcionamiento de los calibradores multigas y el medidor de flujo para verificar el comportamiento de los muestreadores de material particulado.

5.2.2. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Esta actividad comprende la validación de los datos y la determinación de factores puntuales que pudieron afectar la medición, a fin de incluirlos en la base de datos. Durante esta etapa se realiza el análisis y la consolidación de los datos para llegar a conclusiones acerca de la calidad del aire dentro del dominio del SVCA. Es en esta etapa donde se deben cumplir los objetivos previstos para el sistema. En el capítulo sobre etapas comunes a todos los SVCA (Capítulo 9) se muestra la forma en que debe realizarse el procesamiento de la información.

Previo al procesamiento de la información se deben enviar los datos al analista desde la estación. Para ello es necesario que existan ciertos dispositivos que se encargarán de la toma del dato desde el analizador, el preprocesamiento, en promedios configurados por el usuario y la transmisión de los datos tal como se muestra en la Figura 18.

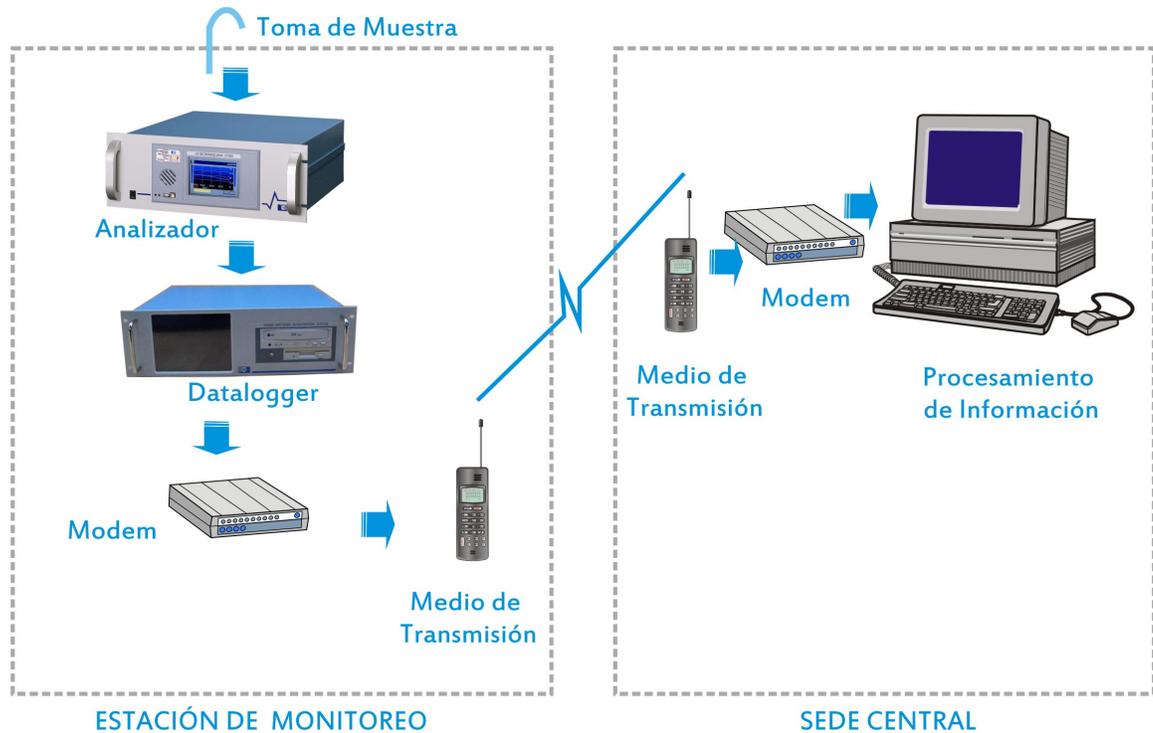


Figura 18. Proceso de tomas de muestras hasta el procesamiento de la información

Por lo general en los SVCA el procesamiento de la información se realiza automáticamente a través de un software central que comunica con las estaciones y gestiona la información para que sea transferida y luego analizada con las herramientas propias de dicha aplicación. Un ejemplo de captura y manejo de la información se presenta en la Figura 19.

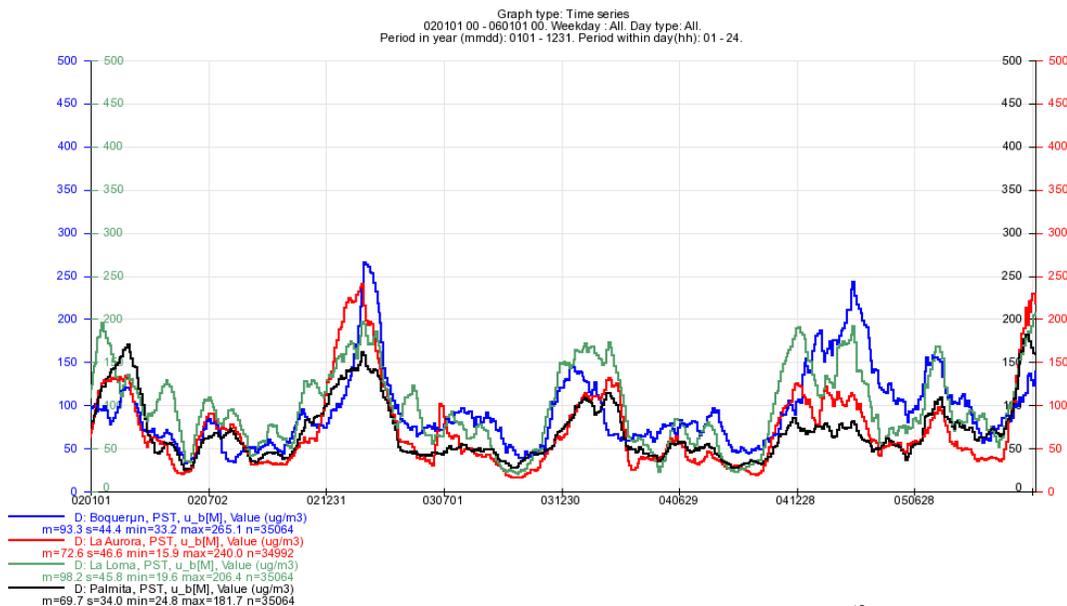


Figura 19. Ejemplo captura y manejo de la información¹³

5.2.3. REPORTE

El reporte es el resultado de la operación del SVCA que se lleva a la comunidad, dependiendo del SVCA del aire dicho reporte tendrá unas características específicas, como su publicación en página web o a través de informes periódicos. La forma específica de los reportes se presenta en el Capítulo 9 donde se establecen elementos comunes a todos los SVCA, en donde se detallan los componentes mínimos para cada uno de los reportes.

5.2.4. ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD

Esta actividad comprende el conjunto de procesos y requerimientos necesarios para garantizar la confiabilidad de la información. El Aseguramiento y Control de la Calidad debe llevarse a cabo a lo largo de todas las etapas de la operación del SVCA. El Capítulo 9 sobre etapas comunes a todos los SVCA describe la forma como se debe llevar a cabo. Todo SVCA debe tener un Plan de Calidad implementado que garantice la confiabilidad de la información.

5.2.5. MANTENIMIENTO DE EQUIPOS

Cada SVCA debe tener un programa de mantenimiento preventivo y correctivo. Este programa define las acciones generales a seguir con el fin de evitar fallas en el SVCA e incrementar la confiabilidad de los datos.

En el programa de mantenimiento se definen las rutinas de chequeo y limpieza de partes, que aseguran el funcionamiento del sistema, así como también las frecuencias de estas actividades. Es recomendable referirse al manual del fabricante para rutinas de mantenimiento específicas.

¹³ Software AIRVIRO. Sweden Meteorological e Hydrological Institute. Tomado del informe final ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN ZONAS URBANAS Y MINERAS DEL DEPARTAMENTO DEL CESAR. FASE 1 DIAGNÓSTICO Y DISEÑO DE REDES DE MONITOREO.

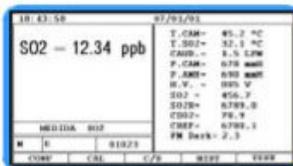
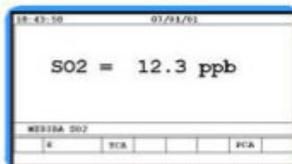
El mantenimiento de los equipos garantizará la continuidad en la toma de muestras en el SVCA. Un estricto programa de mantenimiento preventivo y correctivo debe incluirse en el Plan de Calidad del SVCA. De todos los mantenimientos realizados se debe llevar registro de acuerdo a como se especifique en dicho plan.

Los SVCA automáticos poseen equipos con la capacidad de realizar pruebas automáticas que diagnostican el estado del equipo, tal como se muestra en la Figura 19. No obstante, debe existir un programa de mantenimiento que siga por lo menos los lineamientos especificados a continuación.

MANTENIMIENTO Y CONTROL EXTERNOS

PANTALLA PRINCIPAL- Display simultáneo de:

- Fecha y Hora
- Concentraciones y Unidades.
- Estado de las válvulas internas
- Entradas digitales activadas.
- Hasta seis condiciones de alarma.
- Fase actual de medida
- Activación automática de retroiluminación



PANTALLA DE DIAGNÓSTICOS-

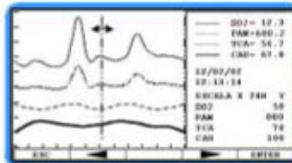
- Potente software de diagnósticos, determinación de posibles averías.
- El parámetro anómalo se muestra con una flecha.
- Control de Calidad continuo.

MANTENIMIENTO Y CALIBRACIÓN-

- Autorización mediante clave de acceso.

PANTALLA GRÁFICA-

- Gráficos simultáneos de hasta cuatro parámetros.
- Períodos de Integración 5, 10, 15, 30, 60 min.
- Cursor de Selección de fecha, hora, valor, rangos de medida.



SENSORES EXTERNOS

- Se pueden conectar sensores externos.
- El Datalogger y la Memoria son configurables.



HISTÓRICOS

- Generación automática de tablas para los parámetros seleccionados: datos, diagnósticos y sensores externos.
- Períodos de integración seleccionables: 5, 10, 15, 30, 60 min.
- Cursor para referencia rápida a la fecha.
- Indicación de: - Parámetro. - Fecha
- Valor. - Hora
- Condiciones operativas (flag).

TABLA DE ALARMAS -

- Generación automática de alarmas de los parámetros seleccionables: fecha, diagnósticos y sensores externos.



Figura 20. Pruebas automáticas internas y externas de equipos analizadores¹⁴.

5.2.5.1. Revisión de los analizadores de calidad del aire

Antes de realizar la medición de los contaminantes, es necesario realizar una revisión general de los analizadores de calidad del aire. La revisión de cada analizador se debe realizar por separado. A continuación se presenta una breve descripción de las pruebas y actividades que se pueden

¹⁴ Tomado de la página web www.sirsa.es

realizar para este tipo de equipos.

Revisión del analizador de partículas suspendidas totales (PST)

En la Figura 21 se describen las actividades necesarias durante la revisión del analizador de partículas suspendidas totales.



Figura 21. Proceso de revisión de un analizador de partículas suspendidas totales (PST)

Se debe efectuar una observación general al equipo y sus partes, con el fin de revisar el estado de limpieza del cabezal, del toma-muestras, del filtro de partículas y de los sellos y empaques. Así mismo, es necesario verificar el estado de la bomba externa y cambiar el kit con periodicidad semestral.

Se debe igualmente, verificar el estado general de la cinta para comprobar que no se esté rasgando, enredando o sufriendo daños por causas externas. Además, es necesario tener un control visual de la duración de la misma. En caso de encontrar algún problema con la cinta, es necesario detener el proceso de muestreo, arreglar la cinta y posteriormente reactivar nuevamente el proceso de muestreo.

Por otro lado, se debe realizar una prueba general al equipo para comprobar el estado de sus principales parámetros y lecturas, esto permite obtener una idea del estado general del mismo.

Se debe verificar la base de datos del analizador con el fin de visualizar posibles interrupciones en la medición, datos constantes o datos no coherentes durante el registro.

Revisión del analizador de material particulado menor a 10 micras (PM10)

En la Figura 22 se describen las actividades necesarias durante la revisión del analizador de material particulado menor a 10 micras.



Figura 22. Proceso de revisión de un analizador de partículas menores a 10 micras (PM10)

Se debe realizar una revisión general al equipo y a sus diferentes partes, con el fin de verificar el estado de limpieza del cabezal, del toma-muestras, del filtro de partículas y de los sellos y empaques. Así mismo, es necesario verificar el estado de la bomba externa y realizar un cambio de kit con periodicidad semestral.

También se debe verificar el estado general de la cinta para comprobar que no se esté rasgando, enredando o sufriendo daños por causas externas. Además, es necesario tener un control visual de la duración de la misma. En caso de encontrar algún problema con la cinta, es necesario detener el proceso de muestreo, arreglar la cinta y posteriormente reactivar nuevamente el proceso de muestreo.

Igualmente, se debe realizar una prueba general al equipo para comprobar cada uno de sus principales parámetros y lecturas, permitiendo tener una idea del estado general del mismo.

Por otro lado, se debe verificar la base de datos del analizador con el fin de visualizar posibles interrupciones en la medición, datos constantes o datos no coherentes durante el registro.

El cambio de cinta de los analizadores de material particulado es un procedimiento básico de operación que asegura el buen comportamiento y operación de estos analizadores. El procedimiento se efectúa generalmente cada dos meses con el fin de mantener una operación adecuada y constante, sin embargo debe verificarse en la guía del fabricante la frecuencia sugerida y el procedimiento específico, puesto que existen equipos en el mercado a los cuales se les hace cambio de cinta una vez al año.

La función primordial de la cinta es la de retener las muestras de material particulado en un periodo de tiempo determinado, obteniendo entonces una concentración de partículas relacionada directamente con un flujo de entrada de aire y un tiempo de medición.

En la Figura 23 se indica el proceso que se debe realizar para el cambio de la cinta filtro en un analizador de material particulado por atenuación de rayos Beta, tal como se indica a continuación:

- En caso de que la cinta instalada en el analizador no se haya terminado, es indispensable fijar el analizador en modo suspendido. En algunos analizadores con este procedimiento se apaga la bomba automáticamente. Si la bomba de succión del analizador continúa activa, es indispensable apagarla.
- Si la boquilla de muestreo se encuentra en la posición de muestreo, es necesario fijarlo en la posición de espera.
- Antes de liberar la cinta de muestreo se deben soltar los discos sujetadores. Posteriormente, es necesario halar el tornillo sujetador hacia fuera, o la palanca sujetadora hacia arriba, levantando los rodillos que sujetan la cinta. Por último, y sin soltar este tornillo se debe elevar verticalmente el eje que sujeta los rodillos.
- Una vez liberada la cinta de partículas, es necesario retirarla teniendo en cuenta la disposición de la misma con respecto a los rodillos para colocar adecuadamente la nueva cinta.
- Se debe colocar la cinta teniendo mucho cuidado con la disposición de la misma en relación con los rodillos, y recordando que esta debe desplazarse de derecha a izquierda. En algunos analizadores es necesario halar de nuevo la palanca para que libere los rodillos y estos aseguren nuevamente la cinta.
- Antes de poner en operación nuevamente el monitor, es necesario halar de nuevo el tornillo sujetador para que libere los rodillos y éstos aseguren nuevamente la cinta.
- Posteriormente, es necesario fijar el analizador en modo normal, lo que activa automáticamente la bomba, y esperar a que se cumpla la secuencia de inicio y que se fije en la fase medición.



Figura 23. Proceso de revisión del analizador de material particulado PM10

Revisión del analizador de dióxido de azufre (SO₂)

En la Figura 24 se describen las actividades a realizar durante la revisión del analizador de dióxido de azufre, tal como se muestra a continuación:

- Verificar las conexiones eléctricas y neumáticas del analizador, así mismo es necesario verificar el nivel de flujo y el funcionamiento de la bomba.
- Revisar que el analizador se encuentre prendido y en modo de muestreo y no presente señales de alarma. Así mismo se debe revisar el dato en la pantalla con el fin de ver posibles variaciones en el mismo.
- Realizar un diagnóstico general del mismo, verificando los diversos parámetros de diagnóstico que se muestran en pantalla. Dichos parámetros deben encontrarse dentro de los rangos recomendados por el fabricante.
- Por último, es importante verificar el dato mostrado en la pantalla del analizador contra el dato registrado por el datalogger, dicha verificación puede ayudar a identificar fallas internas, fallas de conexión o de transmisión, o fallas de configuración.



Figura 24. Proceso de revisión del analizador de dióxido de azufre (SO₂)

Revisión del analizador de óxidos de nitrógeno (NO/NO_x)

En la Figura 25 se describen las actividades necesarias durante la revisión del analizador de óxidos de nitrógeno, tal como se muestra a continuación:

- Es necesario verificar las conexiones eléctricas y neumáticas del analizador, así mismo es necesario verificar el nivel de flujo presente y el buen funcionamiento de la bomba.
- Es importante revisar que el analizador se encuentre prendido y en modo de muestreo y no presente señales de alarma. Así mismo, se debe revisar el dato en la pantalla con el fin de observar posibles variaciones.
- Después de revisar el funcionamiento básico del equipo, es necesario realizar un diagnóstico general del mismo, verificando los diversos parámetros de diagnóstico que se muestran en pantalla. Dichos parámetros deben encontrarse dentro de los rangos recomendados por el fabricante.
- Por último, es importante verificar el dato mostrado en la pantalla del analizador contra el

dato registrado por el datalogger. Dicha verificación puede ayudar a identificar fallas internas, fallas de conexión o de transmisión y fallas de configuración.



Figura 25. Proceso de revisión del analizador de óxidos de nitrógeno (NO/NO_x)

Revisión del analizador de ozono (O₃)

En la Figura 26 se describen las actividades necesarias durante la revisión del analizador de ozono, tal como se muestra a continuación:

- Es necesario verificar las conexiones eléctricas y neumáticas del analizador, así mismo es necesario verificar el nivel de flujo presente y el buen funcionamiento de la bomba.
- Es importante revisar que el analizador se encuentre prendido y en modo de muestreo y no presente señales de alarma. Así mismo, se debe revisar el dato en la pantalla con el fin de ver posibles variaciones en el mismo.
- Después de revisar el funcionamiento superficial del equipo, es necesario realizar un diagnóstico general del mismo, verificando la temperatura de la celda de reacción, el flujo

interno y el voltaje de la lámpara.

- Por último, es importante verificar el dato mostrado en la pantalla del analizador contra el dato registrado por el sistema de adquisición de datos (datalogger). Dicha verificación puede ayudar a identificar fallas internas, fallas de conexión o de transmisión y fallas por configuración.



Figura 26. Proceso de revisión del analizador de ozono (O₃)

Revisión del analizador de monóxido de carbono (CO)

En la Figura 27 se describen las actividades necesarias durante la revisión del analizador de monóxido de carbono, tal como se muestra a continuación:

- Se debe verificar las conexiones eléctricas y neumáticas del analizador, así mismo es necesario verificar el nivel de flujo presente y el buen funcionamiento de la bomba.
- Es importante revisar que el analizador se encuentre prendido y en modo de muestreo y no presente señales de alarma. Así mismo se debe revisar el dato en la pantalla con el fin de

observar posibles variaciones.

- Revisado el funcionamiento básico del equipo, es necesario realizarle un diagnóstico general, verificando los diversos parámetros de diagnóstico que se muestran en pantalla del equipo. Dichos parámetros deben encontrarse entre los rangos recomendados por el fabricante.
- Por último, y antes de continuar con otros analizadores, es muy importante verificar el dato mostrado en la pantalla del analizador contra el dato registrado por el datalogger. Esta verificación puede ayudar a identificar fallas internas, fallas de conexión, de transmisión o fallas de configuración.



Figura 27. Proceso de revisión del analizador de monóxido de carbono (CO)

Cambio de filtros en los analizadores de gases

Los analizadores de gases cuentan con filtros, generalmente de teflón, que sirven para evitar la entrada de material particulado en los mismos, y en particular, hacia la cámara de reacción o las celdas ópticas. Los filtros pueden ser de 37 o 47 milímetros y normalmente tienen una porosidad de cinco micras. Dichos filtros hacen parte de los consumibles determinantes para la adecuada operación de los analizadores de calidad del aire.

Algunos analizadores presentan un filtro externo, localizado en la parte posterior del rack, al lado de los manifolds de muestreo y otros cuentan con un compartimiento interno ubicado en la parte

frontal del analizador. Sin embargo, el tipo de filtro y la metodología para el cambio es muy similar en ambos casos y se describe en la Figura 28.

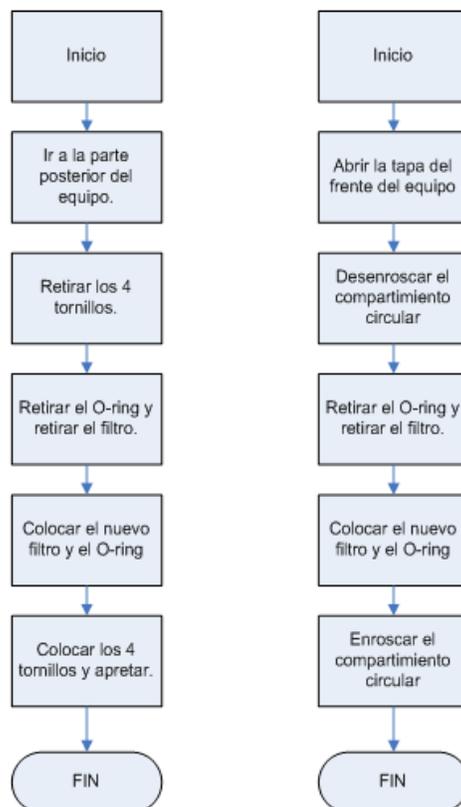


Figura 28. Proceso de cambio de filtros en los analizadores de gases

En el caso de analizadores con el filtro en la parte posterior, se deben desenroscar los tornillos que permiten abrir y cerrar el dispositivo que lo contiene, levantando la tapa y dejando el filtro al descubierto.

En el caso de analizadores con el filtro en la parte frontal se debe abrir el panel frontal del analizador doblándolo hacia abajo, ubicar el filtro al lado izquierdo del panel e inspeccionarlo visualmente a través de la ventana de vidrio. Posteriormente, se debe desenroscar la tapa del dispositivo que contiene el filtro, retirando el vidrio protector y dejándolo al descubierto.

Una vez retirada la tapa del filtro, es necesario liberar el mismo retirando el anillo sujetador y el O-ring para luego extraer el filtro.

Después de haber retirado el filtro usado, se debe tomar un filtro nuevo y colocarlo en el dispositivo teniendo en cuenta que el elemento debe estar completamente asentado en el fondo del mismo.

Antes de cerrar nuevamente el dispositivo del filtro, se debe revisar el estado del O-ring y reemplazarlo, en caso de ser necesario. Posteriormente, se debe colocar el anillo sujetador y cerrar la tapa del dispositivo ajustándola manualmente.

5.2.5.2. Verificación de la calibración de los analizadores de calidad del aire

Para verificar el funcionamiento de los analizadores de gases contaminantes, es necesario realizar una calibración multipunto, utilizando la metodología recomendada por la EPA. Esta metodología consiste esencialmente en hacer pasar una mezcla de gases de concentración conocida a través del analizador y comparar el valor reportado por el equipo contra el valor del patrón.

La Figura 29 ilustra la metodología empleada para los analizadores de SO₂, NO/NO_x y CO. En el caso de la metodología para analizadores de O₃ existe una leve diferencia en el montaje dado que no existen cilindros con O₃ por ser un gas altamente inestable. Sin embargo, dicha metodología se presenta más adelante.

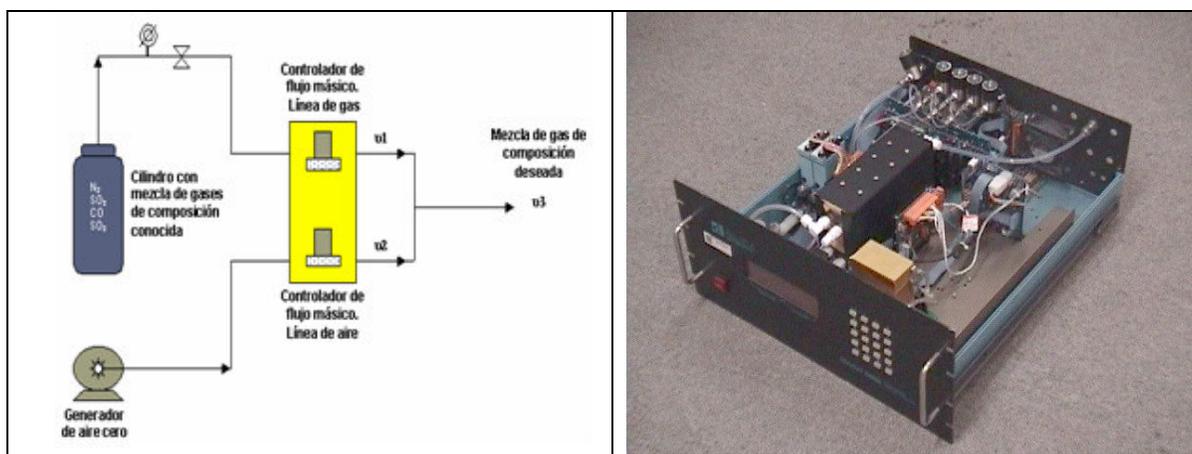


Figura 29. Ilustración del proceso de verificación de la calibración de los analizadores de gases

Se recomienda emplear un cilindro de una mezcla gaseosa de concentración conocida y con certificado de composición bajo trazabilidad NIST¹⁵. Esto permite asegurar que la mezcla utilizada tenga una concentración exacta y por lo tanto asegura la precisión y exactitud del proceso de calibración. En la Figura 30 se indica el procedimiento que se debe seguir para realizar la calibración.

¹⁵ NIST: Instituto de pruebas estándar de Estados Unidos

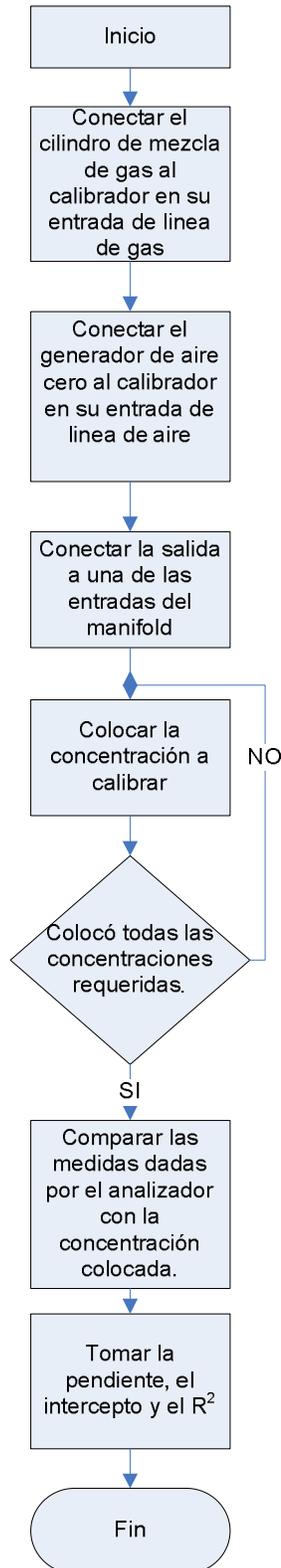


Figura 30. Proceso de calibración

METODOLOGÍA PARA EFECTUAR LA CALIBRACIÓN MULTIPUNTO DE ANALIZADORES DE CALIDAD DEL AIRE

La calibración multipunto de analizadores de calidad del aire consiste básicamente en efectuar al menos cinco mezclas de concentración conocida, las cuales se hacen pasar a través de los equipos analizadores con el fin de evaluar la precisión y exactitud de los datos arrojados por dichos equipos.

El patrón de referencia

Como se menciona en el numeral 5.2.5.3, el calibrador multigas es el patrón de referencia para evaluar el adecuado comportamiento de los analizadores de calidad del aire.

Se debe emplear un cilindro con una mezcla de gases con concentraciones como la especificada en la Tabla 2. La composición de los gases de este cilindro debe ser certificada. Esto permite asegurar que la mezcla utilizada tenga una concentración exacta y por lo tanto asegura la precisión y exactitud del proceso de calibración.

Tabla 2. Ejemplo de la composición de la mezcla de gases del cilindro usado para la verificación de la calibración de los analizadores de gases

COMPUESTO	COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA (PPM)
CO	1010
NO	50,0
SO ₂	48,5

Como gas de dilución se debe usar un cilindro de N₂ de alta pureza (99.999%) o en su lugar una fuente de generación de aire cero, que posea lavadores de CO, HC, NO_x, SO₂ y O₃. Este procedimiento se ciñe a las recomendaciones de la EPA para calibración de analizadores de gases.

Como mezclador dinámico de gases se debe emplear un calibrador multigas (calibrador dinámico) que permita generar diversas mezclas de concentraciones conocidas.

Antes de efectuar la calibración de los equipos es necesario verificar el correcto funcionamiento de este mezclador. La verificación del funcionamiento del calibrador multigas seleccionado se debe aplicar tanto al inicio del proceso de verificación de calibración de los analizadores de gases, como al final de acuerdo con las especificaciones dadas en el numeral 5.2.5.3. El resultado del anterior procedimiento debe ser muy similar con el fin de asegurar la precisión y exactitud de la calibración efectuada.

Actividades previas

Antes de dar inicio al proceso de calibración de los analizadores de gases existe una serie de actividades que se deben realizar con el fin de asegurar el buen funcionamiento de los equipos y de la metodología utilizada.

- **Herramientas utilizadas**

Para empezar con la calibración de los analizadores de gases, es necesario contar con las siguientes herramientas:

- Llave de expansión
- Destornillador de pala
- Acople para pasar del sistema milimétrico a NPT
- Compresor
- 2 mangueras de polietileno LDPE
- Calibrador Multigas

- **Purga del compresor de aire**

Como medida de seguridad, antes de realizar el montaje, es necesario purgar el compresor de aire abriéndole el desagüe que posee en uno de sus costados. Esto, con el fin de asegurar que el aire que va a ser introducido en los Controladores de Flujo Mássico no contiene agua que pueda afectar los sensores y el funcionamiento de esta parte del equipo.

- **Verificación de la fecha de vencimiento de los gases utilizados**

Antes de iniciar la calibración de los analizadores de gases, es indispensable verificar la fecha de vencimiento de los gases que se utilizarán para dicho efecto. Este procedimiento es indispensable con el fin de asegurar la validez de los datos que se utilizarán durante el proceso.

Montaje

Para realizar la calibración de los analizadores de gases se debe conectar una fuente de aire cero a la línea de aire del calibrador y un cilindro con mezcla de gases certificada a una de las líneas de gases. Adicionalmente, es necesario conectar la salida del calibrador al manifold que distribuye las muestras de aire a cada uno de los equipos.

Una vez efectuado el montaje inicial, es necesario tapar otras entradas de muestra tanto al manifold como a los equipos, con el fin de evitar diluciones adicionales y poder asegurar la concentración de la dilución suministrada a cada uno de los equipos.

Por otra parte, es importante tener en cuenta el flujo de entrada de los analizadores, y la cantidad de analizadores alimentados por el manifold con el fin de aplicar, como flujo de muestra, al menos la sumatoria de flujos, a la entrada del manifold. El flujo de mezcla debe ser igual o superior al flujo total tomado por los analizadores con el fin de evitar diluciones adicionales.

Proceso de verificación y de calibración

Se entiende por CALIBRACIÓN al conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de una magnitud de medida o patrón. A efectos de análisis instrumentales, entenderemos por calibración la determinación de la función de calibración: relación entre la concentración de contaminante en el aire y la lectura del instrumento. El proceso de Calibración implica el ajuste de la respuesta del equipo. Por otro lado se entiende por VERIFICACIÓN las mismas acciones descritas anteriormente, pero sin la realización de ajustes a los equipos.

A continuación se incluirán todas las verificaciones y calibraciones, tanto de CERO y SPAN como multipunto, a realizar sobre los equipos, así como la periodicidad de las mismas que se realizarán a los monitores de gases.

Se entiende por CERO cuando se suministra aire limpio, sin contaminantes al monitor de gas. SPAN

corresponde al suministro de una concentración conocida del gas, normalmente del 80 - 100% del tope de la escala de medición.

Las operaciones de verificación y de calibración se dividirán de la siguiente forma, según su realización:

- Verificaciones CERO - SPAN.
- Verificaciones Multipunto.
- Calibración de CERO-SPAN.
- Calibración Multipunto de acuerdo con la norma CFR40 (<http://www.epa.gov/lawsregs/search/40cfr.html>)

Como regla se realiza una calibración multipunto después de una reparación mayor de un equipo o después de instalarlo o reinstalarlo. Los periodos de calibración se deben recoger en la ficha de control de equipos junto con los mantenimientos. En la Tabla 3 se muestra una periodicidad para la realización de estas pruebas.

Tabla 3. Periodicidad de las operaciones de control de la calibración de los analizadores de gases

VERIFICACIÓN	PERIODICIDAD
Verificación CERO - SPAN	SEMANTAL
Verificación MULTIPUNTO	MENSUAL
CALIBRACIÓN	PERIODICIDAD
Calibración CERO- SPAN	MENSUAL
Calibración MULTIPUNTO	TRIMESTRAL

El estado de calibración de un equipo debe quedar perfectamente indicado mediante la colocación de una etiqueta sobre el mismo que contendrá la información que se muestra a continuación:

Código del equipo	
Fecha de Calibración	
Fecha de la próxima calibración	

Como casos excepcionales, se realizará una calibración multipunto en los siguientes casos:

- Puesta en marcha del equipo tras una avería o mantenimiento correctivo de importancia
- Puesta en servicio por primera vez del equipo tras su instalación
- Después de un largo periodo fuera de uso, cuya duración dependerá de cada equipo y de la experiencia adquirida sobre el mismo

En las verificaciones de CERO y SPAN se deben adoptar los siguientes criterios de aceptación:

- Deriva de CERO menor que 1% del fondo de escala del rango de medición.
- Deriva de SPAN menor que el 6 % del tope de escala del rango de medición.

Si no se cumple alguno de los criterios anteriores se deberá proceder a revisar el equipo, tras lo cual se realizará una verificación de CERO y SPAN y, en función de los resultados, se realizaría una calibración multipunto.

En las verificaciones multipunto, se tomará como criterio de rechazo el que el factor de correlación este fuera del rango de $1 \pm 0,01\%$, la pendiente fuera del rango de $1 \pm 0,05$ y el intercepto sea mayor que 1% del tope de escala del rango de medición, tal como se muestra en la Tabla 4. En caso de no cumplir estos criterios se debe revisar el equipo y realizar una calibración multipunto antes de poner el equipo en operación.

Los criterios de aceptación para las calibraciones SPAN y CERO o multipunto deben estar establecidos en el programa de AC/CC.

Tabla 4. Criterios para la verificación de la exactitud de analizadores de gases

CRITERIO	ESTADO	RANGO	OBSERVACIONES
Pendiente	Excelente	$< 1 \pm 0,05$	Entre respuesta de analizador y concentración de verificación
	Satisfactoria	De $1 \pm 0,06$ a $1 \pm 0,015$	
	No satisfactoria	$> 1 \pm 0,016$	
Intersecto	Satisfactorio	$0 \pm 3\%$	De la escala completa del analizador
	No satisfactorio	$> 0 \pm 3\%$	
Coeficiente de correlación	Satisfactorio	0,9950 a 1,0000	Respuesta lineal del analizador a concentraciones de verificación
	No satisfactorio	$< 0,9950$	

Los registros de las operaciones de verificación y calibración de los equipos se anotarán en formatos como los que se establecen en la Tabla 5y en la Tabla 6.

Tabla 5. Formato de calibración de SPAN y CERO

TÉCNICO OPERACIÓN	DE			
NOMBRE ESTACIÓN		CÓDIGO ESTACIÓN		
CALIBRACIÓN DE CERO				
Analizador de SO ₂	Cero antes de ajuste (ppb)		Cero después de ajuste (ppb)	
Analizador de NO _x	Cero antes de ajuste (ppb)		Cero antes de ajuste (ppb)	
Analizador de O ₃	Cero antes de ajuste (ppb)		Cero antes de ajuste (ppm)	
Analizador de CO	Cero antes de ajuste (ppm)		Cero antes de ajuste (ppb)	
CALIBRACIÓN DE SPAN				
Analizador de SO ₂	Span antes de ajuste (ppb)		Span después de ajuste (ppb)	
Analizador de NO _x	Span antes de ajuste (ppb)		Span antes de ajuste (ppb)	
Analizador de O ₃	Span antes de ajuste (ppb)		Span antes de ajuste (ppm)	
Analizador de CO	Span antes de ajuste (ppm)		Span antes de ajuste (ppb)	

Tabla 6. Formato de calibración multipunto

TÉCNICO DE OPERACIÓN			
NOMBRE ESTACIÓN		CÓDIGO ESTACIÓN	

Concentración de los gases de referencia		
SO ₂ [PPM]	CO [PPM]	NO ₂ [PPM]

Punto	Q aire [mL/min]	Q gas [mL/min]	Relación de dilución	SO ₂ [PPB]			CO [PPM]			NO ₂ [PPB]		
				Real	Inicial	Final	Real	Inicial	Final	Real	Inicial	Final
0												
1												
2												
3												
4												

Punto	Q aire [mL/min]	Q Ozono [mL/min]	Relación de dilución	O ₃ [PPB]		
				Real	Inicial	Final
0						
1						
2						
3						
4						

En la Tabla 7 se presenta la explicación de los resultados obtenidos después de un proceso de calibración.

Tabla 7. Descripción del significado de los parámetros de calibración de equipos automáticos

PARÁMETRO	SIGNIFICADO
Pendiente	Describe la calibración del equipo. Una pendiente cercana a 1 corresponde a equipos cuya calibración es adecuada. Generalmente se aceptan desviaciones del 10%. Es decir valores entre 0.9 y 1.1
Intercepto	Describe el offset del equipo. Valores cercanos a 0 son deseables. De lo contrario se requiere un ajuste del cero del equipo
R ²	Describe la variabilidad del proceso de evaluación de la calibración del equipo. Valores cercanos a 1 son deseables

5.2.5.3. Verificación del correcto funcionamiento de calibradores multigas

Un calibrador multigas es un equipo que mezcla un gas de referencia (mezcla de CO, NO₂, y SO₂ en N₂ con composición conocida) con aire puro (aire cero) en proporciones deseadas. De esta forma el calibrador multigas proporciona un gas cuya concentración de CO, NO₂, y SO₂ es especificada por el usuario. La Figura 31 ilustra su funcionamiento.

El calibrador multigas consta de una entrada para aire, varias entradas para gases y una sola salida de la mezcla realizada. Los calibradores multigases se utilizan para calibrar los analizadores de CO, NO_x y SO₂ de los sistemas de vigilancia de la calidad del aire.

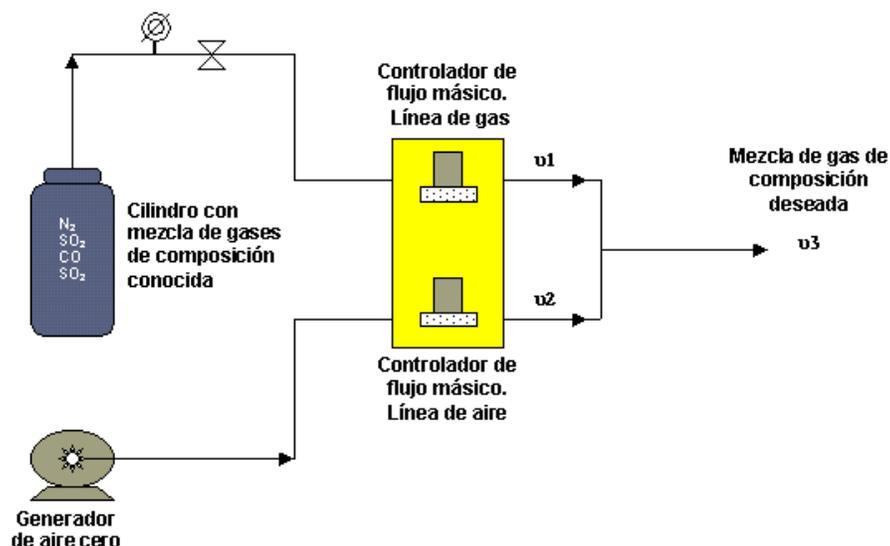


Figura 31. Principio de funcionamiento de un calibrador multigas

Los calibradores multigas realizan la mezcla usando dos controladores de flujo másico. Uno de estos específicamente destinado a controlar los flujos de aire cero para rangos entre 0 y 10 L/min, y el otro destinado a controlar los flujos de gases para rangos entre 0 y 100 mL/min.

Dichos flujos son establecidos digitalmente, por medio de comandos numéricos, con el teclado del calibrador.

Es importante anotar que solamente se puede realizar una dilución a la vez, esto quiere decir que se utiliza la entrada de aire y solamente una de las entradas de gases por cada dilución deseada.

A continuación se presenta una metodología para verificar el correcto funcionamiento de los calibradores multigas utilizados en redes automáticas de calidad del aire.

METODOLOGÍA PARA VERIFICAR EL FUNCIONAMIENTO DE LOS CALIBRADORES MULTIGAS

La verificación de la correcta operación de un calibrador multigas consiste en comparar los flujos volumétricos reportados en cada canal del calibrador contra un patrón de medición de flujo volumétrico de referencia.

El patrón de medida

En este caso se usa un burbujeador (soap bubbler flow-meter) como patrón de medición. Este dispositivo es recomendado por la EPA como uno de los patrones de medición de flujo volumétrico. La Figura 32 muestra un burbujeador.

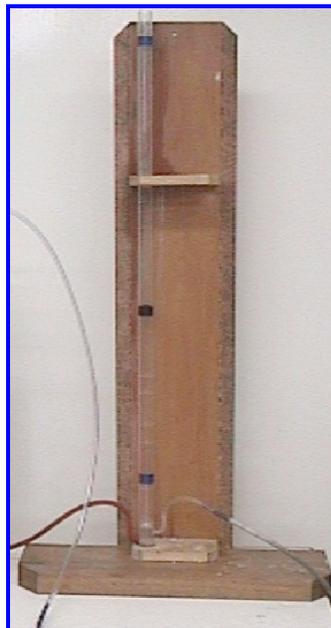


Figura 32. Burbujeador (soap bubbler flow-meter) usado como patrón de medición de flujo volumétrico

El burbujeador consiste en un tubo en vidrio de diámetro constante con varias marcaciones a distancias determinadas y dos entradas de aire en la parte inferior del mismo.

Este tubo contiene una pequeña cantidad de una solución jabonosa. En una de las entradas se conecta la fuente del flujo volumétrico a ser medido. La otra entrada permite producir burbujas soplando la solución jabonosa. Una vez producida una burbuja la fuente de gas la arrastra a lo largo del tubo. Midiendo la distancia (L) que recorre la burbuja en un tiempo dado (t) y el diámetro del tubo (D_i) se encuentra el flujo volumétrico que está produciendo la fuente de gas, mediante la ecuación siguiente:

$$Q = \frac{L}{t} \pi \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \quad (1)$$

Una vez encontrado este flujo volumétrico, es necesario expresar este flujo a condiciones estándar ($Q_{st.}$) corrigiendo el valor por la presión local (P_i) y la temperatura local (T_i), de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$Q_{st} = Q \left(\frac{P_i}{T_i} \right) \left(\frac{T_{st}}{P_{st}} \right) \quad (2)$$

P_{st} : Presión estándar
 T_{st} : Temperatura estándar

Actividades previas

Antes de dar inicio al proceso de verificación de los calibradores multigas existe una serie de

actividades que se deben realizar con el fin de asegurar el buen funcionamiento de los equipos y de la metodología utilizada.

- **Herramientas utilizadas**

Para poder empezar con la verificación de los calibradores multigas, es necesario contar con las siguientes herramientas:

- Llave de expansión
- Destornillador de pala
- Cronómetro
- Termómetro
- Acople para pasar del sistema milimétrico a NPT
- Jabón en polvo
- Burbujeador
- Frasco lavador
- Compresor
- 2 mangueras de polietileno LDPE
- Cinta métrica

- **Purga del compresor de aire**

Como medida de seguridad, antes de realizar el montaje, es necesario purgar el compresor de aire abriéndole el desagüe que posee en uno de sus costados. Esto, con el fin de asegurar que el aire que va a ser introducido en los Controladores de Flujo Másico no contiene agua que pueda afectar los sensores y el funcionamiento de esta parte del equipo.

El montaje

Para realizar la verificación del funcionamiento del calibrador multigas se debe conectar el burbujeador al puerto de salida del calibrador y una fuente de aire cero a la línea de aire del calibrador o una fuente de N_2 (cilindro de N_2) a la línea de gases del calibrador. La Figura 33 ilustra las conexiones a realizar.

Una vez terminadas todas las conexiones, es necesario verificar que no existan fugas de aire o de gas, esto se efectúa colocando un poco de solución jabonosa en las uniones y empalmes que tenga el montaje y abriendo las líneas de aire para poder observar que no se formen burbujas.

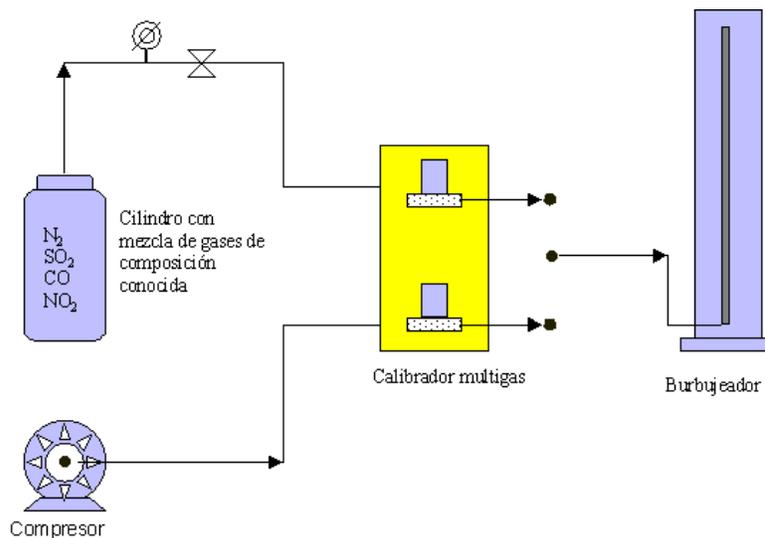


Figura 33. Ilustración del montaje para verificar la operación del calibrador multigas

El proceso de verificación

- Se fija un flujo volumétrico en el calibrador multigas.
- Se determina el flujo volumétrico en el patrón de medición. Cuando el patrón de medición para dicho flujo es un burbujeador, es necesario tomar en repetidas ocasiones (por lo menos 3) el tiempo en que la burbuja de jabón se desplaza una distancia conocida. Dichos datos deben ser reportados y anotados para procesarlos posteriormente. También se debe registrar la temperatura ambiente.
- Se repite el proceso para diferentes flujos volumétricos del calibrador multigas. Mínimo 5 flujos diferentes cubriendo todo el rango de funcionamiento del calibrador multigas. Se recomienda trabajar con el 20, 40, 60, 80 y 100% del flujo máximo permitido por los Controladores de Flujo Másico del calibrador multigas.

Conclusiones y recomendaciones

- Una vez obtenidos los diferentes valores de tiempo del desplazamiento de la burbuja de jabón se pueden obtener valores para flujo real con base en las ecuaciones (1) y (2) mostradas anteriormente.
- Posteriormente, se grafican los puntos obtenidos de flujo real vs flujo leído en el calibrador multigas.
- Mediante el método de mínimos cuadrados se obtiene la ecuación de la línea recta que mejor representa los puntos obtenidos y el coeficiente de correlación R^2 .

Una pendiente de la recta cercana a 1 indica que el calibrador está funcionando apropiadamente. La constante de la recta indica el offset del calibrador. Un coeficiente de correlación alejado de 1 indica que el funcionamiento del calibrador es inestable o que el proceso de toma de datos no fue realizado en forma apropiada. La Figura 34 muestra un ejemplo de una gráfica obtenida durante un proceso de calibración de controladores de flujo másico.

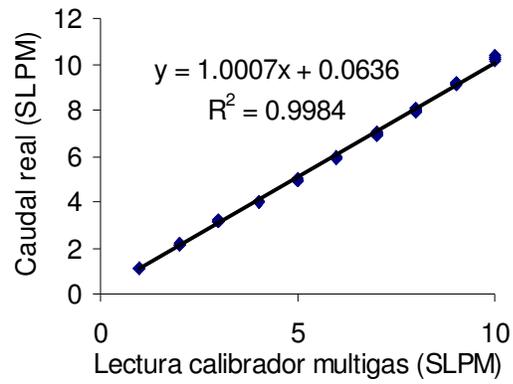


Figura 34. Verificación del correcto funcionamiento de un calibrador multigas

La verificación del correcto funcionamiento de los calibradores multigas es una actividad previa fundamental para poder realizar la calibración de los analizadores de calidad de aire. Esto con el fin de asegurar el correcto funcionamiento del equipo que servirá posteriormente como el patrón de verificación de los analizadores de gases.

6. SISTEMAS HÍBRIDOS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE

Los sistemas híbridos de vigilancia de la calidad del aire se caracterizan por combinar las ventajas de los sistemas manuales y los automáticos. Con la combinación de tecnologías se pueden optimizar costos y ampliar la cobertura del sistema aprovechando la resolución y oportunidad de los métodos automáticos y los menores costos de los métodos manuales. Estos sistemas tienen una desventaja, dado que el grado de entrenamiento de los operarios debe ser mayor, así como la cantidad del personal requerido, aspecto que puede minimizarse con los equipos semiautomáticos.

La Figura 35 muestra las etapas generales de operación de un SVCA híbrido. Tal como se observa, está compuesto por cinco etapas que combinan las de los otros SVCA ya vistos.

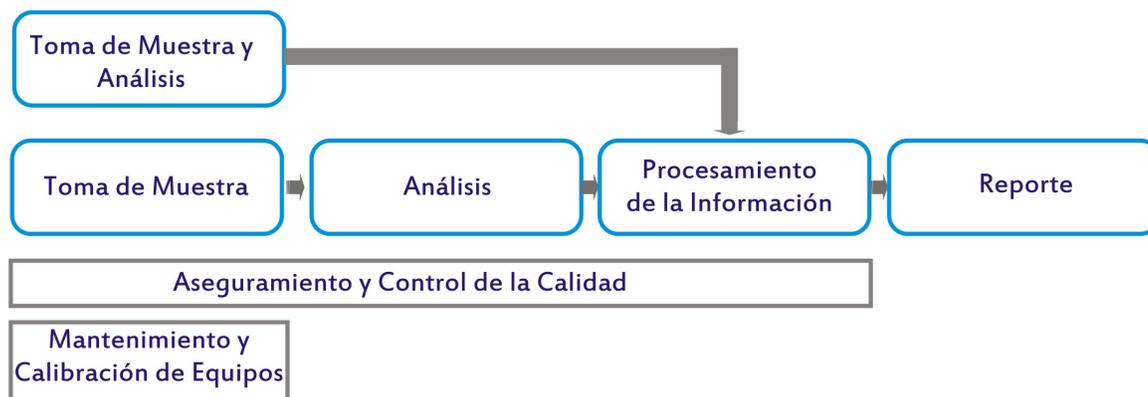


Figura 35. Proceso general de operación de un SVCA Híbrido

7. ELEMENTOS COMUNES EN TODOS LOS SVCA

7.1. PROGRAMA DE CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD¹⁶

Todo Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire deberá implementar un programa de control y aseguramiento de la calidad que deberá involucrar los elementos descritos a continuación.

Un programa de aseguramiento de calidad (AC) se define como un conjunto de actividades organizadas por etapas, diseñadas para alcanzar unos objetivos de calidad de datos y certificar que tales datos tengan una calidad conocida.

El control de calidad (CC) es el sistema general de las actividades técnicas que miden los atributos y desempeños de un proceso, artículo, o servicio respecto a estándares definidos, con el objeto de verificar que estos se encuentren dentro de los requisitos establecidos por el usuario. Se desarrolla para asegurar que la incertidumbre de las mediciones se mantenga dentro de criterios de aceptación establecidos por los objetivos de calidad de datos¹⁷.

En síntesis el control de calidad se considera como el uso cotidiano de procedimientos diseñados para obtener y mantener niveles específicos de calidad en un sistema de medición. El aseguramiento de la calidad es un grupo de acciones coordinadas, como planes, especificaciones y políticas usadas para asegurar que el programa de mediciones sea cuantificable y tenga una calidad conocida.¹⁸

Un programa de control y aseguramiento de la calidad para una SVCA, solo puede existir y cumplir su propósito dentro del desarrollo de un programa de vigilancia y control de la calidad del aire. Ninguna actividad de vigilancia puede ser justificada si no existe un programa de control y aseguramiento de la calidad que la respalde.

En la Tabla 8 se resumen los aspectos principales que debe contemplar un programa de control y aseguramiento de la calidad. Los objetivos de calidad de los datos definen los requerimientos que deben cumplir las mediciones, de manera que estas puedan ser usadas para resolver las preguntas formuladas en los objetivos de vigilancia, debiendo cumplir con ciertas características tales como: exactitud, precisión, integridad, representatividad y compatibilidad.

¹⁶ Tomado traducido y complementado de AIR QUALITY HANDBOOK FOR AIR QUALITY MEASUREMENTS SYSTEMS

¹⁷ Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems Volume II: Part 1 Ambient Air Quality Monitoring Program Quality System Development

¹⁸ "Quality assurance/Quality control program for wet deposition monitoring in East Asia". March 2000. The second interim scientific Adviser group meeting of Acid Deposition monitoring network in East Asia

Tabla 8. Desarrollo de un Programa de Control y Aseguramiento de la Calidad

DEFINICIÓN DE LOS OBJETIVOS DE VIGILANCIA	OBJETIVOS DE CALIDAD DE DATOS (Exactitud, precisión, integridad, representación, compatibilidad)
Aseguramiento de Calidad	Diseño del SVCA. Selección del Sitio. Selección del equipo. Diseño del Sistema de Medición.
Control de Calidad	Desarrollo de programas de entrenamiento. Elaborar protocolos (procedimientos y estándares de operación, archivos) para la operación y mantenimiento del equipo. Elaborar protocolos de calibración y certificación del equipo. Preparar programas para las visitas de los sitios de medición. Elaborar protocolos para la identificación, transporte y análisis de muestras.
Estimación de la Calidad	Elaborar protocolos para el acopio, la inspección, revisión y validación de los datos. Programas para reportes y auditorías.

Los objetivos de vigilancia y de calidad de los datos necesitan ser definidos claramente para optimizar el diseño del SVCA, seleccionar los contaminantes apropiados y sus métodos de medición (de acuerdo con las condiciones ambientales de la región) y determinar el nivel requerido de control de calidad y manejo de datos.

Las principales fases de la estrategia de vigilancia, con un programa de control y aseguramiento de calidad, se agrupan en:

- Diseño del SVCA.
- Selección del sitio.
- Evaluación y selección del equipo.
- Diseño del sistema de medición.
- Infraestructura del sitio.
- Operaciones de rutina.
- Mantenimiento y calibración del equipo.
- Acopio, revisión y validación de los datos.

7.1.1. OBJETIVOS DEL PROGRAMA DE CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD

Un programa de control y aseguramiento de calidad debe garantizar que los datos obtenidos del sistema de medición sean representativos de las concentraciones ambientales existentes en cualquiera de las áreas bajo investigación. Esto implica que:

- La variación en los resultados medidos por diferentes instrumentos se mantenga dentro de un intervalo permitido.
- Se minimicen las variaciones entre laboratorios.
- Las variables sean medidas con la misma exactitud y precisión a través de todo el SVCA.
- Las mediciones deberán tener la suficiente precisión y calidad para cumplir con los objetivos de vigilancia establecidos.
- Los datos deberán ser comparables y reproducibles. Los resultados dentro de un mismo SVCA deberán ser consistentes y comparables con estándares internacionales.

- Los resultados deberán ser consistentes en el tiempo y seguir patrones rastreables por medio de estándares metrológicos sobre todo si se realizan análisis a largo plazo.
- Generalmente se requiere que el intervalo anual de captura de datos sea de por lo menos entre 75 - 80% y que la pérdida de datos esté distribuida, en lo posible, a lo largo de todo el año calendario.

El éxito de un buen programa de vigilancia dependerá en gran medida de la adecuada aplicación de un programa de control y aseguramiento de la calidad.

7.1.2. SECUENCIA METODOLÓGICA DE IMPLEMENTACIÓN

Los programas de aseguramiento de la calidad para la vigilancia de calidad del aire son procesos continuos, que pueden y deben estar en constante cambio y adaptación a nuevas circunstancias, a nuevas necesidades o a cambios en la disponibilidad de recursos.

Para garantizar la capacidad, competencia y credibilidad de toda la gestión alrededor del programa de vigilancia; a continuación se describen los aspectos más importantes para implantar un programa de aseguramiento de la calidad y su secuencia metodológica. Aspectos adicionales relacionados con un sistema de calidad, se pueden consultar en la norma ISO 9000 o similares.

Es recomendable establecer el programa de aseguramiento de la calidad desde el inicio de la operación del SVCA y una vez definidos los objetivos de vigilancia del sistema. No obstante, puede seguirse la metodología que describe éste capítulo para implementar el programa de AC en un SVCA que ya esté en operación.

En la Figura 36 se representan las etapas de planeación, implementación, evaluación y generación de reportes, que componen los programas de aseguramiento de la calidad para vigilancia de la calidad del aire. Estas etapas y los elementos que las constituyen, se describirán brevemente a continuación.

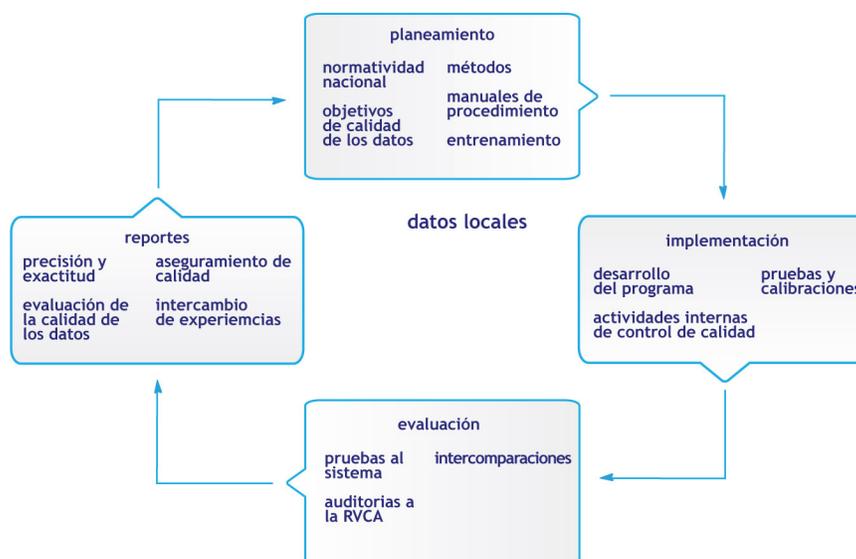


Figura 36. Ciclo de los programas de AC para vigilancia de calidad del aire

7.1.3. PLANEACIÓN DEL PROGRAMA DE CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Lo primero que se debe hacer para implementar un programa de control y aseguramiento de la calidad de un SVCA es planear a donde se quiere llegar, y como se puede llegar. Las actividades de planeación incluyen:

- Inserción del programa dentro de la normatividad nacional. El programa inicia por revisar la normatividad existente para adaptarse a sus exigencias.
- Establecimiento de los objetivos de calidad de los datos. Una vez revisado el marco normativo, el programa de aseguramiento de la calidad debe definir los objetivos de calidad de los datos, que son las metas cualitativas y cuantitativas que clarifican el fin del programa de vigilancia, definen el tipo apropiado de datos que deben recolectarse y determinan las condiciones más adecuadas para la recolección de los datos.
- Selección de los métodos de medición. Después de tener claridad sobre los objetivos a cumplir, se deben seleccionar los métodos de medición que permitan alcanzarlos y que estén de acuerdo con la normatividad vigente.
- Elaboración del plan de calidad. El propósito principal de este plan es sintetizar el programa, partiendo de los objetivos y métodos que ya se han definido, puntualizando las actividades de AC y CC que deberán ser desarrolladas para su implementación. Se sugiere elaborar un solo documento. El plan deberá proporcionar una descripción clara de todos los aspectos del programa de AC y deberá incluir información sobre todos los componentes del programa de vigilancia. Además, el plan se deberá elaborar para facilitar la comunicación entre los usuarios de los datos, el grupo de trabajo del SVCA, la dirección del programa y los auditores externos. Proporcionará también los instrumentos a la parte administrativa para mantener el programa de vigilancia dentro del cronograma y según el presupuesto aprobado.
- Elaboración de los manuales de procedimientos. Se deben elaborar los manuales de procedimiento para todas las actividades relativas al programa de vigilancia, con base en los métodos de referencia.
- Elaboración de un programa de entrenamiento. Al finalizar todas las actividades anteriores, se debe organizar un programa de entrenamiento para capacitar a las personas que conforman el grupo de trabajo del SVCA. Dicho entrenamiento debe cubrir en especial, qué deben hacer, por qué deben hacerlo, cómo deben hacerlo, cuando deben hacerlo y qué resultados deben obtener de cada actividad.

7.1.4. IMPLEMENTACIÓN

Las actividades de implementación incluyen:

- Ejecución del programa de aseguramiento de la calidad (AC). Después de contar con el programa de aseguramiento de la calidad, este debe ponerse en práctica.
- Actividades internas de control de calidad (CC). Comprende el conjunto de actividades y técnicas que miden los atributos y desempeño de un proceso, un equipo, o un servicio y los comparan con los criterios de aceptación establecidos, para que el programa de vigilancia pueda afirmar, con bases científicas, que la incertidumbre de la medición obtenida cumple con lo dispuesto en los objetivos de calidad de los datos. Para este caso se deben realizar pruebas cualitativas y cuantitativas establecidas por entidades de reconocida idoneidad y experiencia científica para asegurar que los datos obtenidos cumplirán los objetivos de calidad. Cada una de estas pruebas evalúa partes de la incertidumbre total de la medición efectuada.

A continuación se presentan las pruebas más importantes:

- Pruebas de precisión y exactitud. Estas pruebas pueden usarse para obtener una evaluación general de la incertidumbre en las mediciones.
- Pruebas de Cero y Span. Están diseñadas para determinar si se está operando adecuadamente el sistema de medición.
- Pruebas de calibración. Se realizan en el sitio de vigilancia haciendo que el sistema analice muestras de gases con una concentración conocida de los contaminantes.
- Intercomparaciones internas. Estas pruebas consisten en la confrontación de los resultados arrojados por equipos de vigilancia comparables, pueden realizarse en el sitio de medición o en un ambiente controlado como un laboratorio.

7.1.5. EVALUACIONES

En un programa de vigilancia de la calidad del aire, las evaluaciones permiten medir el desempeño o la efectividad del programa y sus elementos. Involucran también auditorías, evaluación de desempeño, e intercomparaciones externas.

- Auditorías a los SVCA de las autoridades ambientales. Estas auditorías, generalmente externas buscan determinar si el SVCA está cumpliendo con sus objetivos de vigilancia o en caso de ser necesario, las modificaciones requeridas para cumplir con ellos. Lo más recomendable es que sean realizadas por otras autoridades ambientales o el IDEAM.
- Evaluaciones de desempeño. Este es un tipo de evaluación en el cual los datos cuantitativos generados en un sistema de vigilancia, son obtenidos de manera independiente y comparados con datos generados rutinariamente para determinar la capacidad profesional de un analista, o el desempeño de un laboratorio o de un sistema de vigilancia. Pueden hacerse bajo la colaboración de las autoridades ambientales o apoyadas por instituciones técnicas y científicas como el IDEAM.

7.1.6. REPORTE

Todos los datos de concentración requerirán evaluaciones para determinar si cumplen con los objetivos de calidad, y por lo tanto deberán generarse reportes de estas evaluaciones. Estos reportes deberán incluir:

- Evaluación de la calidad de los datos. Es la evaluación científica y estadística de los datos obtenidos por las actividades de aseguramiento y control para determinar si los datos de vigilancia son correctos y adecuados en cuanto a calidad y cantidad; así como las condiciones particulares del entorno (precipitación, temperatura, presión, intensidad de actividades productivas y su tipo de fuente, entre otras). Los datos del programa de control y aseguramiento de calidad pueden valorarse a varios niveles de agregación para determinar si los objetivos de calidad de datos se han cumplido. Por ejemplo, los datos de aseguramiento de calidad de las pruebas de precisión, exactitud y parcialidad pueden ser agregados por cada equipo monitor ó para todos los monitores de un SVCA que empleen ese mismo método.
- Reportes de precisión y exactitud. Estos reportes deben generarse anualmente y evalúan la precisión y la exactitud de los datos contra los requerimientos establecidos.
- Reportes de aseguramiento de calidad. Un reporte de AC debe proporcionar una evaluación de los datos de aseguramiento y control por un periodo determinado de tiempo, para establecer

si los objetivos de calidad de datos se han alcanzado en ese período.

- Intercambio de experiencias. Las experiencias obtenidas durante la implementación del programa de control y aseguramiento de la calidad podrán compartirse con otras autoridades ambientales, con el sector académico y otras entidades privadas, con el objeto de obtener una retroalimentación valiosa para el mejoramiento del SVCA. Es importante que la información derivada de estos intercambios, sea debidamente documentada y se refleje en los informes anuales de aseguramiento de calidad del aire.

Después de llevar a cabo la etapa de generación de reportes, puede enfrentarse con bases nuevas, la planeación de las acciones correctivas que permitan obtener mejores resultados continuando así el ciclo del programa de aseguramiento de calidad.

7.1.7. CARACTERÍSTICAS ORGANIZATIVAS DE UN PROGRAMA DE CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Los objetivos de vigilancia, las limitaciones económicas y la disponibilidad de personal capacitado, son factores determinantes en el alcance y complejidad del programa de AC y CC, y a la vez la sostenibilidad del mismo.

Los principios generales de la práctica del aseguramiento y control de la calidad son aplicables a todo tipo de metodología de vigilancia, sin embargo, los detalles del programa y del personal requerido dependerán en gran medida de la técnica de vigilancia implementada. Si se usan muestreadores semiautomáticos, el programa de AC deberá hacer énfasis en 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 cualquier circunstancia, es sumamente importante que todo el personal sea consciente de que el programa de AC y CC, es un componente integral y vital de cualquier programa de vigilancia 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. 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, además de proporcionar una adecuada capacitación en procedimientos de CC.

7.1.8. OBJETIVOS DE CALIDAD DE DATOS

Los datos recolectados por un SVCA deben responder a las necesidades de los usuarios de la información, es decir a los objetivos de vigilancia trazados para el SVCA, y servirán en la mayoría de los casos sólo para dar respuesta a las preguntas contempladas cuando se trazaron estos objetivos.

Si el SVCA está bien diseñado, bien operado y tiene un programa efectivo de control y aseguramiento de calidad, estas preguntas se podrán responder, con un grado de incertidumbre conocido.

Los objetivos de calidad de los datos trazados con base en los objetivos de vigilancia del SVCA,

determinan como deben recolectarse los datos, los criterios para tomar decisiones y la incertidumbre aceptable para esas decisiones.

Esta incertidumbre es la suma de todas las fuentes de error asociadas a todo el proceso de obtención y procesamiento de los datos. Puede representarse por la siguiente ecuación:

$$U_o^2 = U_r^2 + U_p^2 + U_c^2$$

Donde:

U_o = Incertidumbre total

U_r = Incertidumbre de la representatividad espacial y temporal

U_p = Incertidumbre de la precisión

U_c = Incertidumbre de la exactitud

Incertidumbre de la representatividad espacial y temporal. La representatividad es el atributo de calidad de datos más importante de un SVCA. El término se refiere al grado en el cual los datos representan de una manera precisa y exacta, una característica de una población, la variación de un parámetro en un punto de muestreo, la condición de un proceso o una condición ambiental. No importa que tan preciso y exacto pueda ser un dato si no representa lo que debería representar. La incertidumbre de la representatividad se puede controlar así:

- Diseñando un SVCA con un tamaño adecuado, con sitios representativos consistentes con los objetivos de vigilancia.
- Determinando y documentando las restricciones que impone la meteorología, la topografía, las fuentes de emisión cercanas, en los sitios de vigilancia.
- Estableciendo periodos de muestreo adecuados para los objetivos de vigilancia.

Incertidumbre de la calibración e incertidumbre de la precisión. Estas incertidumbres están asociadas a todas las etapas de obtención y procesamiento de los datos. En cada una pueden ocurrir errores, que se dispersan en la siguiente. La finalidad del programa de AC es mantener la incertidumbre en un nivel aceptable, mediante la aplicación de varias técnicas. Si se dispone de los recursos suficientes, se puede evaluar la incertidumbre en cada etapa de la medición, de lo contrario puede calcularse, evaluarse o estimarse la incertidumbre general de la medición.

Los tres indicadores más importantes de la calidad de los datos que permiten el cálculo de la incertidumbre general de la medición son:

- La precisión, que se define como grado de concordancia entre las mediciones individuales de una misma propiedad bajo condiciones similares expresadas generalmente en términos de la desviación estándar. Representa el componente aleatorio del error.
- La parcialidad, definida como la desviación sistemática o persistente en un proceso de medición que causa errores en una misma dirección. Puede ser determinada estimando la desviación positiva y negativa del valor real calculada como un porcentaje del mismo.
- El límite de detección, que es el valor inferior del intervalo de variación de una característica (como la concentración) que un procedimiento que utiliza un método de medición específico puede discernir.

El término exactitud ha sido empleado en este documento y en general, para representar la medida de la cercanía al “valor real” de una medición pero cuando se habla de incertidumbre, esta medida puede representarse mejor como una combinación de las componentes del error asociadas a la precisión y la parcialidad.

7.1.9. ESTABLECIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD DE DATOS

Teniendo claro el concepto de incertidumbre puede enfrentarse el proceso de establecimiento de los objetivos de calidad de datos. Este proceso debe permitir¹⁹:

- Establecer un lenguaje común entre los usuarios de la información y el personal técnico del SVCA.
- Seleccionar objetivos de calidad de datos que permitan responder adecuadamente las preguntas planteadas por los objetivos de vigilancia.
- Proveer una estructura lógica dentro de la cual el proceso iterativo del programa de aseguramiento de calidad (planeamiento, implementación, evaluación, reporte), puede ser logrado eficientemente.
- Orientar y reforzar el desarrollo del diseño del SVCA, al definir los requerimientos espacio temporales para la implantación del SVCA.²⁰

El desarrollo de los objetivos de calidad de datos puede ser complejo y su resultado es definitivamente único, porque obedece a objetivos de vigilancia particulares para cada sistema de vigilancia de calidad de aire (SVCA).

Lo más recomendable es tomar el objetivo de vigilancia más exigente, en términos de calidad de datos, y establecer los objetivos de calidad de datos necesarios para cumplirlo. Por lo general los demás objetivos de vigilancia, que son menos exigentes, podrán cumplirse sin objetivos de calidad de datos adicionales. Si esta labor es exitosa se logrará minimizar la incertidumbre espacial y temporal asociada a los datos, que responde en esencia al diseño del SVCA. Resta minimizar la incertidumbre de las mediciones, que corresponde a la operación del SVCA. Ésta tarea se logra evaluando y controlando los datos, en las fases de toma de muestra, procesamiento y análisis, contra los criterios de aceptación impuestos por los objetivos de calidad de datos, para cada una, en términos de los siguientes atributos:

- Precisión.
- Parcialidad.
- Representatividad temporal y espacial.
- Limite de detección.
- Integridad temporal. Se define como la relación entre la cantidad de datos válidos obtenidos por un sistema de muestreo comparado y la cantidad ideal que debería obtenerse en condiciones normales de operación.
- Comparabilidad. Es decir el grado de confiabilidad con que un conjunto de datos puede ser comparado con otro.

¹⁹ US- EPA. Guidance for the Data Quality Objectives Process EPA QA/G4. 1996

²⁰ La US-EPA ha desarrollado software para orientar el proceso de creación de los objetivos de calidad de datos, con miras a diseñar o reformar el diseño de un SVCA, este software denominado "Data Quality Objectives (DQO) Decision Error Feasibility Trials (DEFT)" puede descargarse de www.epa.gov/ttn/amtic/.

7.1.10. ELEMENTOS DE ASEGURAMIENTO DE CALIDAD²¹

7.1.10.1. Documento Control

Lo más recomendable es que todo el personal que labora en un SVCA cuente con procedimientos detallados para la realización de sus tareas. Sin embargo, para poner en marcha un programa de AC, se deben elaborar al menos los procedimientos detallados para la operación rutinaria del SVCA, los procedimientos de mantenimiento preventivo y correctivo, los procedimientos de manejo, validación, análisis de datos y generación de reportes, entre otros.

Se pueden identificar de una manera amplia los siguientes procedimientos para implementar un programa de aseguramiento de la calidad:

1. Procedimientos de toma de muestra
2. Procedimientos de calibración
3. Procedimientos analíticos
4. Procedimientos de análisis de datos, validación y reporte
5. Procedimientos desempeño y auditoria del sistema
6. Mantenimiento preventivo
7. Plan de calidad
8. Proyectos de aseguramiento de la calidad

Todos estos documentos deben estar escritos en un documento de control, en manos del coordinador de aseguramiento de la calidad.

7.1.10.2. Objetivos y políticas de aseguramiento de la calidad

Cada organización se debe escribir y dar a conocer a su personal sus políticas de aseguramiento de la calidad.

En calidad del aire los objetivos generales del aseguramiento de la calidad son producir datos que reúnan los requerimientos de sus usuarios en términos de integridad, precisión, exactitud, representatividad e intercomparabilidad, reduciendo los costos de la calidad.

Los objetivos de la calidad deben ser difundidos entre el personal de la organización relacionado con el proceso con el fin de sensibilizarlos en todo lo referente a la importancia de la calidad de los datos en términos de los parámetros expuestos anteriormente.

7.1.10.3. Organización

La organización del aseguramiento y la calidad plantea actividades como:

- La rigurosidad que corresponde a cada actividad de aseguramiento de calidad
- Preparación del programa de aseguramiento de calidad
- Identificación de los problemas del AC a ser resueltos
- Implementación el programa de AC
- Definir un organigrama con profesionales y responsabilidades, incluyendo el programa de AC
- Definir objetivos del AC (Precisión, exactitud e integridad) para cada sistema de medición
- Proveer una guía para el aseguramiento de la calidad del SVCA, procedimientos de laboratorio,

²¹ U.S. Environmental Protection Agency. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1. Ambient Air Quality Monitoring Program Quality System Development.

validación de datos, mantenimiento de equipos, calibración, etc.

7.1.10.4. Planeación de la calidad

La planeación de la calidad en mediciones de contaminación de aire es concebida para obtener una calidad de datos aceptables a unos costos razonables. La planeación en general es pensada para el mejoramiento de una serie de acciones para a su vez cumplir con un objetivo trazado y comunicarlo a las personas encargadas de ejecutar dichas acciones

En un sistema de medición se encuentran las siguientes actividades y elementos críticos:

- Toma de la muestra
- Análisis de la muestra
- Procesamiento de datos
- Equipo asociado
- Personal: operadores y analistas

La elaboración del programa de aseguramiento de calidad implica conocer y definir todo el proceso de medición. Se debe hallar respuesta a preguntas como:

- Cuáles actividades deben ser consideradas
- Cuáles de estas actividades son las más críticas
- Cuáles límites de aceptabilidad pueden ser asignadas a estas actividades
- Cada cuánto deben ser verificadas y chequeadas estas actividades
- Cuáles métodos de medida deben ser usados para chequear estas actividades
- Qué acciones deben tomarse si se superar los rangos de aceptabilidad

7.1.10.5. Entrenamiento

El entrenamiento continuo y planeado del personal que hace parte del SVCA, es una parte fundamental del programa de AC. El entrenamiento tiene como objeto incrementar la efectividad del personal y de su organización. El programa de AC requiere que se establezca una programación de entrenamiento que especifique, el perfil profesional, el entrenamiento y la frecuencia del mismo para cada cargo. Todo el personal involucrado en la operación y en el mismo programa de AC, debe tomar los cursos de entrenamiento programados, sin dejar de atender sus responsabilidades.

Se debe entrenar a todo el personal que participa en el proceso (toma de muestreos, análisis, reducción de datos y aseguramiento de la calidad). Todo el personal debe estar involucrado para garantizar los reportes con una gran calidad de los datos.

Cada funcionario debe estar enterado de los objetivos de la calidad y su responsabilidad en el proceso. Además conocer las bases teóricas de las actividades que realizan. Regularmente se deben hacer este tipo de capacitaciones, evaluando al tiempo la apropiación de los conocimientos.

Todo el personal administrativo, profesional y técnico que participa de las diferentes actividades que se dan con la vigilancia permanente de la calidad del aire, requieren ser capacitados y entrenados principalmente en el área de evaluación y control de la contaminación del aire.

Esta capacitación puede consistir en cursos, talleres o teleconferencias, ofrecidas por autoridades ambientales de orden internacional como la EPA, el CEPIS de la OPS, entre otras, o de orden

nacional como el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el IDEAM, Centros Ambientales de Universidades, instituciones académicas formales, complementados con actividades internas tales como exposiciones, lecturas o prácticas en campo.

Se recomienda que las actividades de capacitación y entrenamiento se enfoquen a los siguientes temas:

- Legislación aplicada al recurso aire.
- Métodos para la evaluación de la calidad del aire.
- Aseguramiento de la calidad de datos, de documentos, de equipos.
- Vigilancia de variables ambientales.
- Calibración de equipos de vigilancia manuales y automáticos.
- Prácticas de laboratorio para los métodos analíticos de calidad del aire.
- Meteorología aplicada a la contaminación del aire.
- Aplicación de cursos de auto instrucción sobre aire, meteorología.
- Administración y revisión de sistemas administrativos.
- Evaluación de impactos de la calidad de aire en la salud humana
- Estadística aplicada a manejo y presentación de datos ambientales.
- Inventario de emisores y emisiones de contaminantes del aire.
- Evaluación de emisiones atmosféricas en fuentes fijas y móviles.
- Sistemas generales para el control de la contaminación del aire.

7.1.10.6. Preparación del SVCA

Se refiere a los aspectos de diseño de un SVCA. La elección y prueba correcta de sitios de medición es fundamental para obtener datos representativos y de alta calidad. Los elementos de diseño más importantes son:

- Dominio del SVCA
- Localización de las estaciones de medición
- Examen del sitio
- Selección de los métodos y equipos de medición

7.1.10.7. Mantenimiento Preventivo

El beneficio más importante de un programa de mantenimiento preventivo eficaz es el incremento de la disponibilidad del sistema de medición en el tiempo, es decir, tiene que ver directamente con la integridad de los datos. Adicionalmente, una operación correcta de los equipos se ve traducida en una alta calidad de los datos que los equipos adquieran.

Este elemento del aseguramiento de la calidad se debe concretar en un programa continuo de mantenimiento preventivo, donde se definan los repuestos y consumibles que deben permanecer en inventario para no suspender la operación de los equipos ante un probable reemplazo de estos elementos.

7.1.10.8. Recolección de la muestra

El acopio de la información consiste en la captura, colección y manejo de los datos que generalmente lo lleva a cabo una persona distinta a la que realiza la validación, por lo que se necesitan fijar procedimientos y reportes que especifiquen QUIÉN está a cargo, de QUÉ parte del proyecto y CÓMO llevó a cabo su trabajo. Además deberá incluirse el DÓNDE, es decir, la

localización geográfica, el CUÁNDO, en el cual se reportarán no sólo las horas específicas, días, meses o años, sino también tópicos importantes como variaciones diurnas y estacionales, y el POR QUÉ, que consiste en establecer el propósito de la colección de los datos.

Los procesos de captura de información difieren dependiendo del tipo de tecnología que tenga cada estación. En las estaciones automáticas, este procedimiento es menos susceptible de presentar fallas, siempre y cuando se garantice la continua y adecuada comunicación entre la estación remota y la central de información, así como la seguridad de la misma. Para el caso de muestreadores manuales o semiautomáticos, donde la captura de datos es realizada a través de una persona y generalmente requiere de procedimientos de cálculo realizados por el operador del SVCA, laboratorista u otro cargo al que le sea asignada esta labor, existe siempre mayor posibilidad de errores que puedan invalidar un dato.

Se deben hacer chequeos durante la toma de la muestra para determinar el desempeño del equipo. Se deben realizar graficas de control para registrar las novedades durante la recolección de la muestra. El tratamiento de la muestra en la etapa posterior a la toma de la muestra es fundamental para garantizar la representatividad y calidad de esta.

Cuando un SVCA cuenta con estaciones automáticas para el monitoreo de los diferentes contaminantes criterio y la descarga de dicha información es realizada a través de comunicación telefónica, radial, satelital, cable u otro sistema de transmisión de datos, se debe garantizar y mantener el correcto funcionamiento del medio de comunicación empleado para evitar que en la transferencia y descarga de datos a la estación central de información, se pierdan registros o sean transferidos de forma errónea, haciendo que el dato quede inválido.

Toma de datos en SVCA automáticos

Si bien es cierto que con los analizadores automáticos se reduce la generación de datos erróneos y la cantidad de datos no captados, debido a que existe menor manipulación de la información, es incorrecto pensar que por tal motivo no es necesaria la existencia de procedimientos que aseguren la calidad en la transmisión de datos.

De manera interna cada analizador debe realizar procedimientos de traducción de datos a señales análogas (voltajes) y de éstas a señales digitales, las cuales son las que pueden ser visualizadas en el datalogger de cada equipo. Debido a esto, es imperativo que existan programas estrictos de revisión y calibración de los equipos, para garantizar que la señal que se visualiza en el monitor coincida con las salidas eléctricas recibidas y coincida con la información almacenada en la unidad de memoria del analizador, es decir, poder asegurar que el sistema de comunicación no introduce perturbaciones. Finalmente, debe verificarse la consistencia de datos entre el datalogger y el sistema central de información.

Se recomienda verificar la consistencia global de toda la cadena de transferencia de datos, registrando en el sistema central los datos generados durante las calibraciones multipunto. Por otro lado, se debe verificar que la distribución de información desde el sistema central de datos a los usuarios finales se realice manteniendo la consistencia de la información generada. Para esto se recomienda comparar periódicamente grupos de datos, escogidos arbitrariamente y obtenidos de cada una de las bases de datos para periodos iguales, verificando que su contenido permanezca sin alteración atribuida a los sistemas de envío y recepción de información.

Es posible que existan estaciones donde a pesar de contar con analizadores automáticos, la transmisión de los datos hacia la central de información no puede ser realizada directamente, sino que es almacenada en un procesador, también conocido como CPU (Central Processing Unit) y de

ahí descargados en algún medio magnético de almacenamiento de información (USB, CD ó MMC-SD) y trasladado al centro de control. En estos casos, donde la transferencia de datos no es realizada directamente sino a través de medios externos al equipo, se hace necesario que el SVCA considere adicionalmente al programa de mantenimiento del equipo, una cadena de custodia, que garantice que los datos no van a sufrir cambios, ni deterioro en su calidad.

Transferencia de información en SVCA manuales

El acopio de información en SVCA que cuentan con equipos manuales es bien diferente al proceso en los SVCA automáticos, ya que la generación de datos de concentración de cualquiera de los contaminantes para los cuales es posible emplear estos métodos comienza desde el momento en que las muestras llegan al laboratorio y son procesadas. Por lo anterior, es indispensable que existan procedimientos detallados relacionados con la cadena de custodia de las muestras, con los respectivos registros de control de manipulación de las mismas; de esta forma se puede garantizar la calidad de los datos, en esta etapa de la medición.

Una vez las muestras son procesadas en el laboratorio a través de los diferentes métodos de análisis y determinación de la concentración de los contaminantes (gravimetría, colorimetría, entre otros), debe hacerse llegar esta información a la central de información, donde comenzará el respectivo proceso de validación de la información obtenida.

7.1.10.9. Análisis de la muestra

Los chequeos de control por parte del analista deben conducir a:

- Determinar el desempeño del sistema analítico.
- Estimar la variabilidad de los resultados desde el sistema analítico en términos de precisión.

Se deben llevar graficas de control para determinar cuando el sistema o procedimientos analíticos no funcionan adecuadamente y se deban tomar medidas correctivas.

7.1.10.10. Reporte de errores en los datos

Los errores humanos son la fuente más común de errores en los reportes de datos. Los procedimientos de validación de datos pueden ser usados para revisar los niveles operacionales y de análisis. Las graficas de control son una herramienta común usada para la revisión de características críticas en sistemas de medición.

7.1.10.11. Control de calidad

Se refiere principalmente a la calidad de los equipos de medición. Se sugiere intercambiar experiencias con otros usuarios de equipos para evaluar calidad, soporte y otras ventajas de los equipos seleccionados. Se deben realizar controles de los estándares de calibración, químicos y consumibles necesarios.

A pesar de que los sistemas automáticos que usan comunicaciones telemétricas proporcionan un método de recopilación de datos efectivo y eficiente para SVCA geográficamente muy extendidos y con gran número de analizadores automáticos, se requerirán también visitas regulares de apoyo para la validación de los datos, las cuales se llevarán a cabo tan frecuentemente como la operación lo necesite y lo permitan las restricciones geográficas o de disponibilidad de personal.

Las visitas regulares buscan asegurar la operación adecuada de los instrumentos y maximizar la captura de datos y la integridad de los mismos. Se recomienda que tengan una frecuencia semanal

como mínimo. Dentro de estas visitas regulares semanales deben realizarse visitas especiales una vez por mes y una vez por año donde se efectúan las pruebas más rigurosas y los procedimientos más complejos.

Algunas de las funciones que se llevan a cabo durante las visitas a los sitios de medición incluyen:

1. Preparación de instrumentos y elementos consumibles necesarios en la visita.
2. Registro del ingreso del personal a la estación en el libro de control.
3. Inspección visual del sitio, verificación del correcto funcionamiento de los equipos y sensores meteorológicos, limpieza a los toma-muestras y verificación de cambios en el entorno del sitio de vigilancia que afecten los criterios de ubicación.
4. Revisión de alarmas y eventos registrados por el sistema de adquisición de datos y analizadores o muestreadores. Registro de los cambios inusuales.
5. Inspección y limpieza de manifolds y líneas de conducción de gases. Chequeo de fugas y reparación de las fallas presentadas.
6. Reposición de consumibles como filtros de partículas para los analizadores de gases, medios de absorción de contaminantes para los sensores electroquímicos, entre otros, con la frecuencia recomendada por el fabricante.
7. Cambio de lavadores, filtros, desecadores y otros elementos de purificación del sistema de aire cero para calibración, según las recomendaciones del fabricante.
8. Chequeos y pruebas diagnósticas sugeridas por los fabricantes.
9. En el caso de equipos automáticos, verificación de span y cero en cada instrumento²² de acuerdo con los manuales del fabricante.
10. Calibración multipunto con la frecuencia recomendada por el fabricante o cuando los valores de span o cero salgan del intervalo establecido por los objetivos de calidad de datos.
11. Calibración a los equipos meteorológicos de acuerdo con lo establecido por el fabricante.
12. Mantenimiento preventivo de los equipos de acuerdo con el manual del fabricante, a fin de anticipar la existencia de problemas.
13. En caso de presentarse fallas de operación, mantenimiento correctivo de los equipos de acuerdo con lo establecido por el fabricante en el manual de operación del equipo.
14. Verificación de las características actuales del entorno en cuanto a emisiones por fuentes fijas o móviles u otras actividades nuevas del entorno.

El desarrollo de las actividades descritas en los numerales 2 a 13, deben ser registradas en el libro de control de la estación.

El programa de AC debe establecer procedimientos separados para cada tipo de visita regular, seleccionando las tareas de acuerdo a su complejidad, su rigurosidad y a la frecuencia con que deben realizarse, es decir las tareas de las visitas regulares anuales serán las más exhaustivas y complejas, las mensuales lo serán menos y las semanales serán las más sencillas. Así mismo, deben elaborarse los formatos correspondientes para la documentación de las visitas (listas de chequeo) y la recopilación de los datos de AC (Desviación de cero y span, ganancias, calibraciones, entre otros).

Las actividades rutinarias de aseguramiento y control de la calidad que deben efectuarse en cada estación componente del SVCA, pueden resumirse como se muestra en la Tabla 9.

²² No deben realizarse ajustes de span y cero durante estas pruebas, que son únicamente de verificación dado que alteran inadecuadamente las ganancias de los equipos. Los ajustes se deben realizar solo durante las calibraciones multipunto.

Tabla 9. Actividades rutinarias de AC para cada estación de vigilancia

ACTIVIDAD	FRECUENCIA MÍNIMA
Visita regular	Semanal
Calibración	Mensual
Verificación del desempeño	Anual
Auditoría interna	Anual
Auditoría externa	Bianual

7.1.10.12. Verificación y Calibración

Es el procedimiento más importante en la medición. La verificación es un proceso que establece las relaciones entre los resultados que el sistema reporta durante la medición y un patrón conocido. La calibración es la corrección que se hace al sistema de medición para minimizar el error en comparación con el patrón conocido. Un plan de verificación y calibración debe ser implementado para todos los equipos involucrados en el sistema de medición. Se deben implementar cartas de registro de las calibraciones.

La adecuada calibración del equipo de vigilancia es esencial para obtener datos precisos y reproducibles de calidad del aire y su importancia dentro del SVCA debe ser suficientemente enfatizada. Solo a través de la calibración de los diferentes equipos de vigilancia (incluso el datalogger), así como de las pruebas desviación del span y cero, realizadas dentro de un estricto cronograma y observando rigurosamente los procedimientos, podrá conocerse y certificarse la calidad de los datos de vigilancia. El programa de AC debe recopilar cuidadosa y exhaustivamente los datos generados por estas actividades para su posterior evaluación.

El programa de AC y CC debe verificar que el material utilizado para la calibración de los diferentes equipos, como balanzas, medidores de flujo, de presión, controladores de flujo másico, fotómetros, generadores de ozono, lentes de calibración, sistemas de permeación, cilindros de mezclas de gases, sensores de frecuencia, voltímetros y amperímetros, entre otros, estén certificados contra estándares de referencia o de transferencia, rastreables a estándares primarios reconocidos o autorizadas²³.

La frecuencia de verificación o calibración de los equipos de vigilancia de calidad del aire debe ser la siguiente:

- En intervalos regulares de seis meses como máximo.
- Antes de que un equipo recientemente instalado empiece a reportar datos.
- Antes de retirar un equipo del sitio de vigilancia.
- Después de una reparación o el cambio de algún repuesto.
- En intervalos de un mes para una equipo nuevo por un mínimo de 3 meses, para establecer su estabilidad.
- Cada vez que el equipo se salga del rango de control de span y cero.

La frecuencia de verificación o calibración de los instrumentos meteorológicos debe ser:

- En intervalos regulares de un año como máximo.
- Antes de que un equipo recientemente instalado empiece a reportar datos.
- Después de una reparación o el cambio de algún repuesto.

²³ Como el US - National Institute of Standards and Technology (NIST), la Agencia de protección ambiental US-EPA, el IDEAM, la Superintendencia de Industria y Comercio.

Existe una gran variedad de métodos para realizar una verificación o calibración, que dependen de la tecnología y de la calidad de datos deseada, por tanto los procedimientos específicos para calibración de cada equipo serán considerablemente diferentes. En general, se recomienda seguir las indicaciones del fabricante, e integrarlas a los procedimientos específicos de verificación y calibración de los diferentes equipos elaborados por el programa de AC.

Los datos de vigilancia anteriores a la calibración deben corregirse con base en la misma para que puedan aprobar las instancias de validación.

Para llevar a cabo la calibración individual de diferentes métodos de medición, según el tipo de muestreador y poder realizar comparaciones entre un equipo y otro, aunque sean métodos diferentes se recomiendan los procedimientos establecidos en la Tabla 10.

Tabla 10. Procedimientos de calibración

MUESTREADORES PASIVOS	<ul style="list-style-type: none"> • Comparación contra otros métodos de muestreo y llevar a cabo calibraciones con otros laboratorios analíticos. • No se pueden realizar calibraciones de campo.
MUESTREADORES ACTIVOS	<ul style="list-style-type: none"> • Calibraciones entre otros laboratorios analíticos usando soluciones estándar. • Calibración dentro y entre SVCA con gases de referencia. • Comparaciones de campo contra monitores automáticos y auditorías de procedimientos operacionales son de gran utilidad.
ANALIZADORES AUTOMÁTICOS	<ul style="list-style-type: none"> • Calibraciones entre estándares de referencia usados por otros laboratorios. • Los sitios deben ser calibrados dentro y entre SVCA usando sistemas o fuentes de gases de referencia. • Llevar a cabo auditorias

Revisión de Cero y Span

En el caso de los analizadores automáticos, la verificación de cero y span es una manera rápida de revisar su desempeño. Dicha revisión, debe realizarse al menos semanalmente. Si los analizadores disponibles tienen la capacidad de realizar el chequeo de span y cero automáticamente y guardar los resultados, es posible programar estas pruebas diariamente, cuidando que los valores desde la última calibración no sean modificados automáticamente. Además deben programarse para minimizar la pérdida de datos importantes (aproximadamente por un intervalo de una hora), es decir durante periodos del día poco relevantes, como en la madrugada, a menos que el sitio de vigilancia presente niveles importantes a esa hora.

Los procedimientos para estas verificaciones dependen de la tecnología de los analizadores y deben elaborarse a partir de las recomendaciones del fabricante.

El programa de AC debe elaborar los formatos adecuados para documentar de manera detallada los resultados de estas pruebas y las observaciones de los técnicos que las realizan. Si el analizador se sale del intervalo de control, debe realizarse una calibración multipunto y debe identificarse, remediarse y documentarse la causa de la anomalía.

Las reparaciones necesarias deben hacerse de acuerdo con la programación de mantenimiento correctivo para minimizar la pérdida de datos.

7.1.10.13. Acciones correctivas

Existen dos tipos de acciones correctivas: En el sitio (para corregir datos no satisfactorios o reparar el equipo) o de largo plazo (para eliminar las causas de la inconformidad de los datos). Para ejecutar acciones correctivas se deben seguir básicamente los siguientes pasos:

- Definir el problema
- Asignar la responsabilidad para la investigación del problema
- Determinar la acción correctiva para eliminar el problema
- Asignar la responsabilidad para implementar la acción correctiva
- Establecer la efectividad de la acción correctiva e implementarla
- Verificar que el problema desapareció con la acción tomada

7.1.10.14. Costos de la calidad

Se deben identificar los costos totales del control y aseguramiento de la calidad, para minimizarlos al máximo, se pueden identificar los siguientes tipos de costos en sistemas de medición de contaminación del aire:

- Costos de prevención
- Costos de valoración (relacionado con la medición y análisis de datos)
- Costos de corrección de fallas

Se deben hacer balances y reportes periódicos de los costos asociados al procedimiento de control de la calidad.

7.1.10.15. Pruebas inter- laboratorios y dentro del laboratorio

Tienen el propósito de detectar fuentes de error en las mediciones y la estimación del sesgo y variabilidad en las medidas. Esta actividad puede ser apoyada por el programa de acreditación de laboratorios del IDEAM.

7.1.10.16. Procedimientos de auditoría

Las auditorías de desempeño son hechas para evaluar cuantitativamente la calidad de los datos producidos por el total del sistema de medición, es decir, recolección de la muestra, análisis de la muestra y procesamiento de datos.

El propósito de estas actividades es detectar errores sistemáticos en los datos reportados por el SVCA, fallas en el programa de AC, en el sistema de administración, en el diseño del SVCA y en general efectuar una revisión completa del programa de vigilancia. Las auditorías internas pueden desarrollarse con la colaboración de otras entidades dedicadas a la vigilancia de calidad del aire, que cuenten con personal idóneo y equipos de iguales o preferiblemente de mejores especificaciones que los propios. Las auditorías externas pueden ser realizadas por el IDEAM o por autoridades ambientales.

En este caso el programa de AC debe limitarse a realizar la programación de estas actividades de acuerdo con la frecuencia recomendada anteriormente, verificando que se cumpla esta programación e implementando las acciones correctivas que resulten de las auditorías. Sin embargo, el programa de AC puede verificar que se utilicen procedimientos adecuados, dependiendo de la complejidad y la profundidad de las auditorías implementadas. En el

documento titulado “SLAMS/NAMS/PAMS Network Review Guidance”, editado por la EPA, se encuentran lineamientos para la realización de auditorías.

Dentro de esta actividad también se realiza la intercomparación del desempeño de los instrumentos con los que cuenta el SVCA, ya sea entre sí, o con los del laboratorio de referencia, si el programa de vigilancia cuenta con uno. La meta que se persigue es asegurar que todos los instrumentos del SVCA estén operando en el mismo nivel, es decir, que se obtengan mediciones comparables entre sí. Aunque es recomendable involucrar asesores externos durante este proceso de verificación, también puede realizarse solo con el personal interno del programa de AC.

Pueden realizarse un gran número de pruebas en los diferentes equipos tanto de vigilancia de calidad de aire como meteorológico. El programa de AC debe seleccionar los que se deben implementar según los recursos con los que se cuente. Las pruebas de verificación de desempeño para los equipos de calidad del aire han sido estandarizadas en el Código Federal de Regulaciones de los Estados Unidos, Título 40, parte 58, Anexos A y B²⁴. Los procedimientos para las pruebas a los equipos meteorológicos pueden encontrarse en la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos de la OMM²⁵. El programa de AC debe utilizar estas fuentes para desarrollar sus propios procedimientos para las pruebas de verificación de desempeño.

7.1.10.17. Validación de datos

Aunque se implemente y se opere a satisfacción un SVCA, pueden generarse datos incorrectos. Antes que dicha información sea enviada a la autoridad ambiental nacional, es necesario establecer también un sistema de almacenamiento, revisión y validación de datos adecuado, que permita su depuración y su correcta validación.

En este proceso se filtran, aceptan o marcan datos para su análisis posterior (con criterios más amplios). Los datos invalidados deben ser archivados y conservados. Se recomienda contar con dos bases de datos, una que contenga todos los datos y otra que contenga únicamente los datos válidos.

La validación depende del tipo de datos y propósitos de las mediciones. Algunos métodos de validación son:

- Test del total de datos
- Test de límites
- Test de relaciones entre parámetros
- Test de comparación entre sitios

Puede ser realizada por varios métodos, manuales o computarizados

Revisión de datos

El examen o revisión de los datos es un proceso rutinario, que el personal calificado debe llevar a cabo en cada visita a la estación. Este proceso de revisión da como resultado metadatos usados posteriormente por el equipo de procesamiento como insumos para el proceso de validación de los datos de vigilancia. Los metadatos o información de los datos, definidos de una manera sencilla,

²⁴ Code of Federal Regulations. Title 40 Protection of Environment. Chapter I Environmental Protection Agency. Volume 5, part 58 Ambient Air Quality Surveillance.

²⁵ Organización Meteorológica Mundial - OMM. Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos. OMM-No 8. Ginebra, Suiza. 1990.

son las anotaciones y observaciones realizadas diariamente durante la operación de la estación, junto con la información sobre procesos como la verificación de span y cero y la calibración de los equipos, aportadas por los operadores, en los formatos respectivos.

La revisión sirve tanto para rechazar datos erróneos o inválidos e informar a los operadores de campo de fallas o problemas del equipo que requieran atención, como para identificar datos extremos de concentración de contaminantes que se salgan de los parámetros normales de calidad del aire en una zona determinada. En general, las consideraciones que se tienen que tomar en cuenta para la revisión de los datos son:

- Características e historia de instrumentos.
- Factores de calibración y tendencias.
- Datos fuera de intervalo o negativos.
- Picos o aumentos repentinos.
- Características del sitio de vigilancia.
- Efectos de la meteorología.
- Época del año y hora del día.
- Niveles de otros contaminantes.
- Observaciones desde otros sitios
- Eventos especiales (marchas, incendios, días festivos, entre otros)

Además existen algunos criterios que se utilizan para estimar la calidad de los datos, eliminando los que no se ajustan a un comportamiento normal, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores. Estos son:

- Las lecturas que caigan fuera del intervalo de detección del instrumento deberán ser eliminadas de la base de datos final, después de haber verificado la calibración del equipo.
- Datos que presenten cambios muy rápidos con respecto al tiempo, deberán tomarse con precaución verificando las condiciones atmosféricas o la presencia de alguna fuente de contaminación.
- Un importante indicador de la calidad de los datos pueden ser las características específicas de una estación de vigilancia, pues sus alrededores y las fuentes locales pueden influenciar las mediciones.

Existe una fuerte relación entre la concentración de los contaminantes y las condiciones meteorológicas como dispersión atmosférica, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar; las cuales tendrán que tenerse en cuenta cuando existan datos dudosos.

Ya revisados los datos, se procederá a la validación de los mismos para crear una base de datos confiable y que pueda ser utilizada para cumplir con los objetivos de vigilancia que se fijaron.

Validación de los datos de las estaciones automáticas

La validación es el proceso de confirmar los datos de vigilancia, acopiando e inspeccionando evidencia objetiva que confirme que los requerimientos específicos del uso final de los datos han sido cumplidos.

La validación de los datos debe hacerse en varios niveles, de manera manual o mediante aplicativos de software. En cualquiera de los dos casos es necesario que este proceso lo realice un profesional con experiencia y criterio para calificar, rechazar o aceptar los datos obtenidos del muestreo; para esto, debe conocer los principios básicos de la química de los contaminantes, el comportamiento de los analizadores, las condiciones meteorológicas locales, los usos de suelo de

la zona de estudio, entre otros aspectos y debe considerar además factores como las desviaciones del cero y span, los resultados de las calibraciones y los ajustes realizados a los parámetros de operación de los equipos, el historial de desempeño y servicio realizado a los equipos (es decir, los metadatos provenientes de la revisión reportados por los operadores), junto con los ciclos estacionales, las condiciones climáticas inusuales, los datos reportados para otros contaminantes y las variables ambientales en los intervalos de tiempo adecuados desde el punto de vista de la cinética de las reacciones de los contaminantes atmosféricos.

Como se mencionó anteriormente, existen varios niveles en la validación de datos, el primero de ellos es el que se efectúa en campo, otro que se realiza de manera automática por el equipo (según la programación realizada al mismo) y otro que es realizado en la estación central por la persona encargada en el SVCA de revisar la información generada.

La validación de datos en campo consta fundamentalmente en identificar datos erróneos en el datalogger, en esta actividad se identifican aquellos datos que se encuentren fuera del rango lógico de datos y deben ser notificados los sucesos que se hayan presentado y que puedan haber influenciado directamente la veracidad de la información, como por ejemplo: canales bloqueados, interrupciones por procesos de calibración o por falta de energía, problemas en el registrador o en cualquier otro instrumento. De acuerdo con lo anterior, se deberán utilizar controles o banderas que identifiquen el problema del dato. Con el objeto de dejar documentadas estas anomalías, el SVCA del DAMA (ahora SDA) desarrolló un formato de campo que se visualiza en la Tabla 11, el cual podría ser utilizado por los diferentes SVCA automáticos, realizando las respectivas modificaciones que cada entidad considere conveniente.

Tabla 11. Ejemplo de tabla de validación de datos en campo

REVISIÓN DE DATOS EN CAMPO												
Técnico de Operación:					Fecha de Revisión:							
ESTACIÓN		PARÁMETROS AFECTADOS	ANOMALÍA		OBSERVACIONES							
COD.	NOMBRE		Fecha y Hora De Inicio	Fecha y Hora De Finalización								

NOMBRE Y CÓDIGO DE LAS ESTACIONES											
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14
Bosque	Sony	INEM Tunal	IDRD	Carrefour	Cazucá	Escuela De Ing.	Kennedy	U. Santo Tomás	U. Corpas	Merck	Fontibón

PARÁMETROS													
SO ₂	NO _x	O ₃	CO	PM ₁₀	PST	V.V	DV	TEMP	LLUVIA	HR	RAD. SOL	P. BAR.	V.V - X Y Z

Fuente: Variables del Sisaire, IDEAM.

La siguiente etapa en el proceso de validación corresponde a la validación automática, la cual consiste en comparar los datos generados por un equipo de acuerdo con el tiempo de monitoreo al cual ha sido programado. En términos generales, la programación de los equipos automáticos en el país es cada diez minutos, almacenando promedios horarios. Sin embargo, podrá existir otra

frecuencia de monitoreo, frente a las mediciones históricas de dichos equipos. Un tipo de control automático consiste en definir el límite mínimo de validación como el valor mínimo positivo presentado por el parámetro durante toda la historia del monitoreo y el límite máximo de validación como la mediana más tres veces la amplitud intercuartílica del conjunto total de datos. De esta manera, la validación automática debería realizarse de acuerdo con estos dos parámetros; uno para un límite mínimo y otro para un límite máximo, para cada parámetro. Esta depuración automática filtra datos atípicamente altos, negativos o atípicamente bajos y además identifica con banderas aquellos datos que han sido descartados en esta etapa.

Por último, la validación que es realizada en la estación central por la persona encargada en el SVCA de revisar la información generada, es la validación que requiere un mayor conocimiento de las variables que se miden, de la química de los contaminantes, del comportamiento local de los mismos, de los equipos del SVCA, de los resultados de las calibraciones, entre otras. Esta validación se puede dividir en dos etapas: una validación manual diaria y otra validación cada quince días o tres semanas (siguiendo siempre los mismos parámetros y teniendo siempre los mismos criterios de verificación).

En el proceso de *validación manual diaria*, es necesario emplear las compilaciones diarias de los datos de vigilancia para realizar la exploración general de todos los datos. El programa de aseguramiento de calidad (AC) debe especificar el formato exacto (unidades, decimales, etc.) en que los datos deben remitirse de las estaciones para su validación y análisis, estas especificaciones deben coincidir con lo estipulado en la normatividad nacional vigente.

Además, en la validación manual diaria es recomendable realizar representaciones gráficas del comportamiento de los datos obtenidos para cada contaminante, a través del aplicativo de visualización o de elaboración de gráficos que tenga el SVCA; básicamente se trata de identificar datos que se alejen del comportamiento esperado o histórico de las variables monitoreadas. Un procedimiento a utilizar puede consistir en graficar inicialmente los datos horarios por periodos semanales desde la fecha de la revisión hasta siete días antes, aunque la revisión sea diaria, esto con el objeto de realizar un barrido intensivo de los datos, es decir al menos de siete (7) revisiones manuales durante esta fase.

Una vez encontrado un intervalo con datos sospechosos o anormales, se hace necesario graficar todos los datos, ya no solamente los horarios, para determinar con exactitud la anomalía, su extensión temporal y su posible significado u origen. El personal encargado de la validación de datos siempre debe tener en mente el significado físico y químico de los parámetros monitoreados.

Deberían marcarse como no válidos aquellos datos que presenten períodos constantes, datos con poca variación, datos imposibles físicamente (por ejemplo datos de radiación solar en horas de la noche), datos que muestren alteraciones súbitas, o lapsos de ascenso y caída inusuales en el comportamiento observado cotidianamente en el parámetro, que son cuestionables.²⁶ Algunos ejemplos de datos que son imposibles debido al significado físico de los parámetros a que se refieren y que deben ser marcados como no válidos son:

- Datos de concentraciones de PM10 mayores a las de PST en la misma estación. Dado que el PST está constituido del total de partículas suspendidas en el aire, la fracción de partículas con diámetro menor a diez micras, no puede ser nunca mayor al total.

²⁶ Sin embargo, se debe tener en cuenta que ciertas condiciones atmosféricas, o la presencia de algunas fuentes contaminantes cercanas pueden dar lugar a fluctuaciones extremas en las concentraciones de contaminantes.

- Datos de concentraciones de NO₂ que no correspondan a la resta entre la concentración del NO_x menos la concentración del NO. Por ende las concentraciones del NO₂, también deben ser siempre menores o iguales a las de NO_x.

En conclusión, la exploración general de la base de datos debe:

- Buscar datos inusualmente altos o bajos que pueden indicar errores gruesos en los sistemas de vigilancia. Para poder determinar los valores que pueden considerarse altos o bajos para un contaminante específico, el profesional encargado de esta labor debe conocer las condiciones predominantes para el contaminante en la estación de vigilancia y los límites de detección superiores e inferiores del equipo, que determinan los valores más altos o más bajos que puede reportar el equipo. Los datos considerados cuestionables deben ser marcados con una bandera para ser posteriormente verificados. Ésta exploración general de los datos no es sensible a datos con valores intermedios que también pueden estar errados.
- Detectar desviaciones del cero en un analizador automático que no han sido corregidas. Estas desviaciones son evidentes cuando los valores mínimos usuales de las concentraciones de contaminantes que por ejemplo para el CO se presentan en las horas de la madrugada tienden a incrementar o a disminuir por un periodo de varios días. También puede ocurrir que las concentraciones mínimas a estas horas se encuentran constantemente por encima de los valores típicos. En este caso, puede inferirse que el analizador puede tener un mal ajuste del cero. En ambas situaciones, es necesario contrastar los hallazgos con los reportes de verificación de cero y span y los reportes de calibración del equipo. Si es necesario, deben corregirse los datos y recomendar el ajuste del equipo.
- Detectar y rechazar todos los valores negativos de concentración de los contaminantes a menos que provengan de un grado aceptable de inexactitud del instrumento (una característica común de muchos tipos de analizadores automáticos). Lo anterior es indicio de una inadecuada respuesta, configuración o calibración del equipo a menos que los valores negativos se presenten durante su periodo temprano de estabilización de acuerdo con los manuales de operación.
- Por último, debe identificarse el número de horas con información utilizable en cada día y descartar para el siguiente nivel de validación los días que no cumplan con el mínimo de recuperación de datos útiles establecido por los objetivos de calidad de datos.

La exploración continua de los datos de vigilancia y de los metadatos producidos por los operadores constituye un enfoque más flexible y recomendable para el primer nivel de validación de datos.

Para este mismo nivel de validación deben tomarse los datos marcados con banderas y analizar su validez a la luz de la experiencia y el conocimiento del personal encargado de examinar los datos, que son prerrequisitos para el éxito del proceso. Se deben rechazar los datos no adecuados. Para este propósito, el grupo de validación debe contar con los metadatos recopilados por el grupo de operaciones para el período que se va a validar, realizando el proceso de la siguiente manera:

- Inicialmente, se deben seleccionar los datos marcados con alguna bandera que corresponden a los datos descartados por la validación automática (Ver Tabla 12). Se debe organizar cada parámetro por estación y se deben graficar en el tiempo, con las hojas de cálculo, o programas de análisis estadísticos disponibles. Después deben ser analizados contra los metadatos disponibles, con el fin de validarse o descartarse definitivamente. Si los datos se consideran válidos, debe utilizarse el editor de datos con que cuenta el SVCA, para marcar los datos con la

bandera que indica datos válidos, “V” (Ver Tabla 13) y se deben graficar en el tiempo, con cualquier hoja de cálculo o programa estadístico.

- Posteriormente se deben tomar las curvas de desviación de cero y span y las curvas de calibración de los analizadores de gases, obtenidas por el grupo de operación del SVCA y ajustar los datos válidos de la base de datos, según sea necesario. Las desviaciones del cero son evidentes cuando los valores mínimos usuales de las concentraciones de contaminantes, que por ejemplo para el CO se presentan en las horas de la madrugada, tienden a incrementar o a disminuir por un periodo de varios días. También puede ocurrir que las concentraciones mínimas a estas horas se encuentran constantemente por encima de los valores típicos. En este caso, puede inferirse que el analizador puede tener un mal ajuste del cero. En ambas situaciones es necesario contrastar los hallazgos con los reportes de verificación de cero y span y los reportes de calibración del equipo. Si es necesario, deben corregirse los datos en la base de datos y recomendar el ajuste del equipo en cuestión al grupo de operación.
- Después de realizar estos dos primeros filtros, se deben seleccionar los datos marcados como válidos y organizarlos por parámetro y por estación. Con el software estadístico disponible en el SVCA, se deben realizar diagramas de caja de los datos, para identificar los datos atípicos (outliers) y los extremos, los cuales deben tratar de entenderse basándose en los metadatos disponibles sobre cada parámetro y cada estación y en la experiencia del grupo de validación²⁷.

Algunas recomendaciones generales que deben tenerse en cuenta para este nivel de validación son las siguientes:

- 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 durante las primeras horas de la mañana, pero estos niveles serían fácilmente explicables en un área urbana congestionada debido a las emisiones del tránsito.
- 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 validez de los datos. Cuando los datos son dudosos, se deben considerar parámetros tales como el entorno de la estación, la velocidad y dirección del viento, la precipitación y la radiación solar. Por ejemplo, niveles altos de ozono asociados con climas lluviosos y sin radiación solar se deben considerar como dudosos.
- 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 O₃ y NO_x. Por ejemplo, altos niveles de ozono durante la noche, si bien pueden ser 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).
- 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.
- 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 del SVCA a menudo pueden indicar integralmente si las observaciones hechas en un sitio particular son excepcionales o cuestionables.

²⁷ Estos procedimientos están basados en el manejo de validación dado a los datos en la red de Bogotá y de acuerdo con el documento: Variables del Sub-Sistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) publicado por el IDEAM en su página web.

De acuerdo con lo anteriormente establecido, es importante para que los procesos de validación sean homogéneos en los diferentes SVCA automáticos del país, unificar los controles o banderas que identifiquen los diferentes estados del dato, en este sentido, en la Tabla 12 se presentan los controles o banderas que deberán ser utilizados por los diferentes SVCA según sea el caso y que invalidan el dato. Por otro lado, en la Tabla 13 se presentan los tipos de banderas que no generan la invalidación del dato.

Tabla 12. Tipos de banderas que invalidan los datos

BANDERA	VALIDEZ	DESCRIPCIÓN DE LA BANDERA
C	N	Dato perturbado por calibración
S	N	Dato perturbado por calibración de Span
Z	N	Dato perturbado por calibración de Zero
M	N	Dato erróneo por razón desconocida
D	N	Dato erróneo por fallo técnico
T	N	Dato que no ha sufrido el proceso de validación adecuado
#	N	Datos insuficientes
B	N	Mal estado externo
E	N	Fallo eléctrico
F	N	Fallo en la corriente eléctrica
!	N	Señal fuera de rango
H	N	Valor de prueba
P	N	Proceso de purga del equipo

Tabla 13. Tipos de banderas que no invalidan los datos

BANDERA	VALIDEZ	DESCRIPCIÓN DE LA BANDERA
V	S	Dato válido
O	S	Dato corregido
R	S	Dato reconstruido
<	S	Falta de datos
^	S	Valor alto del equipo
_	S	Valor bajo del equipo
/	S	Cambio brusco de la concentración

Después de haber sido elaboradas las pruebas estadísticas y presentadas en diferentes representaciones gráficas (como diagramas de caja, gráficas de períodos diarios, mensuales o anuales) se seleccionan los datos válidos y posteriormente estos deben ser corregidos según los resultados de calibración de los equipos con el fin de calcular los promedios en el tiempo para la comparación con las normas nacionales vigentes.

El programa de AC debe definir el procedimiento de validación de los datos, las pruebas que deben realizarse a los mismos y la documentación que debe generarse.

Por otra parte, los datos que sean cargados al Sub-Sistema de Información sobre Calidad de Aire (SISAIRE) deberán cumplir con las condiciones de acceso de la información que se encuentren estipuladas en dicho sistema y deben estar previamente validados.

Validación de los datos de las estaciones semiautomáticas y manuales

Los procesos de validación de los datos obtenidos a través de los equipos semiautomáticos o manuales difieren de la propuesta realizada para los equipos automáticos, dado que no es posible

realizar una programación del equipo, ni tampoco existe la cantidad de datos que se pueden tomar con un equipo automático, entre otras. Por lo anterior, es importante realizar un proceso de captura adecuado. En el presente protocolo se muestran algunos procedimientos de monitoreo, como el de los equipos muestreadores de alto volumen (Hi Vol) para PST y para PM10.

Validación de los datos de las estaciones meteorológicas

El procesamiento de información meteorológica es realizado en tres etapas que incluyen la lectura de los datos de entrada, cálculo de resúmenes y finalmente generación de reportes. Cada una de estas actividades es soportada por diversos programas específicos para cada función.

Una vez son obtenidos los datos por los sensores meteorológicos son almacenados en archivos con extensiones propias de cada equipo. Dichos archivos son recolectados en la central de información y de allí deben ser clasificados, reorganizados y almacenados en un solo tipo de archivo para cada una de las variables, con el fin de facilitar su lectura y posterior uso para la generación de análisis y reportes. Este proceso se separa a su vez en tres pasos:

- Separación de parámetros individuales: A partir de los archivos originales y de acuerdo al formato de origen, se extraen por separado las cifras de cada parámetro relevante y se almacenan en nuevos archivos en un formato simple de texto (se puede usar el tipo de archivo conocido como CSV donde los valores son separados por comas). De este modo se generan archivos para cada parámetro meteorológico (dirección del viento, velocidad del viento, temperatura, presión, humedad relativa, radiación solar, etc.), en donde son reportados los valores de la respectiva variable y también la fecha y la hora en la que fue obtenido el dato por el equipo de medición.
- Separación de datos por años: Cada archivo de texto con las variables ya organizadas, puede ser nuevamente tratado, separando los grupos de datos por años, es decir que se tendría para cada parámetro meteorológico un grupo de archivos que corresponderían a cada uno de los años de los que se tiene dicha información.
- Separación los datos por meses: De forma similar al proceso anterior, los reportes anuales también pueden ser separados de manera mensual, de esta forma se tendrán archivos de cada una de las variables meteorológicas clasificadas para cada uno de los meses de medición.

Para el caso del análisis de los datos relativos a la dirección del viento obtenidos por las estaciones de monitoreo, es necesario realizar un paso adicional al descrito en los pasos anteriores. Este paso adicional consiste en realizar la conversión de los datos obtenidos en grados de dirección a sus respectivas convenciones internacionales que indican las direcciones desde las cuales provienen. Esta tarea se elabora de acuerdo con la Tabla 14.

Tabla 14. Conversión de dirección del viento

CONDICIÓN	SÍMBOLO
$337 \leq DV \leq 360$ ó $0 \leq DV < 22,5$	N (Norte)
$22,5 \leq DV < 67,5$	NE (Noreste)
$67,5 \leq DV < 112,5$	E (Este)
$112,5 \leq DV < 167,5$	SE (Sureste)
$167,5 \leq DV < 202,5$	S (Sur)
$202,5 \leq DV < 247,5$	SW (Suroeste)
$247,5 \leq DV < 292,5$	W (Oeste)
$292,5 \leq DV < 337$	NW (Noroeste)
V.V = 0	CALMA

Nota: DV hace referencia a dirección del viento y V.V hace referencia a velocidad del viento.

El siguiente paso en el procesamiento de la información meteorológica, después de haber homogenizado la forma de almacenar los datos y generado los archivos anuales y mensuales para cada variable, es la verificación de la calidad y confiabilidad de los datos. Los criterios para la evaluación de calidad deben ser definidos para cada región con base en los valores históricos registrados en las estaciones del IDEAM, según la elevación sobre el nivel del mar de la estación y de acuerdo con las secuencias que presentan los datos en cada estación. De esta forma, los datos que se encuentren fuera de los rangos lógicos no serán tenidos en cuenta para los posteriores cálculos y deberán ser marcados para su posterior revisión.

Una vez los datos han sido verificados, se generan diferentes resúmenes en donde se relacionan los parámetros meteorológicos de acuerdo con la hora y período, de la siguiente forma:

- **Resúmenes mensuales:** Los datos de cada variable se reúnen en una tabla de acuerdo con cada mes disponible, aplicando una función de promedio, excepto para el parámetro de precipitación en donde se aplica la suma de todos los valores por hora, y para el parámetro de dirección de viento en donde se aplica la moda estadística. En este paso también se generan archivos que incluyen todos los datos que hayan sido rechazados por la etapa de verificación.
- **Resúmenes anuales:** Se generan nuevamente resúmenes del mismo modo descrito para los resúmenes mensuales, pero esta vez se generan a partir de los resúmenes mensuales y para cada año.
- **Resúmenes multi-anuales:** Se generan resúmenes que abarcan todo el rango de años para los que se disponen datos, tal y como se ha explicado anteriormente, con la única diferencia que para el parámetro de precipitación ya no se aplica la suma de todos los valores, sino el promedio de los valores anuales.

Empleando los datos recopilados en los resúmenes, se generan gráficas que representan el comportamiento de los valores meteorológicos a través de las horas de un día. Estas gráficas se generan para cada año y finalmente para el rango multi-anual completo.

La última fase del procesamiento de datos consiste en la generación de reportes mensuales, anuales y multi-anuales, los cuales deben incluir la tabla de datos y las gráficas que se hayan generado para el período de tiempo correspondiente, partiendo de los resúmenes y gráficas creados en la fase anterior.

Los SVCA automáticos pueden contar con aplicativos que realizan automáticamente las acciones mencionadas anteriormente.

7.1.10.18. Análisis estadístico de los datos

Se deben utilizar técnicas adecuadas de análisis de datos, de acuerdo con el tipo de datos manejados y los requerimientos del usuario. Previo al cálculo de promedios en el tiempo y comparación de las mediciones con las normas de calidad de aire expedidas por la autoridad ambiental competente, los datos ya validados y corregidos, deben ser convertidos a valores a condiciones de referencia (298,15 K y 101,325 KPa) y presentarse en las unidades adecuadas. Las ecuaciones y factores para realizar estas conversiones han sido claramente estipulados dentro de la norma y también son mencionados en este manual.

7.2. MANEJO DE MUESTRAS Y CADENA DE CUSTODIA

En los SVCA manuales, la principal fuente de error en los datos obtenidos se debe al manejo de las muestras. Esto incluye almacenamiento, transporte y análisis, como en el caso de medición de PST, PM10 y PM2.5, SO₂ y plomo.

Cabe anotar, que las fallas en las mediciones no solo se presentan en los equipos de operación manual, sino también en aquellas estaciones automáticas donde no es posible la descarga y transferencia directa de los datos desde el sitio del monitoreo hasta la central de información y por lo tanto se requiere delegar a algún miembro de la organización del SVCA, la tarea de descargar periódicamente de la estación datos en un medio magnético de almacenamiento de información (como CD, USB, etc.) o incluso directamente a un procesador portátil y luego dicha información llevarla a la central de información.

En otras ocasiones, donde los equipos reportan los datos de forma impresa, es necesario también recolectar la información y llevarla hasta la central de información para su procesamiento, análisis y archivo. En las actividades mencionadas anteriormente, es necesario contar con un procedimiento estándar para realizar dicha actividad, así como establecer el encargado directo del cumplimiento y buen desarrollo de la misma.

Para todos los equipos de medición debe existir un protocolo o procedimiento que describa un único proceso a seguir en cada caso y también formularios o formatos que soporten la ejecución de dicha actividad bajo los parámetros de calidad establecidos. A dicha documentación, que asegura el manejo que se le da a las muestras (y a los reportes o medios magnéticos con la información para el caso de estaciones automáticas sin transmisión directa de datos), se le conoce como registro de custodia o cadena de custodia.

7.2.1. MANEJO DE LA MUESTRA

La manipulación de las muestras (en los métodos que la incluyen), generalmente se da en las etapas de recolección del medio de obtención de la muestra, transporte y análisis. Estas etapas provocan los mayores errores en las mediciones debido a la manera en que se determinan las concentraciones, por esto, es fundamental que las muestras sean manipuladas tal y como se recomiendan en los procedimientos para evitar modificaciones, pérdidas o alteraciones en las muestras y por lo tanto en la información a obtener. Las fases en las que se deben manipular las muestras incluyen: etiquetado, recolección y transporte.

7.2.1.1. *Etiquetado e Identificación de la Muestra*

Debe existir un documento donde se defina el manejo de las muestras para garantizar la correcta identificación de las mismas durante el ensayo y el análisis, que debe seguirse en su totalidad para evitar anular muestras por un mal seguimiento.

Los filtros que van a ser empleados en el monitoreo deben ser identificados claramente, con tinta a prueba de agua, para que la identificación no sea afectada por acción de la humedad del aire, de los gases contaminantes presentes en el aire succionado o por las temperaturas a las cuales están sometidos los filtros. Pueden emplearse otros métodos de identificación como códigos de barras siempre y cuando no afecten las condiciones del filtro y cumplan satisfactoriamente con su función de identificación. Es importante que el método escogido para marcar los medios filtrantes, no deteriore la capacidad del filtro, ni genere perforaciones o cambios en el poro del material.

Cada contenedor de muestras que se emplea en el transporte de las mismas debe tener un único número de identificación para evitar la posibilidad de intercambio de muestras; este número de identificación debe ser reportado en el informe de los análisis. Puede incluirse información general, si es necesario, dependiendo del método de análisis que se está empleando. Para los métodos de análisis de gases a través de agentes absorbentes, es indispensable registrar también el número de recipientes recolectados y observaciones respecto al nivel de muestra encontrado.

Debe existir un buen control en la manipulación de las muestras para evitar la contaminación de las mismas y para lograr que el análisis se realice a las muestras con las características que se reportaron durante su recolección. Por lo anterior, las muestras deben permanecer en un lugar seguro entre el tiempo de recolección y el tiempo que tardan en ser analizadas. Es importante que todas las muestras estén seguras hasta su uso y descarte. Estas normas de seguridad deben estar descritas en un reporte que irá firmado por el responsable de la manipulación de las muestras.

Los reportes de los analizadores automáticos también deben ser identificados claramente y sin lugar a ambigüedades, esta identificación puede ser colocada sobre cada reporte de resultados del equipo teniendo cuidado que no se tapen o interfieran los resultados mostrados. Si la hoja de reporte es muy larga, la información deberá ser almacenada en intervalos periódicos de tiempo en cartas, con marcas indelebles. La Figura 37 muestra la etiqueta estandarizada para la identificación de las muestras que puede ser empleada.

Nombre de la Organización del Muestreo

N° de Identificación de la Muestra: _____

Tipo de Muestra: _____

Fecha de Recolección: _____

Nombre del Sitio: _____

Serial del Muestrador: _____

Figura 37. Ejemplo etiqueta de la muestra

7.2.1.2. Colección de la Muestra

Para evitar desechar muestras por invalidez se debe tener precaución en su sellado y ubicación en los contenedores, los cuales a su vez deben garantizar un ambiente libre de agentes reaccionantes con el contenido de las muestras. Sin embargo, si debido a la logística de transporte es inevitable que el contenedor sea abierto por personal no autorizado, las muestras deben ir selladas individualmente con un adhesivo especial, el cual llevará un número y estará firmado por el operario responsable del manejo de la estación en donde se recogió la muestra; este adhesivo debe estar ubicado de tal forma que garantice que la muestra no puede ser destapada sin la destrucción total del adhesivo, notándose así claramente la manipulación por personal no autorizado y la posible contaminación de la muestra.

Posteriormente las muestras deben ser entregadas al laboratorio para análisis, preferiblemente el mismo día en que fueron tomadas. Si esto no es posible, las muestras deberán ser ubicadas en un sitio seguro que evite rupturas, pérdidas o contaminación.

7.2.1.3. Transporte

En el transporte de muestras u otros datos de monitoreo, es importante y por esto se hace énfasis

en que se deben tomar precauciones para evitar y minimizar al máximo el riesgo de manipulación, destrucción accidental y efectos físicos o químicos sobre la muestra.

En general, las muestras siempre estarán expuestas a factores físicos y ambientales como temperatura y presión y además a contaminación por la manipulación (empaqué y acomodación). Sin embargo, en cada etapa (identificación del empaqué, recolección, sellado, manipulación, almacenamiento, transporte y entrega final al laboratorio) debe existir un documento guía para el ejercicio de estas actividades y un registro donde se especifique claramente el responsable de cada etapa y de la calidad de las muestras. Todo esto debe estar organizado en un manual o guía de operación estándar aplicable a todo el SVCA. Finalmente, incluso en el laboratorio se deben mantener las muestras en un lugar seguro, protegiéndolas de todos aquellos factores que puedan afectar su calidad mientras llega el momento de realizar el análisis a cada paquete de muestras. La persona responsable de la entrega de las muestras al laboratorio o del registro de datos debe ser capaz de asegurar la no manipulación o destrucción de las muestras y en todo momento será el principal responsable de las mismas.

Para asegurar que las muestras líquidas no presentan derrames durante el transporte, debe marcarse el nivel del líquido en la parte exterior del recipiente o envase con un marcador permanente.

Cuando se usen latas de acero inoxidable debe compararse la presión de la lata al ser recibida en el laboratorio con la presión final obtenida en la recolección de las muestras, esto indica si el recipiente presenta fugas o pérdidas de muestra.

7.2.2. CADENA DE CUSTODIA²⁸

Si los datos obtenidos por el SVCA son empleados como evidencia, debe existir un reporte escrito que describa la ubicación de los datos y de las muestras en todo momento. Este registro es necesario para hacer un sondeo inicial de la representatividad de las muestras, sin él no se puede garantizar que la muestra es la misma desde que fue recolectada hasta el momento de su análisis en el laboratorio.

Los datos sólo deben ser manipulados por personas involucradas de alguna forma con el SVCA. Cada persona que manipula las muestras o los reportes de datos de las estaciones automáticas debe estar en la capacidad de identificar y registrar en el documento de la cadena de custodia de quién recibió el material y a quién se lo entregará directamente. La Figura 38 es un ejemplo de la forma de registro que debe acompañar a las muestras o los datos desde el sitio en donde fueron recolectados hasta el laboratorio donde serán analizados. Todas las personas que tengan contacto con este material deben firmar el registro de la cadena de custodia.

²⁸ Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1. August 1998.

No		nombre del proyecto		No de muestras	No. y tipo de contenedor						Observaciones
operario											
No	fecha	hora	descripción de la estación								
entregado por		fecha	hora	recibido por		impresión		comentarios			

Figura 38. Ejemplo de la forma de cadena de custodia

Una vez las muestras llegan a su destino, se debe proceder a realizar una verificación de la integridad y utilidad de las muestras. Cuando se encuentre alguna muestra de la que no se esté seguro sobre la validez de la misma, debe marcarse, reportarse y mantener el seguimiento de este registro hasta que pueda comprobarse la validez o invalidez de la muestra. Esta marca puede reportarse en la forma que se muestra en la Figura 38 en comentarios u observaciones.

Los registros de cadena de custodia deben ser usados para hacer un seguimiento de la manipulación de las muestras a través de las fases de almacenamiento, procesamiento y análisis en el laboratorio. La Figura 39 muestra un ejemplo del formato de cadena de custodia para el laboratorio.

laboratorio					
número de la muestra	número de recipiente	descripción de la muestra			
persona responsable de muestras:		hora:		fecha:	
número de la muestra	entregada por	recibido por	hora	fecha	revisión del cambio de custodia

Figura 39. Ejemplo de cadena de custodia del laboratorio

En general, es recomendable que las entidades encargadas del manejo y operación de los SVCA, tengan presente los siguientes cuestionarios para evaluar su desempeño y visualizar los puntos por mejorar. A continuación se presentan dos tablas con las respectivas preguntas a contestar por el SVCA, de acuerdo a si manejan equipos manuales (ver Tabla 15) o equipos automáticos sin transmisión directa de datos (ver Tabla 16).

El cuestionario de la Tabla 15 deberá ser diligenciado para los casos en los que no se cuente con estaciones automáticas y en general para todos aquellos métodos indirectos de determinación de concentración de contaminantes, como por ejemplo: material particulado (PST, PM10 mediante equipos Hi Vol), plomo y determinación de gases contaminantes mediante la técnica de absorción de gases en solventes líquidos.

El cuestionario de la Tabla 16 permite realizar una revisión de cadena de custodia para métodos de monitoreo automático (manejo de reportes).

Tabla 15. Cuestionario de evaluación de la cadena de custodia para métodos manuales

No.	DESCRIPCIÓN	SI	NO
1	¿Se cuenta con el documento <i>Manual de Procedimiento Estándar de Operación</i> debidamente respaldado y documentado para la identificación inicial de los contenedores, porta muestras o recipientes y para la recolección, identificación, manipulación, transporte, protección y conservación de muestras incluyendo lo establecido en el método de medición del contaminante medido?		
Observaciones:			
2	¿Existen formatos o registros correspondientes a la custodia de las muestras desde su recolección hasta la entrega en el laboratorio, donde se reporte etapa por etapa el responsable y además, en caso de ser aplicable, que permita la verificación en cada sección de la integridad de las muestras?		
Observaciones:			
3	¿Existen y se aplican procedimientos para la recepción, manejo, protección, almacenamiento, retención y descarte de muestras de ensayo, incluidas las medidas necesarias para proteger la integridad de las muestras?		
Observaciones:			
4	¿Existe y se aplica un sistema de identificación de recipientes, porta muestras o contenedores y esta identificación se mantiene mientras esté en el laboratorio, utilizando etiquetas y códigos únicos?		
Observaciones:			
5	¿Existe y se aplica un sistema para la identificación de las muestras y esta identificación se mantiene durante su permanencia en el laboratorio, utilizando etiquetas y códigos únicos?		
Observaciones:			
6	¿Existe y se aplica un procedimiento estándar registrado en el <i>Manual de Procedimiento Estándar de Operación</i> para el sellado y protección de las muestras? En el caso de recipientes que contienen líquidos ¿existe el método de verificación de niveles?		
Observaciones:			
7	¿El personal encargado de la recepción de muestras en cada etapa de la transferencia, las revisa y lleva registros de sus características, por ejemplo, revisar que no hayan rupturas de los recipientes, derrames o daño en los adhesivos de sellado de las muestras?		
Observaciones:			
8	¿Existen procedimientos e instalaciones adecuadas para evitar el deterioro, pérdida o daño de las muestras durante el almacenamiento, manejo y preparación?		
Observaciones:			
9	¿Existen y se aplican protocolos para el manejo de las muestras en el recorrido desde el sitio de toma de muestras hasta el laboratorio y durante el análisis en el laboratorio?		
Observaciones:			

10	¿Se lleva un control y registro de las condiciones ambientales para todas las muestras (temperatura y presión)? ¿Se llevan registros de las temperaturas de almacenamiento? ¿Existen medidas de almacenamiento y seguridad que protegen las condiciones e integridad de las muestras que requieren custodia especial?		
Observaciones:			
11	¿Se cumple con las condiciones para el pretratamiento de muestras (filtración, homogenización) antes de realizar el análisis definitivo en el laboratorio?		
Observaciones:			
12	¿Existen registros para el control del pretratamiento de muestras?		
Observaciones:			

Tabla 16. Evaluación del manejo de los reportes desde la estación automática hasta el centro general de información del SVCA.

No.	DESCRIPCIÓN	SI	NO
1	¿Se cuenta con el documento <i>Manual de Procedimiento Estándar de Operación</i> debidamente respaldado y documentado para la operación del equipo así como para la impresión, identificación y envío de cada uno de los reportes generados por el equipo?		
Observaciones:			
2	¿Existen formatos o registros correspondientes a la custodia de los reportes de datos de los equipos desde el momento en que fueron generados hasta la entrega en el laboratorio o central de información, donde se permita comprobar el listado de todas las personas que tienen acceso a ese material y la veracidad de dichos documentos?		
Observaciones:			
3	¿Existen y se aplican procedimientos para la identificación de cada reporte, utilizando etiquetas y códigos únicos y se mantiene esta identificación para su posterior organización en la central de información?		
Observaciones:			
4	¿El personal encargado de la recepción de los reportes en cada etapa de la transferencia, los revisa y comprueba que realmente sean los reportes originalmente generados por el equipo?		
Observaciones:			
5	¿Existen procedimientos e instalaciones adecuadas para evitar el deterioro, pérdida o daño de los documentos durante la transferencia, archivo y manejo de dicha información?		
Observaciones:			

7.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GENERADA EN LOS SVCA

7.3.1. BASES DE DATOS

Las bases de datos de calidad del aire generadas en los diferentes Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire deberán ajustarse a los requisitos del Sub-Sistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE). Los detalles de los aspectos de la base de datos del SISAIRE y el modo en que se realizará la captura de la información para cada SVCA, serán dados a conocer por el IDEAM.

El SISAIRE ha sido formulado para convertirse en el medio a través del cual se centralice la información relacionada con calidad de aire recolectada a lo largo del territorio nacional y de esta manera poder contar con los criterios suficientes para generar, implementar y evaluar estrategias de control y prevención de la contaminación atmosférica. Por lo anterior, el SISAIRE define las variables que deben presentarse, el formato en el que deben presentarse y el formato para su respectivo almacenamiento.

7.3.1.1. Manejo y presentación de las variables de calidad del aire

Es necesario identificar todas las variables de calidad del aire con un nombre. Se recomienda utilizar la columna nombre de la Tabla 17 para identificar cada una de ellas. Es importante que todas las variables estén en mayúsculas, no utilizar subíndices ni tampoco espacios entre los caracteres de cada nombre con el fin de permitir la correcta migración de los datos de las diferentes SVCA del país. En la Tabla 17 se presentan las variables que deberán ser incluidas dentro del SISAIRE²⁹, el nombre de las mismas y las unidades.

Tabla 17. Variables iniciales de calidad del aire a ser incluidas dentro del SISAIRE

VARIABLE		NOMBRE	UNIDADES	
CONTAMINANTES CRITERIO	1	Partículas totales en suspensión	PST	µg/m ³
	2	Partículas suspendidas menores a 10 micras	PM10	µg/m ³
	3	Partículas suspendidas menores a 2.5 micras	PM2.5	µg/m ³
	4	Dióxido de azufre	SO ₂	µg/m ³
	5	Dióxido de nitrógeno	NO ₂	µg/m ³
	6	Ozono	O ₃	µg/m ³
	7	Monóxido de carbono	CO	mg/m ³
CONTAMINANTES NO CONVENCIONALES	8	Benceno	C ₆ H ₆	µg/m ³
	9	Plomo y sus compuestos	Pb	µg/m ³
	10	Cadmio	Cd	µg/m ³
	11	Mercurio	Hg	µg/m ³
	12	Hidrocarburos totales expresados como metano	HCT	µg/m ³
	13	Tolueno	C ₆ H ₅ CH ₃	µg/m ³
	14	Vanadio	V	µg/m ³

²⁹ Variables del Sub-Sistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) y procedimientos para validar la información generada por las redes de calidad del aire. IDEAM, 2006

VARIABLE			NOMBRE	UNIDADES
GENERADORES DE OLORES	15	Acetaldehído	C ₂ H ₄ O	µg/m ³
	16	Ácido butírico	C ₄ H ₈ O ₂	µg/m ³
	17	Amoníaco	NH ₃	µg/m ³
	18	Clorofenol	C ₆ H ₅ Cl ₀	µg/m ³
	19	Dicloruro de azufre	SCL ₂	µg/m ³
	20	Etil mercaptano	C ₂ H ₅ SH	µg/m ³
	21	Etil acrilato	C ₅ H ₈ O ₂	µg/m ³
	22	Estireno	C ₈ H ₈	µg/m ³
	23	Mono-metil-amina	CH ₅ N	µg/m ³
	24	Metil mercaptano	CH ₃ SH	µg/m ³
	25	Nitrobenceno	C ₆ H ₅ NO ₂	µg/m ³
	26	Propil mercaptano	C ₃ H ₈ S	µg/m ³
	27	Butil mercaptano	C ₄ H ₁₀ S	µg/m ³
28	Sulfuro de dimetilo	C ₂ H ₅ S	µg/m ³	
29	Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	µg/m ³	

De acuerdo con lo anterior, las variables de calidad del aire, deberían ser divididas en tres grandes grupos: Contaminantes Criterio, Contaminantes no Convencionales y Contaminantes Generadores de Olores Ofensivos, de acuerdo con la Resolución 601 de 2006.

En caso que las unidades de medición sean diferentes a µg/m³ o mg/m³, y se presenten en ppm, es necesario realizar el proceso de conversión que se detalla más adelante y que se deduce a partir de la ecuación de estado del gas ideal.

Partiendo de la ecuación de estado del gas ideal (PV = nRT), se puede comprobar que a condiciones de referencia (1 atm de presión y temperatura en 298,15 K) 1 mol de cualquier sustancia gaseosa ocupa un volumen igual a 24,4 litros.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \Rightarrow \frac{n}{V} = \frac{P}{R \cdot T}$$

Donde:

P: Presión a condiciones estándar o de referencia (1 atm ≈ 760 mm Hg ≈ 101325 Pa ≈ 101,325 KPa)

R: Constante de los gases ideales (8,314 m³.Pa/kmol.K ≈ 0,082 l.atm/mol.K)

T: Temperatura a condiciones estándar o de referencia (25 °C ≈ 298,15 K)

Reemplazando los valores de condiciones de referencia en la ecuación anterior, se tiene:

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{R \cdot T}$$

$$\frac{1 \text{ mol}}{V} = \frac{1 \text{ atm}}{(0,0821 \cdot \text{atm/mol} \cdot \text{K}) \cdot (298 \text{ K})} = \frac{1 \text{ mol}}{24,4483 \text{ l}}$$

Por lo anterior, para aquellos contaminantes que la normatividad colombiana vigente establezca sean reportados en ppm o en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, es necesario realizar la respectiva conversi3n empleando el peso molecular de la sustancia involucrada (Ver Tabla 18).

$$C \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = \frac{C[\text{ppm}] \cdot PM[\text{Kg/Kmol}]}{24,45[\text{m}^3/\text{Kmol}]} \cdot 10^3 \left[\frac{\text{g}}{\text{Kg}} \right]$$

$$C \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = \frac{C[\text{ppm}] \cdot PM}{24,45} \cdot 10^3$$

Cuando sea necesario, los valores en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se calculan a partir de los valores en partes por mill3n

Todas las variables de calidad del aire utilizan microgramos por metro c3bico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) como unidad de medida, exceptuando el mon3xido de carbono que emplea miligramos por metro c3bico (mg/m^3). Como criterio de estandarizaci3n de estas medidas y espec3ficamente del $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no se deben utilizar espacios, ni may3sculas, ni sub3ndices, y el s3mbolo μ , se debe obtener insertando el s3mbolo en la plantilla texto normal (Tecla ALT + 0181).

Tabla 18. Pesos moleculares de algunas sustancias contaminantes

CONTAMINANTE	PESO MOLECULAR (g/mol) 3 (Kg/Kmol)
Di3xido de azufre (SO ₂)	64.0580
Mon3xido de nitr3geno (NO)	30.0060
Di3xido de nitr3geno (NO ₂)	46.0050
Ozono (O ₃)	47.9970
Mon3xido de carbono (CO)	28.0100
Acetaldeh3do (C ₂ H ₄ O)	44.0530
3cido But3rico (C ₄ H ₈ O ₂)	88.1060
Amon3aco (NH ₃)	17.0310
Clorofenol (C ₂ H ₅ ClO)	80.5140
Dicloruro de azufre (SCL ₂)	102.9600
Etil mercaptano (C ₂ H ₅ SH)	62.1800
Etil acrilato (C ₅ H ₈ O ₂)	100.1170
Estireno (C ₈ H ₈)	104.1520
Mono-metil-amina (CH ₅ N)	31.0580
Metil mercaptano (CH ₃ SH)	48.1030
Nitrobenceno (C ₆ H ₅ NO ₂)	123.1110
Propil mercaptano (C ₃ H ₇ S)	76.1570
Butil mercaptano (C ₄ H ₁₀ S)	90.1840

CONTAMINANTE	PESO MOLECULAR (g/mol) ó (Kg/Kmol)
Sulfuro de dimetilo (C ₂ H ₆ S)	62.1300
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	34.0760

Los sistemas automáticos para la medición de la calidad del aire tienen la posibilidad de generar datos cada diez minutos; sin embargo, por la gran cantidad de información a almacenar en el SISAIRE y el tipo de análisis a realizar, no es necesario contar con información de tan cortos periodos de tiempo. Se recomienda entonces para los sistemas automáticos de medición emplear promedios horarios.

En este sentido, es importante aclarar que los datos comprendidos entre una hora y la siguiente, deberán corresponder a los de ésta última. Por ejemplo, para los datos tomados entre las 3:00 y las 4:00 p.m. el reporte que haga la autoridad ambiental corresponderá al de las 4:00 p.m.

7.3.1.2. Manejo y presentación de las variables de meteorología

Las variables meteorológicas registradas por cada red dependen del sistema de vigilancia de calidad del aire (SVCA) de la población o región. En la Tabla 19 se presentan las variables meteorológicas, su nombre y las unidades en las cuales deben ser reportadas. Muchas de estas variables no son medidas en los SVCA, sin embargo, se incluyen todas las posibles variables que mide el IDEAM con el fin de tener opciones predefinidas en caso de querer implementarse en un futuro.

Tabla 19. Nombres y unidades de variables de meteorología

VARIABLE	NOMBRE	UNIDADES
Precipitación sólida	PSólida	mm
Temperatura y humedad del viento a 10 cm	T/HAire10	° C/%
Temperatura del viento a 10 cm	Taire10	° C
Humedad del viento a 10 cm	HAire10	%
Temperatura y humedad del viento a 2 m	T/HAire200	° C/%
Temperatura del viento a 2 m	Taire200	° C
Humedad del viento a 2 m	HAire200	%
Temperatura del viento a diferente altura	Taire≠h	° C
Humedad del viento a diferente altura	HAire≠h	%
Radiación global	Rglobal	W/m ²
Radiación visible	Rvisible	μm/m ² s
Dirección y velocidad del viento	D/Vviento	Grados/m/s
Dirección del viento	DViento	Grados
Velocidad del viento	VViento	m/s
Temperatura del suelo	TSuelo	° C
Presión atmosférica	P	hPa
Precipitación líquida	PLíquida	mm
Radiación ultravioleta	RUVb	W/m ²
Radiación difusa	RDif	W/m ²
Temperatura de capa de mezclado	TCM	° C
Brillo solar	BrS	h ³⁰
Temperatura y humedad del suelo a 10 cm	T/HSuelo10	° C/%
Temperatura y humedad del suelo a 30 cm	T/HSuelo30	° C/%
Temperatura y humedad del suelo a 50 cm	T/HSuelo50	° C/%
Evaporación	Evap	mm

³⁰ Expresada como horas de sol al día

Al igual que las variables de calidad del aire de los sistemas automáticos de medición, las variables meteorológicas deberán ser reportadas cada hora, de tal manera que el SISAIRE obtenga información horaria, sin que esto signifique que los procesos de transmisión de datos entre la autoridad ambiental y el IDEAM sean horarios.

7.3.2. MANEJO ESTADÍSTICO DE DATOS

Una vez han sido validados los datos obtenidos por los equipos de monitoreo de calidad de aire y se haya comprobado su confiabilidad, se procede a realizar un tratamiento estadístico para elaborar resúmenes y generar los reportes.

Los reportes de calidad del aire deben cumplir con ciertos requisitos mínimos en cuanto a cantidad de datos presentados, cálculos, análisis y comparación con la norma nacional de acuerdo con la Resolución 601 del 4 de abril de 2006 o la que la adicione, modifique o sustituya. En esta sección se presentarán las metodologías para estimar los parámetros estadísticos requeridos.

En caso de que el porcentaje de información perdida iguale o supere el 25% no podrán realizarse los cálculos de los valores promedio para el período de tiempo a evaluar. Datos no válidos no podrán ser ingresados en las hojas de cálculo para el tratamiento de la información.

7.3.2.1. Cálculo de los promedios en el tiempo

El cálculo de los promedios en el tiempo de los datos de vigilancia debe ajustarse a las siguientes definiciones:

- Se define una “hora” como el periodo de sesenta minutos transcurridos “inmediatamente antes” de la hora reportada, es decir los datos de vigilancia correspondientes a las 7 a.m. son los recolectados desde las 6:01 a.m. a las 7:00 a.m. Esta definición se justifica por la necesidad de correspondencia entre los datos de vigilancia de calidad del aire y los datos meteorológicos. Tal definición ha sido establecida de acuerdo con los lineamientos de la Organización Meteorológica Mundial y está basada en el razonamiento de que la hora reportada solo puede cubrir eventos que ya han sucedido. Algunas organizaciones internacionales definen la hora como el tiempo transcurrido después de la hora reportada y reconocen que este enfoque requiere de un esfuerzo adicional al momento de compaginar las mediciones con los datos meteorológicos. El IDEAM, ente encargado de recopilar la información sobre mediciones de calidad del aire, requiere que el formato remitido por las entidades que realizan la vigilancia utilice el esquema de “hora antes”.
- El día se define como el periodo de 24 horas transcurrido entre las 00:01 y las 24:00, donde 00:01 es el primer minuto del día, después de la media noche. Es decir, en un día se obtendrán 24 promedios horarios desde la 1 que es la primera hora del día, hasta las 24 que es la última. Ésta definición es fundamental cuando se quiere calcular promedios diarios. La semana, el mes, y el año corresponden a la definición universal, del período que sigue inmediatamente al momento reportado; es decir, la semana comienza en minuto 00:01 del lunes y termina en el minuto 24:00 del domingo. El mes y el año se ajustan a los períodos de tiempo reportados por el calendario.

Los promedios corridos (medias móviles) deben corresponder al enfoque del tiempo que precede el reportado, ya sean de una hora, tres horas, ocho horas, 1 día, 1 semana, 1 mes, 1 año. Es importante mencionar que las medias móviles menores a 24 horas deben utilizar información únicamente del día que se quiere reportar.

7.3.2.2. Brechas de datos

Ningún tipo de vigilancia entrega datos las 24 horas del día durante los 7 días a la semana. Siempre existirán brechas en el conjunto de datos, algunas causadas deliberadamente como las de las calibraciones, otras inevitables y fortuitas como las ocasionadas por cortes en la energía eléctrica, fallas de los equipos, etc. A pesar de la experiencia y de la alta inversión, es difícil acercarse a un 95% de recolección de datos válidos.

Nunca se debe interpolar o extrapolar datos brutos para completar estas brechas, a menos que se conozcan perfectamente las tendencias en estos periodos y puedan justificarse. En general, cuando se pierde el 25 % o más de los datos de un periodo a promediar, debe descartarse este periodo y no calcularse, ni reportarse valor alguno para el mismo, al menos que se cumplan los criterios establecidos en este protocolo para el reporte de información.

Los objetivos de calidad de los datos deben establecer claramente el porcentaje de recuperación de datos y si deben ser contabilizados los períodos de calibración como pérdidas.

El programa de AC debe asegurar que los códigos reportados durante los períodos de calibración, o durante las fallas de los equipos, que en algunos sistemas son “9999”, se excluyan del cálculo de los promedios, desde el primer nivel de validación, donde además debe introducirse un metadato que explique la razón por la cual los datos son invalidados.

7.3.2.3. Interpolación y ajuste

Aunque no se recomienda interpolar datos brutos, a veces los datos validados pueden ser interpolados. Por ejemplo, cuando van a ser alimentados a un modelo, no deben tener brechas para que el modelo pueda correr. Existen técnicas estadísticas sofisticadas para realizar estas interpolaciones (ajuste de curvas, análisis de tendencias, filtrado selectivo de frecuencias, entre otras), pero la más adecuada es una simple regresión lineal. Por recomendación heurística no deben realizarse interpolaciones en brechas de más de 1% de período promediado.

En algunas ocasiones puede hacerse una excepción cuando existen obvias y justificables tendencias, como las presentadas en algunos puntos de vigilancia en el comportamiento diario de contaminantes como el CO, asociadas a los patrones de tránsito de fuentes móviles. En tales casos, se obtienen distribuciones bien definidas de concentraciones horarias a través del día, con base en las cuales pueden interpolarse los valores faltantes de otros días en los cuales se cuenta sólo con los puntos máximos y mínimos que usualmente se presentan a la misma hora del día.

Al interpolar los datos se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La naturaleza del contaminante.
- Entendimiento de las condiciones atmosféricas presentes y su influencia sobre la dispersión del contaminante.
- Experiencias con tendencias y ciclos diarios de emisiones y meteorológicos.
- Los periodos relevantes a promediar.
- El programa de AC debe encargarse de evaluar el desempeño del proceso y del personal de validación de datos y de calcular los indicadores que antes se han establecido para determinar si se han cumplido los objetivos de calidad de los datos.

7.3.2.4. Promedio aritmético

Promedio de todos los “n” datos recolectados en determinado período de tiempo.

$$(C_{prom})_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, n;$$

Donde:

$(C_{prom})_j$: Concentración promedio del período de tiempo j

$\sum_{i=1}^n C_i$: Suma de los “ n ” datos de concentración del contaminante i obtenida en el período de tiempo j

n : Cantidad de datos obtenidos en el período de tiempo j

7.3.2.5. Promedio geométrico

Antilogaritmo de la media aritmética de los logaritmos de los valores observados. También puede expresarse como la raíz enésima del producto de los “ n ” valores observados. $x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_n$ ³¹.

$$\log(C_{prom_geom})_j = \frac{\sum_{i=1}^n \log(C_i)}{n} \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, n;$$

$$(C_{prom_geom})_j = 10^{\left[\frac{\sum_{i=1}^n \log(C_i)}{n} \right]}$$

Donde:

$(C_{prom_geom})_j$: Promedio geométrico de concentración para un intervalo de tiempo j

$\sum_{i=1}^n \log(C_i)$: Suma de los n logaritmos de los valores de concentración del contaminante i

$10^{\left[\frac{\sum_{i=1}^n \log(C_i)}{n} \right]}$: Antilogaritmo del promedio de los logaritmos para los “ n ” valores de concentración del contaminante i .

Este promedio solo es empleado para la estimación de los valores medios de PST en determinado intervalo de tiempo.

7.3.2.6. Concentración máxima por hora

Se toma el valor máximo para cada una de las horas del día contemplando la información disponible de todo el año para cada estación de vigilancia. Es importante mencionar que la concentración máxima por hora debe reportarse para cada día, usando solamente la información generada durante ese día.

³¹ Diccionario Estadístico del Data Mining Institute, S.L. Madrid, España; [on line]: <http://www.estadistico.com/dic.html?p=1607>

7.3.2.7. Estimación de la media móvil

Para definir una media móvil, se debe primero comprender el significado de serie temporal o serie cronológica. Una serie temporal o cronológica es un conjunto de datos cuyos valores representan observaciones de un fenómeno, uniformemente espaciadas a lo largo del tiempo. Bajo este concepto los datos reportados por los equipos de monitoreo de calidad de aire, corresponden a series cronológicas o temporales que representan la concentración de determinado tipo de contaminante, medida cada cierto intervalo de tiempo.

La media móvil es el promedio de un valor de la serie y los que le rodean. Las medias móviles se utilizan para suavizar las series cronológicas, es decir, para reducir las fluctuaciones en las series de datos³².

En el caso que se deseen calcular medias móviles de por ejemplo ocho (8) horas, para un conjunto de datos de calidad de aire, el procedimiento sería tomar el primer conjunto de ocho datos y calcular su valor promedio, por ejemplo, los datos tomados entre las 00:00 y las 07:00 horas. Luego se procede a calcular el valor promedio para los datos correspondientes a las horas 01:00 hasta las 08:00, el tercer valor calculado de la media móvil corresponderá al promedio del grupo de datos reportados para las horas comprendidas entre las 02:00 hasta las 09:00 y así sucesivamente para todo el conjunto de datos que se tengan y que se vayan a evaluar. En la Figura 40 se presenta una ilustración del cálculo de la media móvil de 8 horas.

El procedimiento de cálculo de la media móvil debe seguirse para todos los conjuntos de datos que conformen el período al que se esté haciendo referencia; es decir, si se desea realizar un informe trimestral, se deberá contar con datos válidos registrados por la estación para cierto contaminante durante los tres meses que hacen parte del informe.

En la Tabla 20 se reportan datos tabulados de ozono ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), durante los días 2 y 3 de Marzo de 2006, reportados por una de las estaciones de monitoreo de calidad de aire en el país y a partir de ellos se realizan los respectivos de cálculos de la media móvil (la temperatura media de la ciudad de la cual se tomaron los datos es de 24,42 °C y la presión atmosférica es 90,10 KPa).

Como se puede observar en la Tabla 20, el primer cálculo para la media móvil de ocho horas, que corresponde al ejemplo dado, sólo se puede obtener una vez se cuente con ocho datos consecutivos de concentración, pertenecientes al mismo día. Ahora bien, si lo que se requiere es el cálculo de la media móvil de tres horas, se tomarán grupos de tres datos, empleando los mismos valores anteriores. Una ilustración del cálculo se muestra en la Figura 41.

Cabe anotar, que los datos empleados en los cálculos deben haber sido previamente validados. En el caso de presentarse datos inválidos dentro de la serie de tiempo, estos deben estar primeramente identificados (siguiendo el procedimiento indicado en la sección de validación de datos de este documento) y no deberán ser incluidos dentro del cálculo de ninguna de las medias móviles; además, debe aplicarse el parámetro que para calcular este parámetro estadístico mínimo en cada grupo de datos debe contarse con el 75% de información válida. Si la cantidad de datos invalidados es superior a la cuarta parte de la cantidad total de datos, entonces para ese grupo de datos no debe calcularse la media móvil, ni establecer algún valor por extrapolación o interpolación para compararlo con la norma (ver Figura 42).

³² Diccionario Estadístico del Data Mining Institute, S.L. Madrid, España; [on line]: <http://www.estadistico.com/dic.html?p=613>

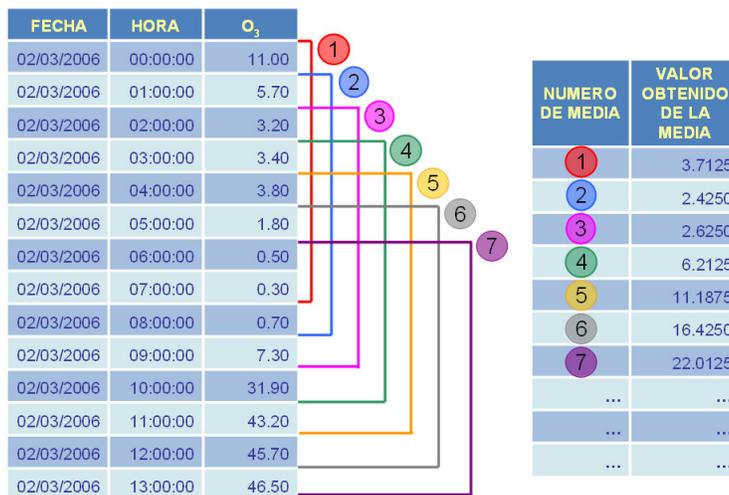


Figura 40. Ejemplo de metodología para la estimación de la media móvil para 8 horas de un conjunto de datos

Tabla 20. Datos de concentración de ozono y resultados de los cálculos de la media móvil para dichos datos

No. DATO	FECHA	HORA	DATO HORARIO O ₃ (µg/m ³)	MEDIA MÓVIL (µg/m ³)	MEDIA MOVIL (Cond. Estándar) (µg/m ³)	NORMA 8 HORAS (µg/m ³)
1	02/03/2006	00:00:00	11.00	---	---	80.00
2		01:00:00	5.70	---	---	80.00
3		02:00:00	3.20	---	---	80.00
4		03:00:00	3.40	---	---	80.00
5		04:00:00	3.80	---	---	80.00
6		05:00:00	1.80	---	---	80.00
7		06:00:00	0.50	---	---	80.00
8		07:00:00	0.30	3.71250	4.16669	80.00
9		08:00:00	0.70	2.42500	2.72168	80.00
10		09:00:00	7.30	2.62500	2.94615	80.00
11		10:00:00	31.90	6.21250	6.97255	80.00
12		11:00:00	43.20	11.18750	12.55620	80.00
13		12:00:00	45.70	16.42500	18.43446	80.00
14		13:00:00	46.50	22.01250	24.70554	80.00
15		14:00:00	61.10	29.58750	33.20728	80.00
16		15:00:00	67.70	38.01250	42.66301	80.00
17		16:00:00	44.40	43.47500	48.79380	80.00
18		17:00:00	21.40	45.23750	50.77192	80.00
19		18:00:00	14.30	43.03750	48.30277	80.00
20		19:00:00	9.80	38.86250	43.61700	80.00
21		20:00:00	6.10	33.91250	38.06141	80.00
22		21:00:00	4.60	28.67500	32.18314	80.00
23		22:00:00	3.90	21.52500	24.15840	80.00
24		23:00:00	5.20	13.71250	15.39011	80.00
25	03/03/2006	00:00:00	2.40	8.46250	9.49781	80.00
26		01:00:00	2.50	6.10000	6.84628	80.00
27		02:00:00	4.00	4.81250	5.40127	80.00
28		03:00:00	3.70	4.05000	4.54548	80.00
29		04:00:00	2.80	3.63750	4.08252	80.00
30		05:00:00	1.80	3.28750	3.68970	80.00

No. DATO	FECHA	HORA	DATO HORARIO O ₃ (µg/m ³)	MEDIA MÓVIL (µg/m ³)	MEDIA MÓVIL (Cond. Estándar) (µg/m ³)	NORMA 8 HORAS (µg/m ³)
31		06:00:00	2.30	3.08750	3.46523	80.00
32		07:00:00	0.40	2.48750	2.79182	80.00
33		08:00:00	0.30	2.22500	2.49721	80.00
34		09:00:00	0.90	2.02500	2.27274	80.00
35		10:00:00	4.80	2.12500	2.38498	80.00
36		11:00:00	37.40	6.33750	7.11284	80.00
37		12:00:00	85.10	16.62500	18.65893	80.00
38		13:00:00	94.70	28.23750	31.69212	80.00
39		14:00:00	42.70	33.28750	37.35994	80.00
40		15:00:00	23.50	36.17500	40.60070	80.00
41		16:00:00	19.30	38.55000	43.26626	80.00
42		17:00:00	16.20	40.46250	45.41274	80.00
43		18:00:00	10.10	41.12500	46.15629	80.00
44		19:00:00	6.00	37.20000	41.75110	80.00
45		20:00:00	3.30	26.97500	30.27516	80.00
46		21:00:00	2.30	15.42500	17.31212	80.00
47		22:00:00	1.20	10.23750	11.48997	80.00
48		23:00:00	0.60	7.37500	8.27727	80.00
...	80.00

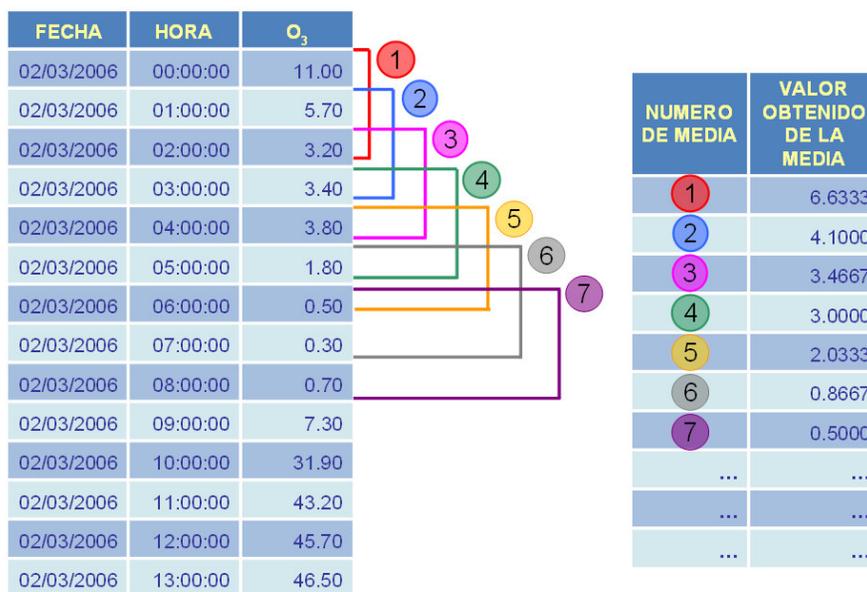
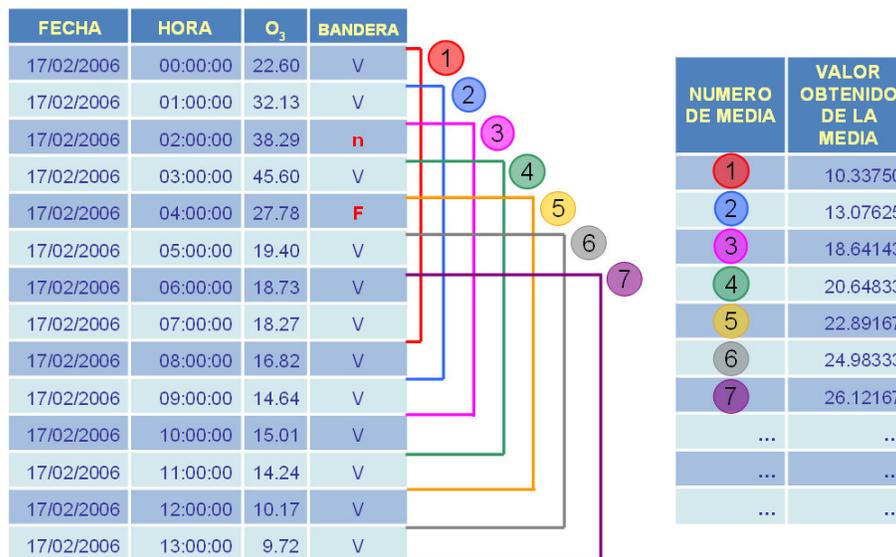


Figura 41. Ejemplo de metodología para la estimación de la media móvil para 3 horas de un conjunto de datos



SIGNIFICADO DE LAS BANDERAS

V: Dato válido F: Falla en el analizador n: tamaño de muestra insuficiente

Figura 42. Media móvil de ocho horas de series temporales con datos inválidos

De los datos de concentración de ozono que se presentan en la Figura 42, existen dos datos dentro de dicha serie temporal que su validez ha sido rechazada durante el proceso de manejo y validación de la información obtenida por cada uno de los equipos que conforman las estaciones; los datos corresponden a las 2:00 y a las 4:00 a.m. De acuerdo con el procedimiento de cálculo de medias móviles, a los tres primeros grupos de ocho horas se les estimaría la media sin incluir esos dos datos. Es decir el promedio para esos tres casos debe realizarse sólo con seis datos. Para los grupos de datos 4 y 5, el promedio será calculado omitiendo el dato de las 4:00 a.m. y por lo tanto solo incluirá siete valores. Sin embargo, y a pesar de existir en la serie temporal presentada en la Figura 42 dos datos no válidos, es posible estimar para todos los casos la media móvil de ocho horas, ya que se alcanza a cumplir que por lo menos el 75% de los datos de cada uno de los grupos corresponden a datos válidos.

En general, la media móvil puede ser calculada para grupos de series de datos de tres (3) horas, ocho (8) horas, veinticuatro (24) horas (a partir de datos horarios) y un año (a partir de datos diarios), para todo contaminante medido en cualquier estación de monitoreo de calidad de aire.

7.3.2.8. Comparación de los valores de concentración con la norma

Un objetivo fundamental de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire, es verificar el cumplimiento de los niveles de concentración de contaminantes acorde con la norma nacional de calidad del aire o nivel de inmisión vigente que regule la materia. A continuación se presenta una metodología tanto para el cálculo de las concentraciones a condiciones de referencia (Temperatura: 298,15 K y Presión: 760 mmHg ≈ 101.325 Pa ≈ 101,325 KPa) a partir de los valores promedios horarios de concentración, como de la estimación de los promedios para cada contaminante partiendo de los datos obtenidos por los equipos de medición de los SVCA y finalmente la presentación gráfica de los resultados.

La Resolución 601 de 2006 establece en su Capítulo II, artículo 4º los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio y los tiempos de exposición para cada contaminante. En la Tabla 21 se muestra en resumen por periodo, en los cuales cada contaminante debe ser comparado.

Tabla 21. Límites máximos permisibles por contaminante criterio según Resolución 601 de 2006

PERIODO DE TIEMPO	CONTAMINANTE
Anual	PST PM10 PM2.5 SO ₂ NO ₂
24 horas	PST PM10 PM2.5 SO ₂ NO ₂
8 horas	O ₃ CO
3 horas	SO ₂
1 hora	NO ₂ O ₃ CO

Para comparar los datos de calidad de aire obtenidos de las mediciones con la norma, debe seguirse un procedimiento básico, similar para todos los posibles casos de comparación. De forma general el procedimiento que se sigue es el siguiente:

Con los datos ya validados y organizados por orden cronológico, se calculará inicialmente el valor promedio horario (promedio de todos los datos recolectados y válidos obtenidos en una hora). En la Tabla 20 se encuentra un ejemplo de datos horarios para ozono recolectados en dos días de monitoreo.

Una vez se tienen estimados los valores de concentración horaria del contaminante, se procede con el cálculo de la media móvil (ver procedimiento descrito en la sección 7.3.2.7). El periodo de tiempo para la estimación de la media móvil se definirá de acuerdo con la comparación que se requiera hacer y según lo estipulado en la Resolución 601 de 2006 (ver Tabla 21) o la norma que la adicione, modifique o sustituya. Para el ejemplo presentado en la Tabla 20, se está realizando la evaluación del cumplimiento de la norma de 8 horas de la concentración de ozono y por este motivo la media móvil es calculada con grupos de ocho datos horarios, cabe anotar que este promedio es calculado a las condiciones propias de la ciudad a la que pertenecen los datos.

Debido a que las normas establecidas en la legislación colombiana se encuentran definidas a condiciones de referencia, es necesario expresar cada dato obtenido a estas mismas condiciones de referencia. En ningún momento es correcto expresar la norma nacional (condiciones de referencia) a norma local (condiciones propias de cada ciudad), para realizar la comparación.

Para expresar los datos horarios a condiciones de referencia y establecer la comparación con la norma, se parte de la ecuación de gas ideal y se establecen las correspondientes relaciones, esto es:

$$PV = nRT \quad \text{Ecuación de gas ideal}$$

Donde:

P: Presión

V: Volumen

n: Número de moles

R: Constante de los gases ideales (8.314 m³.Pa/Kmol.K ≈ 0.082 l.atm/mol.K)

T: Temperatura (siempre expresada en grados Kelvin, K)

A través de la ecuación del gas ideal, puede determinarse la concentración en función de la presión, la temperatura y el peso molecular de la sustancia de la que se desea cuantificar su presencia en el gas, de la siguiente forma:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$P \cdot V = \frac{m \cdot R \cdot T}{PM}$$

$$P = \frac{m}{V} \cdot \frac{R \cdot T}{PM}; \text{ como } \frac{m}{V} = C$$

$$P = C \cdot \frac{R \cdot T}{PM}$$

$$C = \frac{P \cdot PM}{R \cdot T}$$

En esta serie de ecuaciones, se encuentran los siguientes términos:

m: Masa de la sustancia que se quiere determinar en el gas (Kg)

PM: Peso molecular de la sustancia a determinar (Kg/Kmol)

C: Concentración de la sustancia en el gas (Kg/m³ ó g/l)

Ahora bien, del tratamiento matemático anterior realizado a la ecuación del gas ideal, se llega a la conclusión que dependiendo del contaminante (de sus propiedades físicas como masa y peso molecular) y de las condiciones atmosféricas (presión y temperatura) se obtendrán determinados valores de concentración; por lo tanto es válido afirmar que la concentración del contaminante *i* a condiciones de referencia es igual al producto del peso molecular de dicho contaminante por la relación existente entre las condiciones estándar de presión y temperatura (P_{st}, T_{st}):

$$(C_i)_{st} = \frac{(P)_{st} \cdot PM_i}{R \cdot (T)_{st}}$$

Como los datos promedio de concentración que se obtienen del monitoreo de calidad de aire, corresponden a los valores de concentración de cada contaminante en particular obtenidos a las condiciones locales de presión y temperatura, y dichas condiciones son diferentes a las condiciones de referencia, entonces los datos que se obtienen en realidad de concentración corresponden a:

$$(C_i)_j = \frac{(P)_j \cdot PM_i}{R \cdot (T)_j}$$

Donde:

(C_i)_j: Concentración del contaminante *i* en la región o ciudad *j*

(P)_j: Presión en la región o ciudad *j*, es decir la condición local de presión

(T)_j: Temperatura en la región o ciudad *j*, es decir la condición local de temperatura

PM_i: Peso molecular del contaminante medido

R: Constante de los gases ideales (8.314 m3.Pa/kmol.K ≈ 0.082 l.atm/mol.K)

Concluyendo, los datos obtenidos se tienen referenciados a las condiciones locales de la región o ciudad para los cuales se realizó la medición; pero estos a su vez deben ser comparados con la

norma nacional, la cual se encuentra expresada a condiciones de referencia o condiciones estándar (760 mmHg de presión o 101.325 Pa o 101,325 KPa y a una temperatura de 298,15 K). Por tal razón, es necesario expresar los datos promedios obtenidos de la medición a valores promedios de concentración expresados a condiciones de referencia, lo cual se realiza de la siguiente forma:

$$\frac{(C_i)_{st}}{(C_i)_j} = \frac{\frac{(P)_{st} \cdot PM_i}{R \cdot (T)_{st}}}{\frac{(P)_j \cdot PM_i}{R \cdot (T)_j}} = \frac{(P)_{st} \cdot PM_i \cdot R \cdot (T)_j}{R \cdot (T)_{st} \cdot (P)_j \cdot PM_i}$$

Los datos obtenidos a condiciones locales ((C_i)_j) son expresados bajo condiciones de referencia, empleando la siguiente expresión:

$$(C_i)_{st} = \frac{(P)_{st} \cdot PM_i \cdot R \cdot (T)_j}{R \cdot (T)_{st} \cdot (P)_j \cdot PM_i} \cdot (C_i)_j$$

Finalmente, tan pronto se hayan expresado los datos promedio de concentración a condiciones de referencia, se procede a compararlos con la norma nacional para el periodo de tiempo estipulado. En el ejemplo presentado en la Tabla 20, se compara la norma para ocho (8) horas de ozono en µg/m³. Dicha comparación se visualiza mejor de manera gráfica y su construcción se muestra en la Figura 43.

En el ejemplo presentado (ver Tabla 20 y Figura 43) sólo se realizan los cálculos para dos días, pero como se mencionó antes, los días para los cuales se tomen datos, debe corresponder al tipo de informe que se vaya a realizar (semanal, mensual o trimestral). Para los informes anuales, la media móvil será calculada para intervalos de 24 horas o anual con las respectivas comparaciones con la norma nacional.

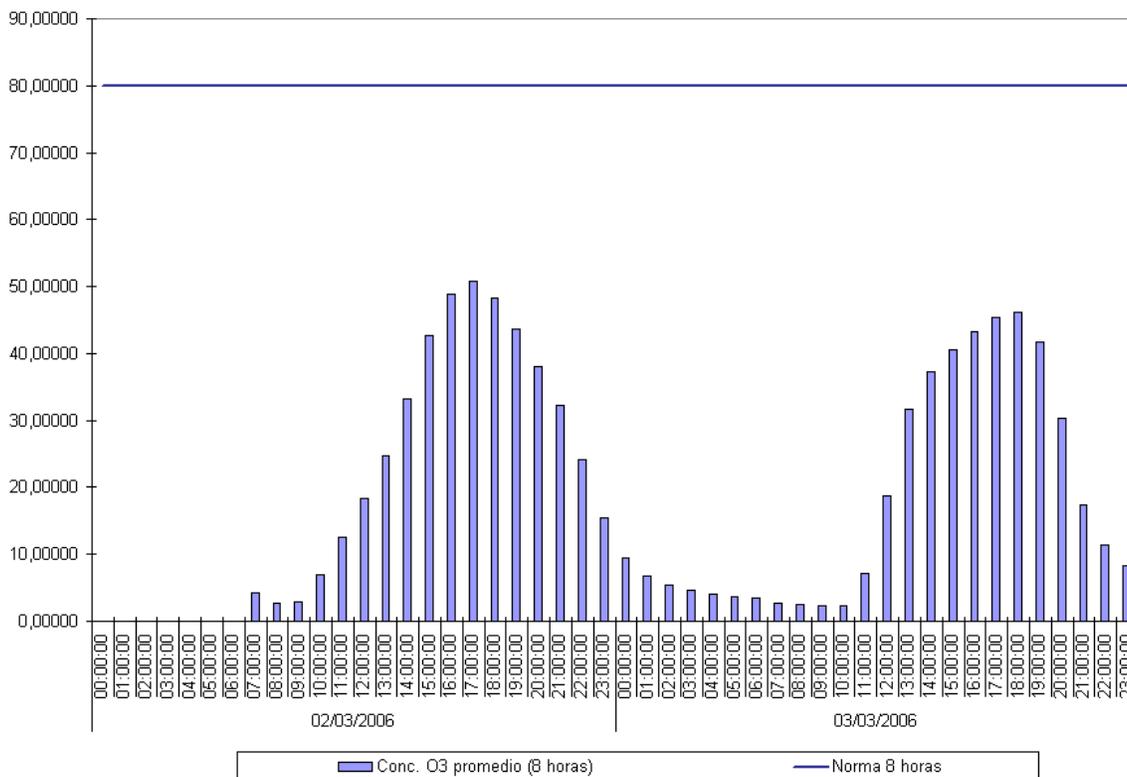


Figura 43. Diagrama de comparación de la concentración de contaminante con la norma de 8 horas

Comparación con la norma para PST

Al comparar los valores de concentración obtenidos en el monitoreo de partículas suspendidas totales (PST) con la norma nacional, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Para la comparación con la norma de 24 horas, debe estimarse el promedio para conjuntos de 24 datos horarios de un mismo día (sección 7.3.2.5); luego se debe realizar la respectiva conversión a condiciones de referencia y posteriormente comparar los valores obtenidos con el valor de la norma nacional. Este procedimiento solo podrá seguirse en caso de contar con equipos automáticos en donde se tengan, por lo menos, reportes horarios de concentración.
- Para la comparación con la norma anual, debe emplearse el promedio geométrico (sección 7.3.2.5) en vez del promedio aritmético. Los datos incluidos serán los promedios diarios de concentración, por tal motivo para hablar de media móvil debe contarse con datos históricos superiores a un año y anteriores al año para el que se desea realizar el informe. Esta comparación es posible realizarla tanto para estaciones manuales como para automáticas, haciendo la salvedad que la cantidad de datos obtenidos por los equipos manuales que operan cada tercer día durante el año no debe ser inferior a 91 datos (75% de los 121 datos que serían el total de mediciones posibles por muestreadores manuales cada tercer día) y que la cantidad de datos obtenidos a través de muestreo automático corresponderán a 274 datos, que corresponden al 75% de los 365 datos que se pueden obtener durante un año de monitoreo continuo.

Comparación con la norma para PM10

Para realizar la evaluación del cumplimiento de la norma nacional relacionado con los máximos niveles permisibles de PM10, se siguen las mismas pautas mencionadas anteriormente para PST, exceptuando que en vez de utilizar el promedio geométrico, se emplea el promedio aritmético

(ver sección 7.3.2.4), estableciendo como parámetro de comparación los valores correspondientes al PM10.

Comparación con la norma para SO₂

En la normatividad nacional existen tres parámetros de comparación para vigilar si se están cumpliendo con los niveles máximos permitidos de concentración de SO₂ en el aire, estos límites están definidos para tres (3) horas, veinticuatro (24) horas y anual. Las comparaciones con cada uno de estos límites deben realizarse teniendo presente las siguientes pautas:

- Para comparar los valores medios para grupos de datos de 3 horas en una serie cronológica de concentración de SO₂, inicialmente se debe estimar la media móvil de 3 horas siguiendo el procedimiento descrito en la sección 7.3.2.7 del presente documento, luego expresar los valores obtenidos a condiciones de referencia y luego proceder a compararlos con el valor de la norma nacional (750 µg/m³). La media móvil para los valores de concentración de SO₂, para cualquier intervalo de tiempo se calcula como un promedio aritmético. Este procedimiento solo es posible de efectuar si se cuenta con datos horarios de concentración, los cuales normalmente solo pueden ser obtenidos a través de métodos automáticos de medición. En todo caso, todos los datos utilizados deben pertenecer al día que se quiere reportar. Cuando se quiera presentar el promedio de 3 horas de un día se debe presentar el máximo promedio encontrado.
- Cuando se desea realizar la comparación de los valores medios registrados por los equipos de monitoreo de SO₂ en un SVCA con la norma de 24 horas, se realiza a través del promedio aritmético de los 24 datos horarios disponibles para un día. Esta comparación puede ser empleada en la elaboración de informes mensuales o trimestrales, siempre y cuando se cuente con la cantidad de datos suficientes para el período de tiempo al que se le plantea el análisis. Por requerir valores horarios de concentración de SO₂ este análisis puede desarrollarse para estaciones donde se cuente con equipos automáticos de medición.
- En la Resolución 601 de 2006 se establece la concentración anual de SO₂. Para efectos de comparar con la reglamentación vigente se debe utilizar el promedio aritmético de las concentraciones diarias obtenidas por los equipos de monitoreo (121 para manuales cada tercer día y 365 para automáticos).

Comparación con la norma para NO₂

En la Resolución 601 del año 2006, se establece la norma de calidad de aire o el valor máximo permisible de concentración de NO₂ para períodos de 1 hora, 24 horas y anual. Para los tres casos se plantea el cálculo de la media móvil empleando el promedio aritmético (ver sección 7.3.2.4) para conjuntos de datos de 24 horas o para el conjunto de datos de 365 o 121 datos dependiendo de si es el caso de comparación con la norma diaria o anual y de si se cuenta con equipos automáticos o manuales, respectivamente, siguiendo las siguientes pautas:

- Cuando se compara con la norma de 1 hora, el procedimiento se limita a tomar el valor promedio de cada hora, reportarlo a condiciones de referencia y compararlo con la norma nacional (se puede reportar solamente el máximo horario como dato horario del día). Este procedimiento solo puede realizarse si se cuenta con estaciones automáticas, debido a que a través de este tipo de analizadores es posible contar con resultados horarios e incluso en algunas ocasiones se tienen frecuencias de medición cada diez minutos.
- La norma de 24 horas de NO₂ es empleada como criterio de comparación con el promedio aritmético de los 24 valores horarios de concentración reportados por los equipos automáticos.
- Cuando se tienen datos de concentración equivalentes a un año de medición de NO₂, por cualquiera de los métodos de monitoreo de gases (manuales o automáticos), es posible realizar la comparación de los promedios anuales con la norma nacional anual. Es necesario tener en cuenta que si se desea estimar la media móvil para un año, mínimo se debe contar con reportes diarios de por lo menos un año anterior al que se desea analizar; esta aclaración es importante porque en caso de solo contar con datos de solo un año de monitoreo, no tiene

sentido hablar de media móvil, sino que solo se tendría un valor promedio anual de concentración para todos los datos de dicho año.

Comparación con la norma para O₃

La norma de calidad de aire, en relación con la concentración máxima permitida de ozono (O₃) en el aire en territorio nacional está definida para 1 hora y para 8 horas. En ambos casos se requiere que el monitoreo de dicho contaminante se realice a través de analizadores automáticos, debido a que solo a través de esta forma es posible obtener resultados de concentración horarios y en algunas situaciones hasta cada diez minutos. Se deben seguir las siguientes pautas:

- Los datos horarios de concentración reportados por el equipo son redefinidos a condiciones de referencia y posteriormente comparados con la norma nacional; en caso de contar con datos cada diez minutos, estos deben ser promediados a datos horarios empleando la media aritmética.
- Una vez se tengan los datos horarios de concentración de ozono, obtenidos a través del monitoreo automático, estos deben ser convertidos a condiciones de referencia (para lo cual previamente debe conocerse las condiciones locales de temperatura y presión) y finalmente se procede con el cálculo de la media móvil para grupos de 8 datos horarios (tal y como se mostró en la Figura 40 y Figura 42) y el mayor de estos valores debe ser comparado con la norma nacional para períodos de tiempo iguales a 8 horas.

Comparación con la norma para CO

En la Resolución 601 de 2006, se encuentran definidos los valores máximos permisibles de concentración en el aire de este contaminante para 1 y 8 horas. El procedimiento para realizar la comparación es similar al especificado para el ozono, pero teniendo en cuenta que los valores de la norma son diferentes para cada contaminante.

7.3.2.9. Cálculo del número de excedencias

Una excedencia se define como el evento en el cual los valores de concentración de un contaminante sobrepasan lo estipulado en la norma de calidad del aire. Por ejemplo, para la norma horaria de ozono debe contarse una excedencia por cada vez que el promedio de concentración de una hora sobrepase el valor establecido por la norma y totalizarse el número de veces por año. En este caso el número de excedencias debe reportarse como el “número de veces que la norma ha sido sobrepasada en un determinado año”. Es importante anotar que cuando se realice un análisis de excedencias en periodos anuales, se debe contabilizar solamente una excedencia por día, es decir, si todos los días del año evaluado se sobrepasa la norma por más de una hora, el número de excedencias será de 365.

Por otro lado, cuando se trata de promedios corridos (medias móviles), como en la norma de CO de 8 horas, debe contarse una excedencia por cada vez que el promedio de concentración de 8 horas sobrepase el valor establecido por la norma y totalizarse el número de veces por día. Para realizar el análisis por año, se debe realizar el análisis mencionado anteriormente.

En conclusión, los análisis reportados pueden ser: “el día X la norma horaria de CO fue sobrepasada durante 4 horas” o “el año X se tuvieron sobrepasos de la norma de O₃ horaria durante 250 de los 365 días”.

7.4. INDICADORES DE OPERACIÓN Y DESEMPEÑO DEL SVCA

Con el objeto de evaluar la operación de los equipos que conforman cada una de las estaciones de un SVCA y de su desempeño en general, es necesario determinar el porcentaje de captura de datos de los equipos y establecer parámetros de comparación para todas las estaciones en un periodo de

tiempo definido.

7.4.1. ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE CAPTURA DE DATOS

Para determinar el porcentaje de captura de datos es necesario establecer la cantidad máxima de datos que se pueden obtener en un periodo determinado y la cantidad de datos recolectados durante ese mismo periodo. Por ejemplo, un analizador de material particulado manual que mide la calidad del aire cada tercer día podría registrar máximo 121 datos por año. Si durante un año específico registra 90 datos, el porcentaje de captura sería de 74,4%.

$$\%Cap_datos = \frac{d}{N} \cdot 100$$

Donde:

%Cap_datos: Valor numérico que indica el desempeño del equipo, en relación con la cantidad de datos entregados a la central de información

d: Número total de datos reportados por el equipo durante el periodo de tiempo definido

N: Número de datos máximos que pudieron ser reportados en el periodo de tiempo definido

7.4.2. ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE DATOS VÁLIDOS

Existe también la posibilidad de que en las estaciones se tenga un porcentaje de captura de datos aceptable. Sin embargo, los valores registrados pueden no ser validados de acuerdo con los lineamientos presentados en la sección correspondiente a los procedimientos de validación de información generada por los analizadores. Por esta razón, es recomendable que en el momento de desarrollar la evaluación del SVCA, se defina un porcentaje que relacione la cantidad de datos aceptados (datos válidos) con la cantidad de datos capturados por la central de información.

$$\%Val_datos = \frac{V}{N} \cdot 100$$

Donde:

%Val_datos: Valor numérico que indica la confiabilidad del equipo, en relación con la cantidad de datos válidos entregados a la central de información

V: Número de datos aceptados como válidos y que pueden ser empleados en posteriores cálculos y análisis que realice el SVCA

N: Número de datos máximos que pudieron ser reportados en el periodo de tiempo definido

Tal como se ha mencionado en diversas ocasiones a lo largo de este documento, es necesario que el porcentaje de datos válidos empleados en la realización de los correspondientes cálculos de promedios, comparaciones con la norma de calidad de aire y estimación del número de excedencias; no sea inferior al 75%.

Partiendo de la cantidad de datos válidos obtenidos por el equipo analizador, es posible determinar el **porcentaje multianual** de operación para cada una de las estaciones con las que cuenta el SVCA (en caso de contar con el histórico de datos para un período no menor a dos años) e incluso el porcentaje del SVCA que reporte su desempeño anual.

Es prioritario comprender que el indicador multianual de operación de los equipos, debe ser

estimado para cada tipo de analizador presente en las estaciones, es decir, se estimará este porcentaje para equipos de PM10, para equipos de PST, para equipos de SO₂, para equipos de NO₂ y así sucesivamente para cada uno de los tipos de analizadores que miden los contaminantes del SVCA. Este porcentaje es calculado realizando la relación entre el total de datos válidos obtenidos por el equipo en los años de operación con la cantidad máxima de datos que en el mismo período de tiempo el equipo hubiese podido reportar, es decir:

$$\%Op_multianual = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \cdot 100$$

En donde:

%Op_multianual: Porcentaje multianual de operación del equipo

V_i: Cantidad de datos válidos reportados por el equipo durante los años considerados

N_i: Cantidad máxima de datos que podrían obtenerse por el equipo durante los años considerados

i: Año al que hace referencia

n: Cantidad de años que se están teniendo en cuenta para la estimación del indicador

A manera de ejemplo, se considera un SVCA que ha estado operando de manera intermitente durante los años 2002 a 2006. Este SVCA durante el período de tiempo descrito, ha contado en general con 12 estaciones de medición de calidad del aire (E₁, E₂, E₃,..., E₁₁, E₁₂). Las estaciones cuentan con equipos manuales de PST, PM10, SO₂ y NO₂. Ahora bien, analizando los datos históricos almacenados por el SVCA, se obtiene la siguiente información para PM10 (Ver Tabla 22).

Tabla 22. Disponibilidad de datos para calcular los promedios anuales en el SVCA estudiado

ESTACIÓN	AÑO								% OP_MULTIANUAL
	2002 *		2003		2004		2006		
	Datos	%Val_datos	Datos	%Val_datos	Datos	%Val_datos	Datos	%Val_datos	
E1	22	22.4	44	36.4			30	24.8	20.82
E2			52	43.0					11.28
E3			52	43.0	3	2.5			11.93
E4			15	12.4					3.25
E5			22	18.2					4.77
E6			16	13.2					3.47
E7			15	12.4	21	17.4			7.81
E8			23	19.0	22	18.2			9.76
E9							40	33.1	8.68
E10					20	16.5	40	33.1	13.02
E11			18	14.9	21	17.4			8.46
E12							9	7.4	1.95

* Teniendo en cuenta que en el año 2002 la operación de las estaciones inician en marzo, el máximo de datos posible es 98.

En la tabla anterior se observa que los porcentajes de datos válidos han sido estimados para cada estación de forma anual, teniendo en cuenta que como se trata de analizadores manuales de PM10, la cantidad máxima que pueden llegar a reportar en un período de tiempo igual a un año es 121 datos, medidos cada tercer día. Sin embargo, debido a que la operación del SVCA en el año 2002 inició en el mes de marzo, para dicho año, la cantidad máxima de datos posibles por reportar es 98.

Como se puede observar en la Tabla 22 la máxima disponibilidad de datos válidos es de 43%, lo que indica que no es posible calcular promedios anuales para comparar con las normas nacionales vigentes.

El porcentaje de operación multianual para cada equipo de PM10, de cada estación es calculado tomando la suma de los datos obtenidos por la estación cada año, y dividiéndolos por la suma del número máximo posible de datos por cada año. Para el caso de la estación E1 del SVCA que se menciona en el ejemplo, el porcentaje multianual es:

$$\%Op_multianual\ E1 = \frac{22 + 44 + 0 + 30}{98 + 121 + 121 + 121} \cdot 100 = \frac{96}{461} \cdot 100 = 20,82\%$$

El proceso se repite para las 12 estaciones que cuentan con el analizador del contaminante indicado.

Otro indicador que puede ser determinado para el SVCA y relacionado con la evaluación del desempeño del mismo, es el **porcentaje de operación anual del SVCA**, el cual es calculado a partir de la totalidad de los datos válidos recolectados durante un año, en todas las estaciones del SVCA, y la cantidad de datos que se deberían recoger en un año, empleando todas las estaciones del mismo SVCA que hayan operado durante el mismo periodo de tiempo. Esto podría expresarse matemáticamente como:

$$\%Op_anual_SVCA = \frac{\sum_{j=1}^m V_j}{\sum_{j=1}^m N_j} \cdot 100$$

En donde:

%Op_anual_SVCA: Porcentaje anual de desempeño del SVCA

V_j: Cantidad de datos válidos reportados por el equipo en cada una de las estaciones en un año.

N_j: Cantidad máxima de datos que podrían obtenerse por el equipo en cada una de las estaciones en un año

j: Estación a la que hace referencia

m: Cantidad de estaciones que operaron durante el año que se está considerando

De esta forma, el porcentaje de operación para el SVCA que está siendo considerado para el ejemplo de cálculo, en cuanto a la medición de PM10, durante el año 2003 se calcula de la siguiente manera (ver datos de la Tabla 22):

$$\%Op_anual_SVCA_{(2003)} = \frac{44 + 52 + 52 + 15 + 22 + 16 + 15 + 23 + 18}{121 + 121 + 121 + 121 + 121 + 121 + 121 + 121 + 121} \cdot 100$$

$$\%Op_anual_SVCA_{(2003)} = \frac{257}{1089} \cdot 100 = 23,60\%$$

Debido a que para el año 2003, en el ejemplo que se mencionó, funcionaban en nueve estaciones los analizadores de PM10 del mismo tipo, podría multiplicarse la cantidad máxima de datos que se obtendría por el equipo en el año (121) por el número de estaciones que operaron para ese mismo año. En caso que existieran en algunas de las estaciones consideradas analizadores del mismo contaminante pero con diferente funcionamiento y, que debido a esta diferencia, variara la cantidad del máximo número de datos posibles a obtener, entonces deberán sumarse las capacidades individuales de obtención de datos de cada equipo para obtener el número total de

valores que teóricamente pudieran obtenerse para dicho contaminante, en dicho año.

Estos cálculos de indicadores de operación aquí presentados, deben ser estimados, discriminando cada tipo de analizador y de contaminante.

7.4.3. CONSISTENCIA DE LOS DATOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DEL AIRE

Para evaluar la consistencia de los datos relacionados con calidad del aire, es recomendable elaborar diagramas de caja por contaminante y por tipo de promedio a analizar (horario, 3 horas, 8 horas, 24 horas, anual), identificar los datos clasificados como valores extremos o valores atípicos y buscar información adicional (metadata) que permita identificar las causas de la información detectada. En la Figura 44 se presenta un ejemplo de un diagrama de cajas. La elaboración de estos diagramas, permiten la realización del análisis de los datos para su validación.

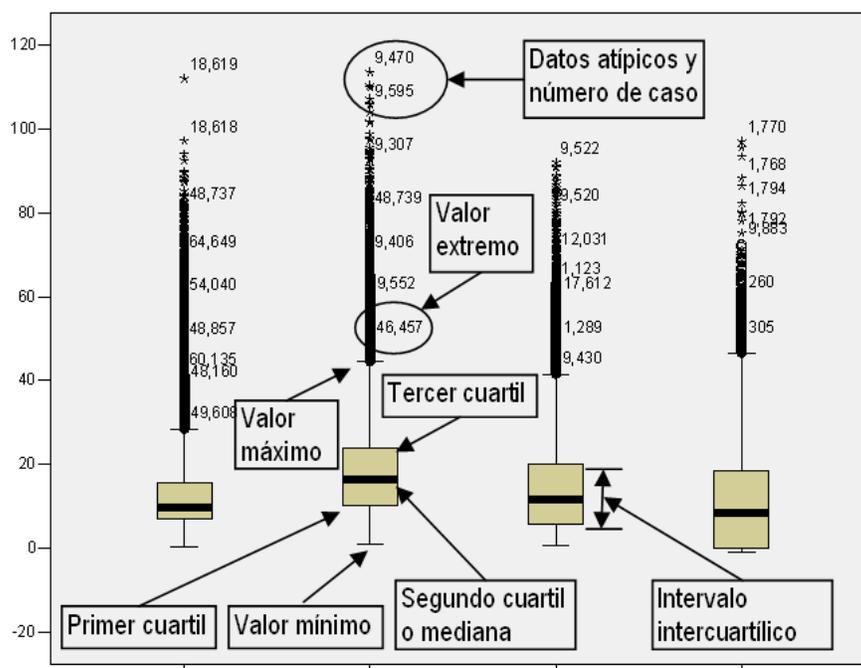


Figura 44. Descripción de un diagrama de caja

El diagrama de caja es una representación gráfica de varias estadísticas:

- El primer cuartil (valor por debajo del cual está el 25 % de los datos) representado por el borde inferior de la caja.
- La mediana como medida de tendencia central, correspondiente al segundo cuartil (valor por debajo del cual está el 50% de los datos) representada por la línea horizontal dentro de la caja.
- El tercer cuartil (valor por debajo del cual está el 75% de los datos) representado por el borde superior de la caja.
- El intervalo intercuartílico como medida de la dispersión, definido como la diferencia entre el tercer y primer cuartil, representado por la altura de la caja.
- El valor mínimo que corresponde al mínimo valor de los datos o, en caso de valores atípicos, a 1,5 distancias intercuartílicas, medidos hacia abajo desde la mediana.
- El valor máximo que corresponde al máximo valor de los datos o, en caso de valores atípicos, a

- 1,5 distancias intercuartílicas, medidos hacia arriba desde la mediana.
- Los valores extremos, que son los que se encuentran por encima de 1,5 y por debajo de 3 distancias intercuartílicas medidas desde la mediana, representados por un círculo.
- Los datos atípicos que se encuentran a más de tres distancias intercuartílicas medidos desde la mediana, representados por un asterisco.
- El número de caso que corresponde a la medición en la cual se encontró el valor extremo o el dato atípico.

Los percentiles son valores que dividen una distribución de frecuencias obtenida en una medición en cien partes ordenadas y de igual área; de forma similar se definen los deciles y los cuartiles ya que corresponden a dividir una distribución de frecuencias en 10 partes iguales (10, 20, 30, ..., 90, 100) y en 4 partes iguales (25, 50, 75 y 100), respectivamente.

Teniendo en cuenta que cada diagrama de caja corresponde a la representación gráfica del monitoreo de algún contaminante específico para determinado intervalo de tiempo, sería adecuado que la lectura de los valores de concentraciones se realizará en el eje vertical del diagrama y que cada bloque o caja corresponda a un intervalo de tiempo definido.

Es posible que en algunos casos no desee implementar esta metodología para el análisis de la consistencia de datos, sin embargo, en caso de no emplear los diagramas de caja como herramientas para desarrollar el análisis de la consistencia de datos, sería necesario calcular para cada conjunto de valores los siguientes valores estadísticos: máximo, mínimo, media, mediana, percentil 25, percentil 75 e indicar los valores atípicos.

De igual manera, es posible realizar gráficas de series de tiempo que permitan identificar valores atípicos en ciertas horas del día (por ejemplo picos de ozono en las noches). En la Figura 45 se presenta una gráfica de series de tiempo donde se observa esta situación.

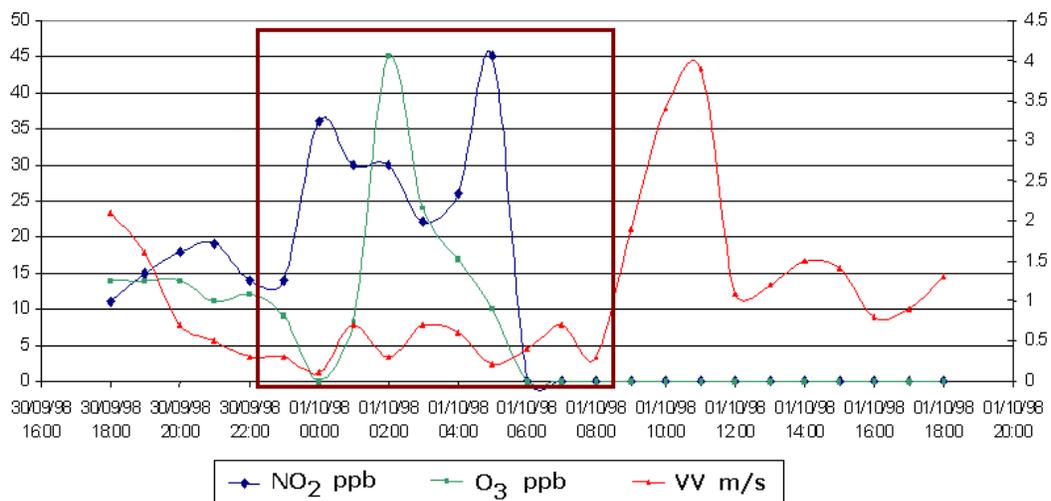


Figura 45. Gráfica de series de tiempo donde se validan picos de O₃ en horas de la madrugada

Al comparar diferentes contaminantes medidos en una misma estación se pueden observar inconsistencias en los datos validados como por ejemplo valores de PM₁₀ mayores a los de PST o valores de NO₂ y NO que no corresponden a la cinética química establecida entre estos contaminantes (valores de NO₂ constantes ante valores de NO muy variables).

También es importante determinar la hora de inicio y finalización de las mediciones similares realizadas para determinar si son comparables. Por ejemplo, que los promedios de 24 horas de las mediciones de PM₁₀ en una misma estación inicien y terminen a la misma hora. Se requiere que las

mediciones de 24 horas inicien a medianoche.

7.4.4. CONSISTENCIA DE LOS DATOS RELACIONADOS CON LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS

Siguiendo la misma metodología usada para evaluar la consistencia de los datos relacionados con la calidad del aire, es posible evaluar los datos correspondientes a las variables meteorológicas. Por ejemplo, es posible identificar valores de radiación solar que superen la máxima emisión que se pueda recibir del sol o valores de velocidad del viento, o temperatura, por fuera de los rangos normales sin información adicional de los datos.

Es importante determinar la coherencia en el tiempo por comparación de los diferentes parámetros con los obtenidos en una observación precedente o por la verificación de la tasa de cambio en elementos cuantitativos, la coherencia interna a través de la verificación entre sí de los distintos parámetros, como por ejemplo, dirección del viento con velocidad del viento, tasa de descenso en los perfiles de la temperatura vertical.

Coherencia en relación con los límites máximos y mínimos establecidos estadísticamente basados en datos históricos y coherencia con relación a los límites físicos o absolutos (en función de la zona, la estación, el mes, ecuaciones físicas, entre otros). Entre los límites físicos se pueden tomar: la temperatura del aire debe ser igual o mayor a la temperatura del punto de rocío derivada de la humedad relativa mediante la fórmula psicrométrica, comparación de la presión de la estación con la fórmula hipsométrica, comparación del gradiente observado con el gradiente adiabático seco en la atmósfera libre o pruebas de coherencia física entre parámetros interdependientes, entre otros.

7.5. GENERACIÓN DE REPORTEES

Una base de datos final y validada sobre calidad del aire es por sí sola, es de utilidad limitada. Para que se 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 publicar. 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, en el Manual de Diseño de este protocolo, se encuentra estipulada la periodicidad de generación de reportes para cada tipo de SVCA. Los formatos apropiados para este propósito se pueden diseñar fácilmente (véase por ejemplo, BROUGHTON et al³³).

Un reporte más regular de datos, por día u hora, puede ser apropiado para algunos objetivos del SVCA (por ejemplo, los sistemas de alerta), aunque en tales casos, se debe poner de manifiesto que los datos publicados pueden no estar plenamente validados y la calidad puede no estar asegurada. La publicación de datos provisionales o validados solo representa un primer paso para alcanzar los objetivos de la vigilancia.

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 el conocimiento de los procesos de emisión

³³ Broughton, G. F. J.; Bower, J. S.; Stevenson, K. J. et al. 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). 1993.

y dispersión atmosférica que incrementan las concentraciones de contaminantes requiere acceder a mediciones meteorológicas y de emisión.

Otro ejemplo sería evaluar el impacto de las condiciones de calidad del aire en el ecosistema o en la salud; para lo cual se requiere información sobre distribuciones poblacionales, epidemiología, factores sociales y efectos sobre la salud.

Generalmente, los datos de vigilancia 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 consolidada a escala nacional residiría 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. 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).

7.6. REPORTE DE LA CALIDAD DEL AIRE

Los informes a ser elaborados y remitidos al centro de coordinación y recopilación de información, han de prepararse según los formatos y condiciones que se presentan en este aparte, donde se establecen los datos mínimos, cálculos y análisis a ser abordados en dichos reportes. El continuo y cabal seguimiento de los procedimientos establecidos para el aseguramiento y control del funcionamiento de los equipos de vigilancia, garantiza que los datos brutos recopilados tengan un nivel de precisión y exactitud que permitan un procesamiento posterior con una menor incertidumbre sobre la coincidencia entre las situaciones reales y las descritas por los datos.

Para el análisis de los fenómenos y episodios de contaminación; habiendo asegurado la calidad de los datos, es importante establecer no sólo un formato y modo común de presentación de la información por parte de los diferentes SVCA, sino también los cálculos y las unidades de las variables utilizadas.

7.6.1. INFORMACIÓN SOBRE SVCA, ESTACIONES Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN

Los diferentes SVCA en la medida de lo posible, deberán remitir el máximo de información posible en relación con los aspectos que se presentan en la Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25.

Tabla 23. Información sobre los SVCA

1. Nombre
2. Abreviatura
3. Tipo de SVCA
4. Organismo responsable de la gestión del SVCA
4.1. Nombre
4.2. Nombre y apellidos de la persona responsable
4.3. Dirección
4.4. Teléfono y fax
4.5. Correo electrónico
4.6 Sitio de Internet

Tabla 24. Información sobre las estaciones

1. Información general
1.1. Nombre de la estación
1.2. Nombre de la ciudad o localidad, si aplica
1.3. Número de referencia o código nacional y local
1.4. Código de la estación atribuido con arreglo al presente protocolo
1.5. Nombre del organismo técnico responsable de la estación (si difiere del responsable del SVCA)
1.6. Organismos o programas a los que se remiten los datos (por contaminante, si procede) (local, nacional, GEMS, CEPIS, etc.)
1.7. Objetivo(s) del seguimiento (conformidad con los requisitos de los instrumentos jurídicos, evaluación de la exposición (salud humana y/o ecosistemas y/o materiales) análisis de tendencias, evaluación de emisiones, etc.)
1.8. Coordenadas geográficas (según la norma ISO 6709: longitud y latitud geográficas y altitud geodésica)
1.9. Contaminantes medidos
1.10. Parámetros meteorológicos medidos
1.11. Otra información pertinente: dirección predominante del viento, relación entre distancia y altura de los obstáculos más cercanos, etc.
2. Clasificación de las estaciones
2.1. Tipo de zona
2.1.1. Urbana: zona con presencia continua de edificaciones
2.1.2. Suburbana: zona con presencia de edificios separados combinada con zonas no urbanizadas (pequeños lagos, bosques, tierras agrícolas)
2.1.3. Rural: todas las zonas que no satisfacen los criterios establecidos para las zonas urbanas y suburbanas
2.2. Tipo de estación en relación con las fuentes de emisión predominantes
2.2.1. Tráfico: estaciones situadas de tal manera que su nivel de contaminación está influenciado principalmente por las emisiones procedentes de una calle/carretera próxima
2.2.2. Industria: estaciones situadas de tal manera que su nivel de contaminación está influido principalmente por fuentes industriales aisladas o zonas industriales
2.2.3. Entorno de fondo: estaciones que no están influenciadas ni por el tráfico ni por la industria
2.3. Información complementaria sobre la estación
2.3.1. Zona de representatividad (radio). Para las estaciones “tráfico”, indique la longitud de la calle/carretera que la estación representa
2.3.2. Estaciones urbanas y suburbanas: población de la ciudad
2.3.3. Estaciones “tráfico”
<ul style="list-style-type: none"> • volumen de tráfico estimado (tráfico medio diario anual) • distancia con respecto al borde de la acera • porcentaje del tráfico correspondiente a los vehículos pesados • velocidad del tráfico • distancia entre las fachadas de los edificios y altura de los edificios (calle de tipo cañón) • ancho de la calle/carretera (calles distintas de las de tipo cañón)
2.3.4. Estaciones “industria”
<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de industria(s) (nomenclatura seleccionada para el código de contaminantes atmosféricos) • Distancia de la fuente / zona fuente
2.3.5. Estaciones rurales (subcategorías)
<ul style="list-style-type: none"> • Proximidad a una ciudad • Regional • Aislada

Tabla 25. Información sobre la configuración de las mediciones por contaminante

1. Equipos
1.1. Nombre
1.2. Principio analítico o método de medición
2. Características de la medición
2.1. Localización del punto de toma de muestras (fachada de edificio, calzada, azotea, patio)
2.2. Altura del punto de toma de muestras
2.3. Tiempo de integración del resultado
2.4. Tiempo de toma de muestras

7.6.2. CONTENIDO DEL INFORME ANUAL DE CALIDAD DEL AIRE

El objetivo principal de un informe de este tipo es poner a disposición de las autoridades, investigadores, organizaciones ambientales y público en general, datos y análisis sobre la calidad del aire de las ciudades que poseen Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire. Dicha publicación permitirá a las autoridades que realizan actividades de vigilancia, evaluación e inspección, contar con información sobre los niveles de contaminación en cada una de las ciudades presentadas, permitiendo con ello, evaluar las acciones de los Programas de Reducción de la Contaminación, para prevenir, controlar o mejorar las condiciones prevalecientes en cada una de ellas, o en su caso, rediseñar los instrumentos de política. A continuación se presenta un índice de documento sugerido para el Informe Anual de Calidad del Aire:

INTRODUCCIÓN

RESUMEN PARA TOMADORES DE DECISIONES

- 1 ASPECTOS GENERALES: Breve conceptualización de los siguientes aspectos:
 - 1.1 Parámetros monitoreados de calidad del aire y sus efectos para la salud humana.
 - 1.2 Marco normativo: Normas de calidad del aire.
 - 1.3 Índice de Calidad del Aire: Procedimiento de cálculo y significado de cada rango de posibles resultados.
 - 1.4 Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire: Breve descripción de las condiciones ambientales y poblacionales de la región que está cubierta por el SVCA, representatividad de las mediciones, ubicación geográfica de las estaciones, fichas técnicas de las estaciones y tecnologías de medición empleadas en cada estación para el monitoreo.
 - 1.5 Estadísticas empleadas: Explicación de los procedimientos de cálculo y sobre todo del significado o uso que se le da a dicho cálculo.
 - 1.6 Meteorología: Conceptualización y procedimientos para la estimación de altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica y procedimientos para cálculos de los resúmenes o promedios de las otras variables meteorológicas (temperatura, precipitación, presión, radiación solar y humedad relativa).

2. EVALUACIÓN DE LA CANTIDAD, CALIDAD, OPORTUNIDAD Y DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACIÓN EN LA BASE DE DATOS
 - 2.1 Análisis del porcentaje de captura de datos: Presentar los resultados para todos y cada uno de los contaminantes monitoreados.

3. CALIDAD DEL AIRE Y METEOROLOGÍA
 - 3.1 Resultados de Calidad del Aire: Preferiblemente reportes gráficos que permitan comparar los valores promedios anuales de concentración obtenidos con la norma, también se aconseja incluir representaciones como los diagramas de caja por estaciones para cada contaminante, ya que estos permiten visualizar si la estación cae en algún tipo de área fuente.

- 3.2 Análisis de la Calidad del Aire: Comportamiento anual del Índice de Calidad del Aire para cada estación por días de la semana de acuerdo con toda la información que se tenga del año o el análisis y comparación del ICA para cada estación para cada uno de los 12 meses del año.
- 3.3 Resultados de las Mediciones Meteorológicas: Resultados de promedios de las variables medidas, empleando los criterios en cuanto a sus formatos de presentación. Mínimo deberá contener: rosas de vientos diurnas, nocturnas y totales para todas y cada una de las estaciones donde se realicen mediciones; comportamiento de las mediciones de temperatura, presión, precipitación, distribución porcentual horaria de la precipitación, radiación solar, humedad relativa, dirección y velocidad del viento; y finalmente resumen de los valores promedios mensuales de las variables meteorológicas de la ciudad o región.
- 3.4 Determinación de Áreas - Fuente de Contaminación: Para cada uno de los contaminantes monitoreados y para cada estación de monitoreo.
- 3.5 Estudios Especiales: Resultados de estudios o investigaciones científicas realizadas durante el año, relacionados con temas como estudios de valoración de la contaminación en la salud humana o estudios epidemiológicos desarrollados, estudios en días de restricción vehicular, estudios en días de quema de pólvora, entre otros.

4. CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

- 4.1 Presentación de medidas de contingencia o de control de emisiones de fuentes fijas, que hayan sido aplicadas por la autoridad ambiental en el último año.
- 4.2 Presentación de medidas de contingencia o de control de emisiones de fuentes móviles, que hayan sido aplicadas por la autoridad ambiental en el último año
- 4.3 Presentación de nuevos controles (esto solo en caso que la autoridad ambiental competente decida implementar algún nuevo control para algunas de las fuentes emisoras con mayor impacto sobre la calidad del aire, de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de calidad del aire y en los planes de reducción de la contaminación).

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

7.6.3. CONTENIDO DE INFORMES MENSUALES Y TRIMESTRALES DE CALIDAD DEL AIRE

La realización de informes mensuales y trimestrales por parte de los SVCA permite conocer a corto plazo el estado de la calidad de aire en la región y también desarrollar seguimientos a los posibles efectos que se puedan presentar, bien sea por las medidas de control implementadas o también por la aparición de nuevas fuentes contaminantes.

De acuerdo con lo establecido en el Manual de Diseño de este protocolo, cada tipo de Sistema de Vigilancia debe cumplir con ciertos requerimientos de infraestructura, hardware, software y frecuencia de generación de reportes. Específicamente, los sistemas que deben presentar este tipo de informes son: SVCA tipo Básico, tipo Intermedio, tipo Avanzado y tipo Especial.

Se recomienda que el contenido de este informe sea el siguiente:

1. INTRODUCCIÓN

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

3. GENERALIDADES

- 3.1 Ubicación geográfica de estaciones y entorno
- 3.2 Tecnologías de medición de las estaciones
- 3.3 Resumen de la ficha técnica de las estaciones

3.4 Contaminantes evaluados

3.5 Tecnologías de monitoreo utilizadas

4. RESULTADOS DE LOS MONITOREOS CALIDAD DEL AIRE

- Gráficas de evolución diaria de la concentración del contaminante (incluir variables meteorológicas como precipitación)
- Resultados estadísticos
- Resultados consolidados
- Comparación con la norma
- Cálculo de Índice de Calidad del Aire - ICA para cada estación
- Análisis de datos atípicos
- Particularidades del período

5. METEOROLOGÍA DEL PERIODO

- Gráficas de comportamiento mensual
 - Temperatura
 - Precipitación
 - Rosa de vientos (diurnas, nocturnas y totales)

6. CONCLUSIONES

ANEXOS

ANEXO 1: FICHA TECNICA DE LAS ESTACIONES

ANEXO 2: SOPORTE DEL REGISTRO DE CALIBRACIONES

ANEXO 3: BITÁCORA DE MUESTREOS

- Fecha de inicio y finalización del muestreo
- Identificación y peso final del filtro utilizado
- Presión barométrica de la zona
- Temperatura promedio de la zona
- Flujo del muestreo
- Registro inicial y final de la lectura del horómetro
- Identificación de la carta utilizada en el registrador de flujo durante el muestreo
- Identificación de la estación o sitio de operación del equipo, así como su ubicación geográfica (GPS)
- Identificación del equipo utilizado
- Operador y responsable del monitoreo
- Observaciones y dificultades durante el muestreo

ANEXO 4: Reportes de laboratorio (cuando aplique el caso)

ANEXO 5: Memorias de cálculo de datos

ANEXO 6: Registros del Plan de calidad

ANEXO 7: Cadena de custodia de los datos (cuando aplique el caso)

7.6.4. CONTENIDO DEL INFORME DE CALIDAD DEL AIRE PRESENTADO EN LAS PÁGINAS WEB

En la página web de la autoridad ambiental respectiva a cada SVCA debe incluirse y mantenerse una sección donde se reporten semanalmente los datos recolectados por las estaciones de monitoreo y vigilancia de calidad de aire; estos datos han debido ser sometidos a los procedimientos de validación siguiendo las indicaciones del presente Protocolo. Sin embargo, las autoridades ambientales pueden apoyarse en el SISAIRE para realizar estas actividades.

El contenido mínimo sugerido de los reportes serán publicados en la web para libre acceso de cualquier ciudadano es el siguiente:

- Datos de la semana presente
- Índice de calidad del aire para cada día de monitoreo realizado
- Graficas con los datos
- Capacidad para bajar informes del SVCA

La Figura 46 muestra un ejemplo de página web posible para el reporte de la información.

The screenshot displays the Red Minera website interface. At the top, there is a navigation menu with options like 'inicio', 'historia', 'operación', 'convenio', 'i.c.a.', 'download', 'informes', 'enlaces', and 'datos'. Below this, there are tabs for 'mp10', 'p.s.t.', and 'meteorología'. The main content area is titled 'DISTRIBUCION DE ESTACIONES RED DE MONITOREO' and features a map of the monitoring stations. To the left of the map is a table showing the 'Calculo del Índice de Calidad del Aire' (Calculation of the Air Quality Index) for the date 2008-01-29. The table lists various stations and their corresponding PM10 levels in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Calculo del Índice de Calidad del Aire

Nombre	PM10 - 2008-01-29	Nivel $\mu\text{g}/\text{m}^3$
ZM16-Bosconia		
ZM15-CHIRIGUANA		83.12
ZM14-Móvil 1		
ZM13-El Hatillo		
ZM12-Rincon Hondo		56.96
ZM11-De Fondo		
ZM10-Móvil-Vía		
ZM9-La Jagua-Vía		
ZM8-La Loma-Vía		
ZM7-Plan Bonito Norte		124.38
ZM6-Boqueron		
ZM5-La Aurora		83.24
ZM4-Las Palmitas		81.63
ZM3-Plan Bonito Sur		
ZM2-La Jagua-Centro		84.16
ZM1-La Loma-Centro		57.91

The map shows the 'Ubicación de Estaciones' (Location of Stations) and includes a note: '** Los datos presentados han surtido un proceso de prevalidación, pero es posible que cambien con una validación posterior.' (The data presented has undergone a pre-validation process, but it is possible that it will change with a subsequent validation.)

Below the main content, there are two smaller screenshots. The left one shows the 'FICHA TECNICA DE LA ESTACION' (Technical Station Card) with fields for general information, location, and technical specifications. The right one shows a bar chart for 'Estación: 12' with a date range for data selection.

Figura 46. Pagina web tipo (CORPOCESAR -Red Minera www.corpocesar.gov.co)

7.6.5. CÁLCULOS Y CONTENIDO DE UN INFORME METEOROLÓGICO ANUAL

Un informe básico de meteorología está orientado a suministrar a los especialistas, a las autoridades y a la comunidad en general, la información meteorológica relacionada con el tema de la calidad del aire.

Se resalta la importancia de los datos horarios, en razón a las condiciones variables de la estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla a lo largo del día. Los datos suministrados son importantes para la realización de las modelaciones de la dispersión de los contaminantes atmosféricos a partir de las fuentes emisoras, tema esencial en los estudios de calidad de aire.

Asimismo, el informe permite establecer la continuidad de los datos generados en las estaciones meteorológicas de los SVCA, de manera que cada usuario del informe pueda inferir la confiabilidad de los resúmenes meteorológicos presentados para cada estación.

El siguiente es el contenido sugerido para el capítulo de meteorología:

1. EVALUACIÓN DE LOS DATOS DE LA RED METEOROLÓGICA

1.1 Inventario de las variables meteorológicas medidas en las estaciones meteorológicas de los SVCA

1.2 Evaluación de la continuidad de los datos meteorológicos reportados en las estaciones durante el año

Reportar los porcentajes de días en los que no se obtienen datos por cada estación y por cada variable. La presentación del inventario y de la continuidad de datos debe tener una estructura básica. A continuación se presenta un ejemplo de dicho reporte tomando como base la información obtenida en el análisis de información meteorológica realizado para uno de los SVCA existentes en el país, el cual posee cuatro estaciones con medición de parámetros meteorológicos (ver Tabla 26 y Figura 47).

Tabla 26. Disponibilidad de datos meteorológicos existentes en el SVCA evaluado

	ESTACIÓN	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
	PERIODO DATOS	Feb. 2002 - Oct. 2006	Feb. 2002 - Oct. 2006	Ene. 2001 - Mar. 2006	Ene. 2001 - Dic. 2006
	VARIABLES	T, HR, DV, VV, RS, PB, P			
AÑO	INDICADOR				
2001	Días de operación			365	365
	Días falta todos			0	7
	Días falta T			0	7
	Días falta HR			0	7
	Días falta RS			58	7
	Días falta VV			58	7
	Días falta DV			58	7
	Días falta Pb			0	7
	Días falta Precip.			0	7
2002	Días de operación	334	336	365	365
	Días falta todos	0	0	0	0
	Días falta T	0	124	0	0

	ESTACIÓN	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
	PERIODO DATOS	Feb. 2002 - Oct. 2006	Feb. 2002 - Oct. 2006	Ene. 2001 - Mar. 2006	Ene. 2001 - Dic. 2006
	VARIABLES	T, HR, DV, VV, RS, PB, P			
AÑO	INDICADOR				
	Días falta HR	0	0	0	0
	Días falta RS	0	0	0	0
	Días falta VV	0	0	0	0
	Días falta DV	0	0	0	0
	Días falta Pb	0	0	0	0
	Días falta Precip.	0	0	0	0
2003	Días de operación	365	365	365	365
	Días falta todos	0	0	0	92
	Días falta T	0	0	0	92
	Días falta HR	0	0	0	92
	Días falta RS	0	0	0	106
	Días falta VV	0	0	0	92
	Días falta DV	0	0	0	92
	Días falta Pb	0	0	0	92
	Días falta Precip.	0	0	0	92
2004	Días de operación	365	365	365	365
	Días falta todos	17	0	0	8
	Días falta T	17	0	0	8
	Días falta HR	17	265	0	8
	Días falta RS	17	0	0	8
	Días falta VV	185	0	0	8
	Días falta DV	185	0	0	8
	Días falta Pb	17	0	0	8
	Días falta Precip.	17	0	0	8
2005	Días de operación	365	365	365	365
	Días falta todos	13	102	0	0
	Días falta T	13	102	0	0
	Días falta HR	13	142	0	0
	Días falta RS	13	102	0	0
	Días falta VV	13	102	0	0
	Días falta DV	13	102	0	75
	Días falta Pb	13	102	0	0
	Días falta Precip.	13	102	0	0
2006	Días de operación	292	365	174	365
	Días falta todos	0	0	0	9
	Días falta T	0	0	77	9
	Días falta HR	0	0	77	9
	Días falta RS	0	0	77	9
	Días falta VV	0	0	0	9

ESTACIÓN		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
PERIODO DATOS		Feb. 2002 - Oct. 2006	Feb. 2002 - Oct. 2006	Ene. 2001 - Mar. 2006	Ene. 2001 - Dic. 2006
VARIABLES		T, HR, DV, VV, RS, PB, P			
AÑO	INDICADOR				
	Días falta DV	0	31	0	69
	Días falta Pb	0	0	77	9
	Días falta Precip.	0	0	77	9
	Total días operación	1721	1796	1999	2190
	Total días falta todo	30	102	0	116
	% días falta todo	1,74	5,68	0,00	5,30
	% días falta T	1,74	12,58	3,85	5,30
	% días falta HR	1,74	22,66	3,85	5,30
	% días falta RS	1,74	5,68	6,75	5,94
	% días falta V.V	11,50	5,68	2,90	5,30
	% días falta DV	11,50	7,41	2,90	11,46
	% días falta Pb	1,74	5,68	3,85	5,30
	% días falta Precip.	1,74	5,68	3,85	5,30

Convenciones:

T: temperatura del aire; HR: humedad relativa; V.V: velocidad del viento; DV: dirección del viento; Pb: presión atmosférica (barométrica); P: precipitación; RS: radiación solar.

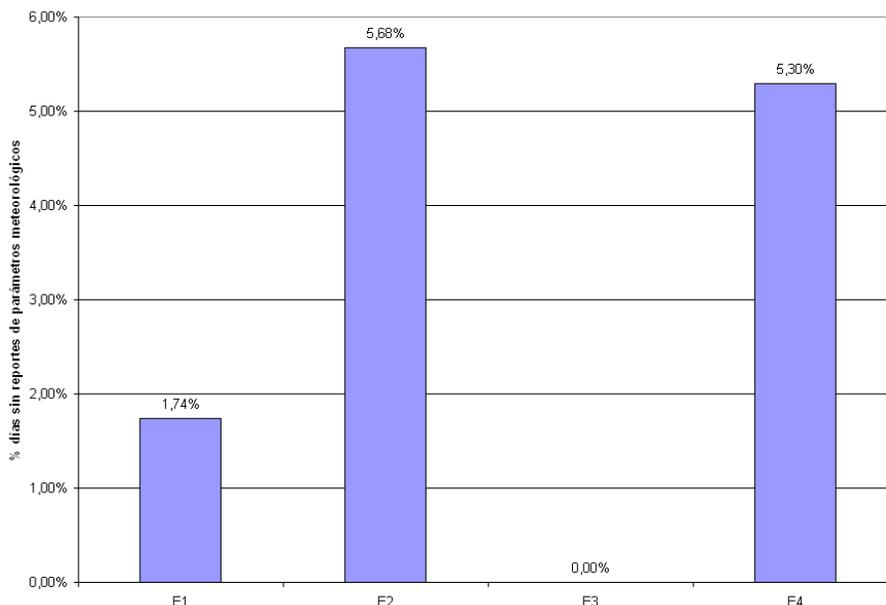


Figura 47. Porcentajes de días con datos faltantes en las estaciones meteorológicas del SVCA evaluado

1.3 Control de calidad de los datos: Rangos lógicos que se deben cumplir en las estaciones de la ciudad o región en evaluación para cada una de las variables que serán consideradas.

1.4 Herramientas utilizadas en el procesamiento y análisis de los datos: Mencionar clara y detalladamente todas y cada una de las herramientas tanto físicas como de software empleadas durante el procesamiento de los datos obtenidos por las mediciones.

2. ESTUDIOS METEOROLÓGICOS DE LA REGIÓN

2.1 Resumen de las bases técnicas de los estudios climatológicos y micrometeorológicos: Descripción breve, clara y concisa del fundamento teórico bajo el cual es realizado el análisis de la información y los cálculos de parámetros que permiten la caracterización climatológica y micrometeorológica de la ciudad.

2.2 Condiciones climatológicas predominantes en la ciudad o región.

2.2.1 Resumen anual por horas y resúmenes mensuales para las diversas estaciones de la ciudad o región, de las siguientes variables: temperatura del aire, dirección y velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica, precipitación. Un ejemplo básico de este tipo de resúmenes puede observarse en la Tabla 27.

Tabla 27. Ejemplo para la presentación del resumen meteorológico anual por horas para una estación

HORA	VEL VTO m/s	DIR VTO	TEMP ° C	PRECIP mm	PRECIP %	HUM REL %	RAD SOL W/m ²	PRESIÓN HPa
0	0,64	SW	21,82	67,60	3,87	79,15	0,23	679,36
1	0,65	N	21,53	148,10	8,49	79,49	0,27	679,12
2	0,60	N	21,23	136,50	7,82	79,83	0,30	679,00
3	0,62	N	21,00	94,80	5,43	79,84	0,30	678,94
4	0,62	N	20,81	95,10	5,45	80,10	0,30	679,02
5	0,59	N	20,63	92,80	5,32	80,09	2,74	679,16
6	0,60	SW	20,84	80,60	4,62	78,70	66,85	679,43
7	0,72	SE	21,82	84,70	4,85	74,75	237,26	679,47
8	0,91	SE	22,78	90,50	5,19	72,00	432,65	679,63
9	1,07	SE	24,07	28,30	1,62	67,96	626,32	679,62
10	1,32	SE	25,40	31,10	1,78	62,37	716,56	679,58
11	1,77	SE	26,10	31,30	1,79	60,86	727,99	679,27
12	1,94	SE	26,20	30,40	1,74	62,04	625,93	678,99
13	1,96	SE	26,11	22,80	1,31	63,30	501,42	678,64
14	1,91	SE	25,92	28,00	1,60	64,56	393,18	678,27
15	1,78	SE	25,49	63,40	3,63	66,93	287,02	678,04
16	1,53	SE	24,82	81,90	4,69	70,18	152,38	678,11
17	1,15	SE	24,00	48,30	2,77	74,07	38,04	678,39
18	0,89	S	23,23	58,60	3,36	77,68	0,64	678,72
19	0,83	S	22,85	57,50	3,30	79,13	0,30	679,08
20	0,76	S	22,64	56,70	3,25	79,52	0,29	679,30
21	0,71	S	22,47	60,90	3,49	79,52	0,27	679,48
22	0,69	SW	22,24	81,70	4,68	79,24	0,24	679,54
23	0,69	N	22,03	173,40	9,94	79,43	0,23	679,53
24 HORAS	1,04	SE	23,17	1745	100	73,78	200,49	679,07
DIURNO	1,39	SE	24,46	621,30	35,60	68,14	400,47	678,95
NOCTURNO	0,69	N	21,87	1123,70	64,40	79,42	0,51	679,19
MAX HORA	1,96		26,20	173,40		80,10	727,99	679,63
MIN HORA	0,59		20,63	22,80		60,86	0,23	678,04

2.2.2 Rosas de viento: Mensuales, anual total (todos los datos), anual diurna y anual nocturna.

2.2.3 Resumen analítico de las condiciones climatológicas del año: Detalle de los valores climáticos mensuales y anuales de las variables analizadas y elaboración de mapas donde se representa la distribución de la precipitación en toda la región, el comportamiento de la humedad relativa, velocidad y dirección del viento. El resumen analítico debería ir acompañado de gráficas explicativas. Como ejemplo, en la Tabla 28 se presentan los datos del mismo SVCA con las cuatro estaciones mencionadas anteriormente: E₁, E₂, E₃ y E₄ para el año 2002.

Tabla 28. Resumen de valores promedios mensuales de las variables climáticas en el SVCA evaluado durante el año 2002

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	AÑO
E1													
Velocidad Viento (m/s)	1,48	1,57	1,54	1,44	1,40	1,25	1,31	1,35	1,41	1,48	1,46	1,46	1,43
Velocidad Viento día (m/s)	2,17	2,25	2,24	2,13	2,00	1,86	1,90	1,97	2,01	2,12	2,10	2,13	2,07
Velocidad Viento noche (m/s)	0,79	0,88	0,84	0,76	0,79	0,65	0,71	0,73	0,81	0,84	0,82	0,78	0,79
Temp. (° C)	21,02	21,60	21,56	21,21	21,17	20,97	20,93	21,34	20,86	20,71	20,58	20,87	21,07
Precip. (mm)	37,70	105,38	99,68	95,30	91,95	69,32	57,80	42,30	79,10	137,20	140,23	62,28	1018,25
H R (%)	86,26	80,80	83,39	86,68	86,47	85,95	84,28	83,94	85,75	87,48	89,18	88,04	85,75
Radiación solar (W/m ²)	419,55	446,68	463,46	449,77	457,17	420,56	407,11	424,71	440,16	426,86	410,10	391,57	429,81
Presión atm. (HPa)	664,46	664,08	664,11	664,15	661,92	662,53	665,17	664,02	669,04	664,23	664,19	664,35	663,94
E2													
Velocidad Viento (m/s)	1,55	1,56	1,28	0,91	0,97	0,98	0,87	1,22	1,27	1,26	1,24	1,23	1,18
Velocidad Viento día (m/s)	1,79	1,76	1,65	1,34	1,32	1,35	1,29	1,56	1,63	1,59	1,50	1,53	1,51
Velocidad Viento noche (m/s)	1,31	1,36	0,91	0,47	0,62	0,61	0,46	0,88	0,91	0,92	0,97	0,92	0,86
Temp. (° C)	25,36	26,06	25,84	25,67	25,69	25,15	25,14	25,47	25,14	25,15	25,12	25,50	25,52
Precip. (mm)	47,57	87,97	81,42	79,20	65,60	44,21	56,11	33,70	73,02	71,36	80,28	33,58	754,01
H R (%)	77,62	74,25	77,80	81,81	82,53	82,67	81,72	79,34	80,66	82,01	84,10	82,49	79,88
Radiación solar (W/m ²)	396,46	439,02	466,78	473,77	505,47	475,84	475,35	492,28	480,63	439,19	409,92	399,36	450,67
Presión atm. (HPa)	659,53	660,77	656,53		668,42	667,40	669,85	669,07	666,56	666,57	665,34	665,89	665,71
E3													
Velocidad Viento (m/s)	0,58	0,74	0,64	0,53	0,52	0,40	0,39	0,43	0,46	0,51	0,50	0,56	0,52
Velocidad Viento día (m/s)	1,03	1,27	1,09	0,88	0,83	0,63	0,64	0,73	0,78	0,88	0,85	1,00	0,89
Velocidad Viento noche (m/s)	0,14	0,22	0,20	0,18	0,20	0,17	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,12	0,16
Temp. (° C)	22,29	22,67	22,22	21,69	21,96	22,12	22,83	22,34	22,11	22,80	22,51	22,13	22,27
Precip. (mm)	92,68	164,23	109,22	83,05	121,60	61,25	76,65	73,80	117,35	156,65	136,33	39,55	1232,35
H R (%)	77,86	77,02	78,22	83,59	84,87	82,87	82,27	79,91	79,74	83,40	82,00	78,05	80,48
Radiación solar (W/m ²)	438,65	475,26	482,49	446,77	480,07	421,42	408,84	462,28	461,90	448,49	440,64	430,93	443,81
Presión atm. (HPa)	676,26	674,13	676,46	676,06	675,90	676,05	674,97	675,96	675,60	674,59	675,52	675,35	675,87
E4													
Velocidad Viento (m/s)	1,02	1,55	1,10	1,03	1,05	1,00	0,97	0,99	1,05	0,97	0,85	0,93	1,05
Velocidad Viento día (m/s)	1,42	1,87	1,46	1,40	1,39	1,30	1,27	1,33	1,40	1,29	1,17	1,31	1,40
Velocidad Viento noche (m/s)	0,63	1,22	0,75	0,67	0,71	0,69	0,66	0,66	0,70	0,64	0,52	0,54	0,71
Temp. (° C)	23,11	23,38	23,95	23,11	23,49	23,12	23,29	23,64	23,22	22,84	22,55	22,83	23,25
Precip. (mm)	94,18	148,44	138,16	134,84	117,46	97,53	77,90	52,80	95,52	109,76	114,83	94,45	1275,86

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	AÑO
H R (%)	75,49	73,37	76,68	83,35	82,55	82,41	78,78	77,97	79,21	82,23	82,79	78,19	79,58
Radiación solar (W/m ²)	382,87	404,29	410,88	413,09	438,78	389,30	393,04	415,27	394,95	386,47	374,38	383,56	400,08
Presión (HPa)	678,16	671,26	677,62	677,82	677,95	678,33	677,99	677,90	677,95	677,61	678,21	678,37	677,30

2.3 Condiciones micrometeorológicas predominantes en la ciudad o región.

2.3.1 Resumen anual (con datos horarios) y resúmenes mensuales para cada ciudad o región de la estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla.

Uno de los puntos críticos en los estudios de la calidad del aire en áreas urbanas en el país, se refiere a la falta de metodologías meteorológicas confiables para la solución adecuada de los modelos de dispersión de los contaminantes atmosféricos. El procedimiento que se sugiere a continuación es propuesto por Ruiz³⁴ a partir de los lineamientos presentados en el estudio “Implementación de Metodologías para la Meteorología y la Micrometeorología de Dispersión de los Contaminantes en el Aire” del IDEAM realizado en 1998³⁵.

La altura de mezcla en horas diurnas depende tanto del calentamiento ocasionado por la radiación solar recibida en un sitio (altura convectiva) como del movimiento turbulento generado por los desplazamientos del aire (viento horizontal y vertical, altura mecánica).

Por ello para las horas diurnas se puede expresar que:

$$H_z = MAX(h_{conv}, h_{mec})$$

Donde:

H_z: Altura de mezcla en un período diurno dado

h_{conv}: Altura de mezcla convectiva

h_{mec}: Altura de mezcla mecánica en el período en cuestión

A su vez:

$$(h_{conv})_{ti} = \left[(h_{conv})_{ti-1}^2 + \frac{2,4 H_0}{\rho C_p \gamma} (t_2 - t_1) \right]^{0.5}$$

Donde:

(h_{conv})_{ti} y (h_{conv})_{ti-1}: Son respectivamente las alturas de mezcla en el período actual y en el período previo

$\left(\frac{2,4 H_0}{\rho C_p \gamma} \right) \cdot (t_2 - t_1)$: Término cuyo valor depende del flujo de calor sensible (H₀)

γ: Parámetro semi-empírico de ajuste de la altura de mezcla basado en la rugosidad superficial, cuyo valor es de 0,005

³⁴ Ruiz, F. Metodologías para estimar la altura de la capa de mezcla y otros parámetros de turbulencia atmosférica. Universidad Nacional de Colombia. Posgrado en Meteorología. 2001.

³⁵ Sozzi, R. La turbulencia de la atmósfera y la dispersión de los contaminantes. 2 volúmenes. ASAS. Cinisello Balsamo. Italia. 1997.

Sozzi, R. y F. Ruiz. Implementación de metodologías para la meteorología y la micrometeorología de dispersión de los contaminantes en el aire. IDEAM. 1998.

- t_2 y t_1 : Tiempos, precedente y actual. Como los cálculos son horarios la diferencia entre t_2 y t_1 será igual a 1 hora, que convertidos en la unidad de segundos será igual a 3600.
- ρ : Densidad del aire a presión constante; puede ser leída en tablas de propiedades físicas del aire
- C_p : Capacidad calorífica o calor específico del aire a presión constante; puede ser leído en tablas de propiedades físicas.

Una forma de estimar el producto de ρ y C_p del aire en casos en los que no se cuente con ninguna tabla de datos de propiedades, es a través de la siguiente expresión:

$$\rho C_p = 350,12 \cdot (P[\text{mbar}]/T[K])$$

Por su parte el flujo de calor sensible se define de la siguiente forma:

$$H_0 = 0.3R_g + A$$

Donde:

R_g : Radiación global en W/m^2

A: Parámetro calculado a partir del dato de fracción de la nubosidad (N) predominante en el tiempo comprendido entre el período previo de cálculo y el actual (t_2-t_1), es decir:

$$A = 2,4N - 25,5$$

La fracción de nubosidad (N) predominante en cada período horario se estimó a partir de los datos de la distribución porcentual de la precipitación en cada una de las 24 horas del día. De este modo, en las horas con mayor precipitación se estimó un valor N de 0,8 y en las horas de menor precipitación N se tomó como 0,2. Entre estos valores se interpolaron los restantes valores horarios de la nubosidad.

En cuanto a la altura de mezcla mecánica, h_{mec} , su valor depende de la velocidad de fricción (u^*).

$$h_{mec} = 1330 \cdot u^*$$

$$u^* = u_0 \left[1 + a \ln \left(1 + b \frac{Q_0}{Q^*} \right) \right]$$

$$u_0 = k \cdot \frac{u}{\ln(z_m/z_0)}$$

Donde:

u : Velocidad del viento

k : Constante de Von Karman: 0,41

a : Parámetro definido como: si $z_0/z_m \leq 0,01$ $a = 0,128 + 0,005 \ln(z_0/z_m)$;
 si $z_0/z_m > 0,01$ $a = 0,107$

z_m : Depende de la rugosidad superficial (z_0) y de la altura del instrumento que mide la velocidad del viento $z_m = z_r - 4z_0$

Donde: z_r : es la altura de la medición del viento
 z_0 : es la rugosidad superficial, cuyo valor se encuentra en la Tabla 29.

Tabla 29. Longitud de aspereza superficial en metros.³⁶

Uso de suelo	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Agua	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Bosque caducifolio	1,00	1,30	0,80	0,50
Bosque conífero	1,30	1,30	1,30	1,30
Pantano	0,20	0,20	0,20	0,05
Cultivos	0,03	0,20	0,05	0,01
Pradera	0,05	0,10	0,01	0,001
Urbano	1,00	1,00	1,00	1,00
Desierto	0,30	0,30	0,30	0,15

$$Q_0 = \frac{H_0}{\rho C_p} \quad y \quad Q^* = \frac{T \cdot u_0^3}{k \cdot g \cdot z_m}$$

Para las horas nocturnas, H_z está definido por el valor de h_{mec} . No obstante, en esta situación nocturna:

$$u^* = C_{DN} \cdot \frac{u}{2} \cdot (1 + C^{0.5})$$

$$C_{DN} = \frac{k}{\ln(z_m/z_0)}$$

$$C = \frac{1 - 4u_o^2}{C_{DN} \cdot u^2}$$

Donde:

- C_{DN} : Parámetro de ajuste que indica la relación entre el tipo de superficie y la altura a la que se mide el viento
- C: Factor que refleja el efecto de la rugosidad de la superficie en la velocidad del viento en la altura de medición

Una metodología análoga para el cálculo de la altura de mezcla en ausencia de datos de globos meteorológicos, fue desarrollada por científicos de la oficina de meteorología del Reino Unido (Farmer, 1983) en la cual el parámetro es hallado a través de un proceso iterativo de la longitud de Monin-Obukhov (L) y de la velocidad de fricción. Más información acerca de la capa de mezcla puede también encontrarse en el reporte final COST action 715³⁷.

Por otra parte, la estabilidad atmosférica se ha determinado con base en las relaciones existentes entre la estabilidad, la radiación solar y la velocidad del viento, definidas por Pasquill y Gifford según se presenta en la Tabla 30 y Tabla 31.

36 USER'S GUIDE FOR THE AERMOD METEOROLOGICAL PREPROCESSOR (AERMET). USEPA 2004

37 Meteorology applied to urban air pollution problems, B. Fisher, S. Joffre, J. Kukkonen, et al., 2005.

Tabla 30. Categorías de estabilidad para períodos diurnos, condiciones convectivas

Vel. Viento (m/s)	Radiación Solar Global (W/m ²)					
	> 700	540 - 700	400 - 540	270 - 400	140 - 270	< 140
< 2	A	A	B	B	C	D
2 - 3	A	B	B	B	C	D
3 - 4	B	B	B	C	C	D
4 - 5	B	B	C	C	D	D
5 - 6	C	C	C	C	D	D
> 6	C	C	D	D	D	D

Tabla 31. Categorías de estabilidad para períodos nocturnos, condiciones estables

Vel. Viento (m/s)	Radiación Solar Neta (W/m ²)		
	> - 20	- 20 a - 40	< - 40
< 2	D	F	F
2 - 3	D	E	F
3 - 5	D	D	E
5 - 6	D	D	D
> 6	D	D	D

- A: Condiciones muy inestables
- C: Condiciones ligeramente inestables
- E: Condiciones ligeramente estables
- B: Condiciones moderadamente inestables
- D: Condiciones neutras
- F: Condiciones moderadamente estables

En el caso de la estabilidad para condiciones nocturnas, es necesario estimar la radiación neta, lo cual se realiza a través de la siguiente ecuación, válida para períodos diurnos o nocturnos:

$$R_n = \frac{(1 - \alpha) \cdot R_g + (C_1 \cdot T^8) + C_2 \cdot N - \sigma \cdot T^4}{1 + C_3}$$

Donde:

- R_n: Radiación solar neta
- R_g: Radiación solar global (inexistente en la noche)
- T: Temperatura absoluta (°K)
- N: Fracción de nubosidad, estimada de acuerdo con los elementos antes detallados
- C₁ = 5,31*10⁻¹³
- C₂ = 60
- C₃ = 0,12
- σ = 5,67*10⁻⁸ (constante de Stefan Boltzman)

Otra forma alterna de calcular la estabilidad atmosférica, con resultados equivalentes a las dos tablas anteriores es mediante el nomograma de Pasquill mostrado en la Figura 48.

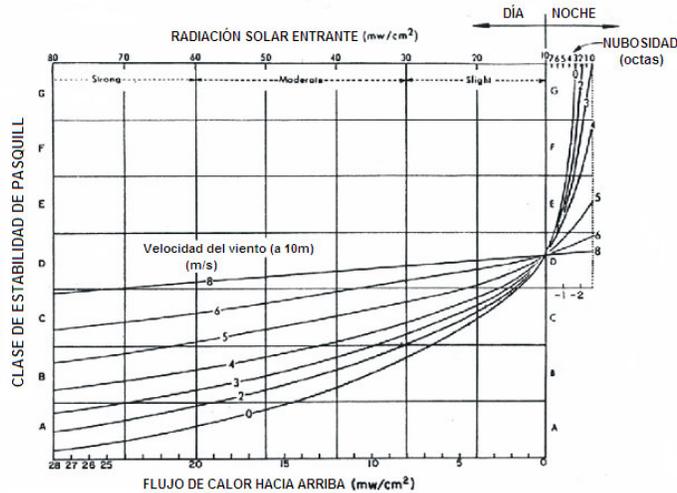


Figura 48. Nomograma para cálculo de estabilidad atmosférica según Pasquill³⁸

2.3.2 Resumen analítico de las condiciones micrometeorológicas del año.

Una forma sugerida para presentar los resultados de los cálculos realizados para altura de mezcla y estabilidad atmosférica de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente es a través de tablas y gráficas como se muestra en la Tabla 32 y en la Figura 49.

Tabla 32. Presentación de resultados obtenidos para altura de mezcla y estabilidad atmosférica

ESTIMACION ALTURA DE MEZCLA (h_{mix}) Y ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA															
VALORES PROMEDIOS HORARIOS - PERIODO 2002															
Datos obtenidos con base en la información recolectada de las estaciones de la red meteorológica															
HORAS DIURNAS															
$H_z = MAX(h_{mec}, h_{conv})$															
$h_{mec} = 1330 \cdot u$						$h_{conv} = [h_{conv-i}^2 + (2.4 H_0 / \rho C_p \gamma)(t_2 - t_1)]^{0.5}$									
$u^* = u_0 [1 + aLn(1 + (b Q_0 / Q^*))]$															
$u_0 = k \cdot \frac{u}{\ln(z_m / z_0)}$						$Q_0 = H_0 / \rho C_p$				$H_0 = 0.3R_g + A$					
$z_m = z_r - 4z_0$						$Q^* = (T \cdot u_0^3) / (k \cdot g \cdot z_m)$				$A = 2.4N - 25.5$					
HLC	u	t	z ₀	z _m	u ₀	N	R _g	H ₀	Q ₀	Q*	u*	h _{mec}	h _{conv}	H _z (m)	ESTABILIDAD
7	0.71	21.48	1	6	0.16	0.2	222.5	41.72	0.047	0.05	0.44	582	353	582	C
8	0.87	23.18	1	6	0.20	0.2	439.2	106.74	0.120	0.10	0.65	870	576	870	B
9	0.94	24.92	1	6	0.22	0.2	645.6	168.66	0.191	0.12	0.83	1098	813	1098	A
10	1.17	26.08	1	6	0.27	0.2	753.9	201.15	0.228	0.24	0.75	995	1028	1028	A
11	1.70	26.55	1	6	0.39	0.2	744.1	198.22	0.226	0.73	0.64	854	1203	1203	A
12	2.10	26.61	1	6	0.48	0.2	692.2	182.63	0.208	1.38	0.66	878	1344	1344	B
13	2.20	26.46	1	6	0.50	0.2	592.2	152.65	0.174	1.59	0.65	871	1451	1451	B
14	2.15	26.25	1	6	0.49	0.2	481.8	119.53	0.136	1.47	0.62	830	1530	1530	B
15	2.03	25.86	1	6	0.47	0.3	330.3	74.314	0.084	1.25	0.57	759	1577	1577	B
16	1.78	25.27	1	6	0.41	0.4	165.6	25.139	0.028	0.84	0.48	633	1592	1592	C
17	1.39	24.34	1	6	0.32	0.4	42.30	-11.86	-0.01	0.40	0.33	443	1315	1315	D
HORAS NOCTURNAS															

³⁸ CALINE 4. User`s Manual

$h_{mix} = h_{mec}$															
$u^* = CDN \cdot (u/2) \cdot (1 + C^{0.5})$										$u_0^2 = (I \cdot z_m) / (k \cdot A)$					
$C_{DN} = \frac{k}{\ln(z_m/z_0)}$										$C = (1 - 4u_0^2) / C_{DN} \cdot u^2$					
$I = 4.7$					$k = 0.41$					$A = 1100$					
$R_n = \frac{(1 - \alpha) \cdot R_g + (5.31 \times 10^{-13} \cdot T^8) + 60 \cdot N - 5.67 \times 10^{-8} \cdot T^4}{1 + 0.12}$															
HLC	u	N	t	T	z ₀	z _m	R _n	Ln(z _m /z ₀)	C _{DN}	u ₀ [*]	C	u [*]	h _{mec}	H _z (m)	ESTABILIDAD
18	1.00	0.4	23.38	296	1	6	-47.85	1.7918	0.229	0.06	12	0.51	680	680	F
19	0.82	0.3	22.74	296	1	6	-53.99	1.7918	0.229	0.06	12	0.42	555	555	F
20	0.71	0.3	22.28	295	1	6	-54.54	1.7918	0.229	0.06	12	0.36	479	479	F
21	0.63	0.2	21.90	295	1	6	-60.33	1.7918	0.229	0.06	12	0.32	430	430	F
22	0.61	0.4	21.58	295	1	6	-49.98	1.7918	0.229	0.06	12	0.31	411	411	F
23	0.59	0.5	21.24	294	1	6	-45.00	1.7918	0.229	0.06	12	0.30	398	398	F
0	0.56	0.6	20.97	294	1	6	-39.95	1.7918	0.229	0.06	12	0.29	380	380	F
1	0.55	0.8	20.70	294	1	6	-29.53	1.7918	0.229	0.06	9	0.25	336	336	F
2	0.54	0.8	20.45	293	1	6	-29.80	1.7918	0.229	0.06	6	0.21	283	283	F
3	0.54	0.7	20.24	293	1	6	-35.38	1.7918	0.229	0.06	2	0.15	200	200	F
4	0.53	0.6	20.05	293	1	6	-40.94	1.7918	0.229	0.06	2	0.15	195	195	F
5	0.54	0.6	19.89	293	1	6	-41.11	1.7918	0.229	0.06	2	0.15	198	198	F
6	0.57	0.3	20.12	293	1	6	-56.94	1.7918	0.229	0.06	2	0.16	209.4	209	F

Si el objetivo del cálculo de la estabilidad atmosférica es determinar el componente convectivo el cual se asocia a la radiación solar, las horas diurnas se toman desde las 6:00 horas hasta las 18:00 horas. Si el objetivo es determinar el componente mecánico el cual se asocia al comportamiento del viento se toman las 24 horas sin establecer periodos diurnos ni nocturnos.

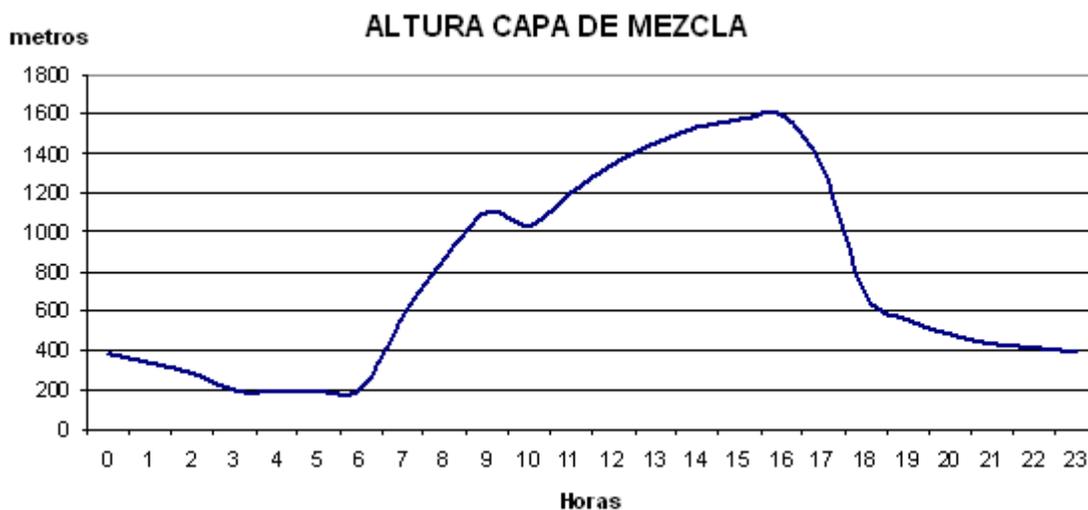


Figura 49. Ejemplo de distribución horaria de la altura de la capa de mezcla para determinada zona de estudio

7.6.6. CONTENIDO DE UN INFORME DE CAMPAÑAS DE MONITOREO

Un informe sobre una campaña de monitoreo de calidad del aire debe tener como pautas mínimas, aquellas que le den información a las entidades o entes ambientales para tomar medidas de vigilancia, inspección y evaluación, permitiendo con ello, evaluar las acciones de los Programas de Reducción de la Contaminación y así orientar su gestión en prevenir, controlar y mejorar las condiciones prevalecientes en cada una de ellas, o en su caso, rediseñar los instrumentos de política. Adicionalmente, es importante que los informes de campañas de monitoreo permitan comparar los resultados entre campañas, bien sea en un mismo punto, a través del tiempo, o en diferentes puntos en un mismo lapso de tiempo.

Estos informes deben contener como pautas mínimas las indicadas a continuación:

1. Fecha y hora de inicio y finalización de la medición. Para el caso de la hora de inicio, de acuerdo a lo establecido en los métodos de calidad de aire establecidos en este protocolo.
2. Responsable del informe. Razón Social o Nombre del responsable, Cedula o NIT, número de identificación, entre otros.
3. Resolución de acreditación expedida por el IDEAM.
4. Objetivos y Alcances.
5. Localización de la medición (Georeferenciada y con registro fotográfico).
6. Propósito de la medición.
7. Análisis de la normatividad vigente e información previa.
8. Tipo de instrumentación utilizada.
9. Equipo de medición utilizado, incluyendo números de serie.
10. Datos de calibración, ajuste del instrumento de medida y fecha de vencimiento del certificado de calibración del equipo.
11. Procedimiento de medición utilizada para cada contaminante.
12. Descripción de las fuentes de emisión en campo: Identificación de las fuentes de emisión y el estado en el que se encuentran en el momento de hacer las mediciones.
13. Condiciones atmosféricas (dirección y velocidad del viento, lluvia, temperatura, presión atmosférica, humedad).
14. Resultados numéricos y comparación con la normatividad aplicada.
15. Descripción de los tiempos de medición.
16. Descripción de los contaminantes a medir.
17. Análisis de los Resultados.
18. Conclusiones y recomendaciones.
19. Bibliografía.
20. Copia de los certificados de calibración de los equipos.

7.6.7. ÍNDICE NACIONAL DE CALIDAD DE AIRE

El Índice de Calidad del Aire (ICA) permite comparar los niveles de contaminación de calidad del aire, de las estaciones que pertenecen a un SVCA. Es un indicador de la calidad del aire diaria. El ICA corresponde a una escala numérica a la cual se le asigna un color, el cual a su vez tiene una relación con los efectos a la salud. El Índice de calidad del aire ha sido adoptado a partir del documento Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality -the Air Quality Index (AQI) documento EPA-454/B-09-001 de febrero de 2009.

El índice de calidad del aire está enfocado en cinco contaminantes principales: Ozono, material particulado, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono. El logotipo que se muestra en la Figura 50 identifica en ICA en el país.



Figura 50. Logosimbolo ICA

7.6.7.1. Contaminantes del índice nacional de calidad del aire

Teniendo en cuenta los contaminantes que son monitoreados en el país, las características de los combustibles que se distribuyen y los equipos que actualmente se encuentran en las SVCA, los contaminantes a tener en cuenta son los siguientes: PM10, PM2.5, SO₂, NO₂, O₃ y CO.

7.6.7.2. Rangos del índice nacional de calidad del aire

El ICA corresponde a un valor adimensional, que oscila entre 0 y 500. En la Tabla 34 se presentan los rangos cualitativos, los efectos a la salud y el valor del ICA y en la Tabla 35 se presentan las acciones preventivas que se deben tener en cuenta, de acuerdo al valor del ICA.

7.6.7.3. Puntos de corte del índice nacional de calidad del aire

Teniendo en cuenta que el ICA tiene una correlación directa con los efectos en la salud, los puntos de corte del ICA son los límites correspondientes a efectos entre la salud y la calidad del aire. En este caso, se utiliza la información reportada por la EPA que presenta dichas relaciones. En la Tabla 33 se presentan los puntos de corte del ICA, de acuerdo con los efectos sobre la salud reportados por estudios de la EPA (2005).

Tabla 33. Puntos de corte del ICA

ICA	COLOR	CLASIFICACIÓN	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h Ppm (1)	PM ₁₀ 24h µg/m ³	PM _{2.5} 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
0 - 50	Verde	Buena	0,000 0,059	-	0 54	0,0 15,4	0,0 4,4	0,000 0,034	(2)
51-100	Amarillo	Moderada	0,060 0,075	-	55 154	15,5 40,4	4,5 9,4	0,035 0,144	(2)
101 - 150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	0,076 0,095	0,125 0,164	155 254	40,5 65,4	9,5 12,4	0,145 0,224	(2)
151 - 200	Rojo	Dañina a la salud	0,096 0,115	0,165 0,204	255 354	65,5 150,4	12,5 15,4	0,225 0,304	(2)
201 - 300	Púrpura	Muy Dañina a la salud	0,116 0,374 (0,155 0,404) (4)	0,205 0,404	355 424	150,5 250,4	15,5 30,4	0,305 0,604	0,65 1,24
301-400	Marrón	Peligrosa	(3)	0,405 0,504	425 504	250,5 350,4	30,5 40,4	0,605 0,804	1,25 1,64
401-500	Marrón	Peligrosa	(3)	0,505 0,604	505 604	350,5 500,4	40,5 50,4	0,805 1,004	1,65 2,04

(1) Para O₃ se calculará el índice usando promedios de 8 horas y de 1 hora.

(2) Para NO₂ se tendrán en cuenta valores únicamente por encima de 200 teniendo en cuenta que han sido tomado de valores y parámetros EPA.

(3) Valores de concentraciones de 8 horas de ozono no definen valores más altos de ICA (≥301). Los valores de ICA de 301 o mayores serán calculados con concentraciones de 1 hora de ozono.

(4) Los números entre paréntesis se asocian valores de 1 hora que se utilizarán en esta categoría sólo si se superponen.

7.6.7.4. Cálculo del índice nacional de calidad del aire

El ICA será calculado a partir de la siguiente ecuación, que corresponde a la metodología utilizada por la EPA para el cálculo del AQI y será reportado el mayor valor que se obtenga del cálculo de cada uno de los contaminantes medidos.

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}}(C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo}$$

Donde:

I_p = Índice para el contaminante p

C_p = Concentración medida para el contaminante p

BP_{Hi} = Punto de corte mayor o igual a C_p

BP_{Lo} = Punto de corte menor o igual a C_p

I_{Hi} = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente al BP_{Hi}

I_{Lo} = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente al BP_{Lo}

Tabla 34. Efectos a la salud de acuerdo con el rango y valor del Índice de Calidad del Aire

ICA	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h ppm	PM10 24h µg/m ³	PM2.5 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
0 - 50 Buena	Ninguno		Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	
51-100 Moderada	Individuos no sensibles pueden experimentar síntomas respiratorios		Posibles síntomas respiratorios en individuos sensibles. Posible agravamiento de enfermedad del corazón o de pulmón en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores	Posibles síntomas respiratorios en individuos sensibles. Posible agravamiento de enfermedad del corazón o de pulmón en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores	Ninguno	Ninguno	
101 - 150 Dañina a la salud para grupos sensibles	Incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas y molestias respiratorias en niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias, como asma		Aumento de riesgo de síntomas respiratorios en individuos sensibles, agravamiento de enfermedad del corazón o de pulmón y mortalidad prematura en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores	Aumento de riesgo de síntomas respiratorios en individuos sensibles, agravamiento de enfermedad del corazón o de pulmón y mortalidad prematura en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores	Incremento de la probabilidad de reducir la tolerancia al ejercicio debido al aumento de los síntomas cardiovasculares, tal como, dolores de pecho en personas con enfermedades cardiovasculares	Incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas respiratorios, tales como opresión en el pecho y dificultad al respirar en personas con asma	
151 - 200 Dañina a la salud	Mayor probabilidad de ocurrencia de síntomas respiratorios y dificultad para respirar en niños activos, adultos y personas con enfermedad respiratoria, como asma; posibles efectos respiratorios de la población en general		Incremento de los síntomas respiratorios y recrudecimiento de las enfermedades pulmonares tales como asma; posibles efectos respiratorios en la población en general	Incremento de los síntomas respiratorios y recrudecimiento de las enfermedades pulmonares tales como asma; posibles efectos respiratorios en la población en general	Reducción de la tolerancia al ejercicio debido al incremento de los síntomas cardiovasculares como dolor de pecho en personas con enfermedad cardiovascular	Incremento de síntomas respiratorios, tales como opresión en el pecho y jadeo en personas con asma; posible recrudecimiento de enfermedades cardíacas y pulmonares	
201 - 300 Muy	Síntomas cada vez más severos y respiración		Aumento significativo en síntomas	Aumento significativo en síntomas	Recrudecimiento significativo de los síntomas	Aumento significativos en síntomas	Incremento de la probabilidad de ocurrencia

PROTOCOLO | 137

ICA	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h ppm	PM10 24h µg/m ³	PM2.5 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
Dañina a la salud	deteriorada probablemente en niños, adultos y personas activas con enfermedad respiratoria, como asma; incremento en la probabilidad de efectos respiratorios en la población en general		respiratorios y aumento de la gravedad de enfermedades pulmonares como asma; incremento de la probabilidad de ocurrencia de efectos respiratorios para la población en general	respiratorios y aumento de la gravedad de enfermedades pulmonares como asma; incremento de la probabilidad de ocurrencia de efectos respiratorios para la población en general	cardiovasculares, como dolores en el pecho en personas con enfermedades cardiovasculares	respiratorios tales como jadeo y respiración corta en personas con asma; recrudecimiento de enfermedades cardiacas y pulmonares	de síntomas respiratorios; dificultad para respirar en niños y personas con enfermedades respiratorias como asma
301-500	Efectos respiratorios severos, daños respiratorios en niños activos, adultos y personas con enfermedad respiratoria como asma; incremento de los efectos respiratorios severos probables en la población en general		Riesgo serio de síntomas respiratorios y recrudecimiento de enfermedades pulmonares como asma; probables efectos respiratorios en la población en general	Riesgo serio de síntomas respiratorios y recrudecimiento de enfermedades pulmonares como asma; probables efectos respiratorios en la población en general	Agravación seria de los síntomas cardiovasculares, tal como dolor de pecho en personas con enfermedades cardiovasculares, deterioro de las actividades enérgicas en la población en general	Síntomas respiratorios severos como jadeo y disminución de la respiración en personas con asma; incremento de la gravedad de enfermedades cardiacas y pulmonares; posibles efectos respiratorios en la población general	Mayor incremento de la probabilidad de síntomas respiratorios y dificultades respiratorias en niños y personas con enfermedades respiratorias como asma

Fuente: EPA, 2009.

Tabla 35. Acciones preventivas de acuerdo al rango y al valor del Índice de Calidad del Aire

ICA	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h ppm	PM10 24h µg/m ³	PM2.5 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
0 - 50 Buena	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
51-100 Moderada			Personas extremadamente sensibles con asma y adultos con enfermedad cardiovascular como hipertensión arterial, enfermedad isquémica del miocardio o pulmonar como asma, enfisema y bronquitis crónica	Personas extremadamente sensibles con asma y adultos con enfermedad cardiovascular como hipertensión arterial, enfermedad isquémica del miocardio o pulmonar como asma, enfisema y bronquitis crónica			

PROTOCOLO | 138

ICA	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h ppm	PM10 24h µg/m ³	PM2.5 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
			deben reducir la actividad física fuerte o prolongada	deben reducir la actividad física fuerte o prolongada			
101 - 150 Dañina a la salud para grupos sensibles	Niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias como asma, deben reducir la actividad física al aire libre		Personas con enfermedades cardíacas o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar la actividad física fuerte o prolongada	Personas con enfermedades cardíacas o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar la actividad física fuerte o prolongada	Personas con enfermedades cardiovasculares como la angina deben reducir la actividad física y las fuentes de CO como el tráfico pesado	Personas con asma deben considerar reducir la actividad al aire libre	
151 - 200 Dañina a la salud	Niños y adultos activos y personas con enfermedades respiratorias, deben reducir la actividad física prolongada al aire libre, especialmente los niños.		Personas con enfermedades cardiovascular o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar actividad física fuerte o prolongada	Personas con enfermedades cardiovascular o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar actividad física fuerte o prolongada	Personas con enfermedades cardiovasculares como la angina, deben reducir moderadamente el esfuerzo y evitar la exposición a fuentes de CO como el tráfico pesado	Los niños, los asmáticos y las personas con enfermedades cardíacas y pulmonares deben reducir el esfuerzo al aire libre	
201 - 300 Muy Dañina a la salud	Niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias como asma, deben reducir la actividad física al aire libre; especialmente los niños		Personas con enfermedades cardíacas o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar cualquier actividad física en exteriores. Las demás personas deben evitar la actividad fuerte o prolongada	Personas con enfermedades cardíacas o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar cualquier actividad física en exteriores. Las demás personas deben evitar la actividad fuerte o prolongada	Personas con enfermedades cardiovasculares como la angina, deben reducir el esfuerzo y evitar la exposición a fuentes de CO como el tráfico pesado	Niños, asmáticos y personas con enfermedades cardíacas y pulmonares deben evitar el esfuerzo al aire libre; todos los demás deben reducir el esfuerzo al aire libre	Niños y personas con enfermedades respiratorias como asma deben reducir el esfuerzo al aire libre
301-500	Todas las personas deben evitar el esfuerzo al aire libre		Todas las personas deben evitar el esfuerzo al aire libre	Todas las personas deben evitar el esfuerzo al aire libre	Personas con enfermedades cardiovasculares como la angina, deben reducir el esfuerzo y evitar la exposición a fuentes de CO como el tráfico pesado; todos los demás deben limitar el esfuerzo	Niños, asmáticos y personas con enfermedades cardíacas o pulmonares no deben estar al aire libre; todos los demás deben evitar el esfuerzo al aire libre	Niños y personas con enfermedades respiratorias como asma, deben reducir el esfuerzo moderado o pesado al aire libre

Fuente: EPA, 2009.

7.6.8. CONTENIDO DE UN PLAN DE CALIDAD

Un Plan de Calidad es el documento donde se detallan todas las actividades relacionadas con la vigilancia, control y medición de los niveles de concentración de contaminantes atmosféricos. La redacción, elaboración y aprobación del Plan de Calidad debe ser ejecutada antes de iniciar la operación o ajuste de cualquier Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA).

El contenido de todo Plan de Calidad debe incluir como mínimo:

1. Generalidades: Esta sección está relacionada con la descripción de los objetivos del documento que se presenta, es decir, los objetivos de contar con un plan de calidad. Debe incluir una sección de control del manual y registro donde se debe registrar la fecha de elaboración y las posteriores fechas de modificaciones al documento, en caso que se presenten, y finalmente debe incluir una breve descripción del SVCA que representa (Cantidad de estaciones, tipo de tecnología, ubicación específica y detallada de las mismas, objetivos de los monitoreos del SVCA, entre otras).
2. Estructura y Responsabilidad: Se debe definir el organigrama del programa de monitoreo y seguimiento de calidad del aire, al cual obedece la creación del respectivo SVCA; en esta sección se deberán incluir los cargos y las responsabilidades de todas las personas que participen en la ejecución del proyecto.
3. Objetivos de Aseguramiento de Calidad: Presentación de los objetivos del SVCA, los objetivos de calidad y los objetivos de control de calidad en términos precisión, exactitud e integridad.
4. Procedimientos de Medición: Descripción detallada de los métodos y procedimientos de medición que se emplearán en la operación del SVCA.
5. Cadena de Custodia: Descripción detallada de los procedimientos de empaque, marcado y transporte de las muestras o reportes de los equipos.
6. Procedimientos de Revisión y Calibración: Descripción de los procesos de calibración de los equipos.
7. Análisis de Datos, Validación y Reporte: Descripción detallada de los procesos a realizar por el personal del SVCA, relacionado con los análisis, validación y elaboración de informes.
8. Control de Calidad Interno: Definición de los procedimientos para el control de calidad como por ejemplo el chequeo de calidad en el pesaje y otras actividades relacionadas con el monitoreo de la calidad del aire.
9. Auditorías de Desempeño del Sistema: Definición del desarrollo de las posibles auditorías al SVCA durante su operación (evaluación del cumplimiento de objetivos, evaluación de la capacidad del personal que opera el SVCA, evaluación de operación interna y evaluación de desempeño).
10. Mantenimiento Preventivo: Definición de las acciones para los mantenimientos preventivos de los equipos que hacen parte del SVCA.
11. Reportes de Aseguramiento de Calidad: Definición del tipo y contenido de los informes que serán presentados a la dirección del SVCA, en el momento de realizarse algún tipo de auditoría.

8. BIBLIOGRAFÍA

U.S. Environmental Protection Agency. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1. Ambient Air Quality Monitoring Program Quality System Development. EPA-454/R-98-004. Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, NC 27711. August 1998.

Central Pollution Control Board & ASEM – GTZ. Conceptual Guidelines and Common Methodology for Air Quality Monitoring, Emission Inventory & Source Apportionment Studies for Indian Cities. Parivesh Bhawan, East Arjun Nagar, Delhi - 110 032. Draft, 2006.

Universidad de Chile y Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente. Elaboración de Reglamentos y Protocolos de Procedimientos para el Aseguramiento de la Calidad del Monitoreo de Contaminantes Atmosféricos. Informe final, informe técnico LMA-030-2003 preparado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, Chile. Diciembre 2003.

Ministry for the Environment. Good-Practice Guide for Air Quality Monitoring and Data Management. Prepared and published by the Ministry for the Environment, Wellington, New Zealand, PO Box 10 362. December 2000.

Dirección General de Salud Ambiental - DIGESA, Ministerio de Salud del Perú. Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los Datos. Perú. 2005.

U.S. Environmental Protection Agency. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume I, Principles. EPA-600/9-76-005. Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, NC 27711. 1976.

U.S. Environmental Protection Agency. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume II, Ambient Air Specific Methods. EPA-600/4-77-027a. Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, NC 27711. 1977.

U.S. Environmental Protection Agency. A Procedure for Establishing Traceability of Gas Mixtures to Certain National Bureau of Standards Standard Reference Materials. EPA-600/7-81-010. Environmental Monitoring Systems Laboratory (MD-77), Research Triangle Park, NC 27711, January 1981.

DASQUPTA, P. K. and DECESARE, K. B. Stability of Sulfur Dioxide in Formaldehyde and Its Anomalous Behavior in Tetrachloromercurate (II). Submitted for publication in *Atmospheric Environment*, 1982.

WEST, P. W. and GAEKE, G. C. Fixation of Sulfur Dioxide as Disulfatomercurate (II) and Subsequent Colorimetric Estimation. *Anal. Chem.*, 28:1816, 1956.

EPHRAIM, F. Inorganic Chemistry. P. C. L. Thorne and E.R. Roberts, Eds., 5th Edition, Interscience, 1948, p. 562.

LYLES, G. R.; DOWLING, F. B. and BLANCHARD, V. J. Quantitative Determination of Formaldehyde in the Parts per Hundred Million Concentration Level. *J. Air. Poll. Cont. Assoc.*, Vol. 15(106), 1965.

McKEE, H. C.; CHILDERS, R. E. and SAENZ, O. Jr. Collaborative Study of Reference Method for Determination of Sulfur Dioxide in the Atmosphere (Pararosanilina Method). EPA-APTD-0903, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, September 1971.

URONE, P.; EVANS, J. B. and NOYES, C. M. Tracer Techniques in Sulfur–Air Pollution Studies Apparatus and Studies of Sulfur Dioxide Colorimetric and Conductometric Methods. *Anal. Chem.*, 37: 1104, 1965.

BOSTROM, C. E. The Absorption of Sulfur Dioxide at Low Concentrations (pphm) Studied by an Isotopic Tracer Method. *Intern. J. Air Water Poll.*, 9:333, 1965.

SCARINGELLI, F. P.; SALTZMAN, B. E. and FREY, S. A. Spectrophotometric Determination of Atmospheric Sulfur Dioxide. *Anal. Chem.*, 39: 1709, 1967.

PATE, J. B.; AMMONS, B. E.; SWANSON, G. A. and LODGE, J.P. Jr. Nitrite Interference in Spectrophotometric Determination of Atmospheric Sulfur Dioxide. *Anal. Chem.*, 37:942, 1965.

ZURLO, N. and GRIFFINI, A. M. Measurement of the Sulfur Dioxide Content of the Air in the Presence of Oxides of Nitrogen and Heavy Metals. *Medicina Lavoro*, 53:330, 1962.

REHME, K. A. and SCARINGELLI, F. P. Effect of Ammonia on the Spectrophotometric Determination of Atmospheric Concentrations of Sulfur Dioxide. *Anal. Chem.*, 47:2474, 1975.

McCOY, R. A.; CAMANN, D. E. and McKEE, H. C. Collaborative Study of Reference Method for Determination of Sulfur Dioxide in the Atmosphere (Pararosanilina Method) (24-Hour Sampling). EPA-650/4-74-027, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, December 1973.

FUERST, R. G. Improved Temperature Stability of Sulfur Dioxide Samples Collected by the Federal Reference Method. EPA-600/4-78-018, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, April 1978.

SCARINGELLI, F. P.; ELFERS, L.; NORRIS, D. and HOCHHEISER, S. Enhanced Stability of Sulfur Dioxide in Solution. *Anal. Chem.*, 42:1818, 1970.

MARTIN, B. E. Sulfur Dioxide Bubbler Temperature Study. EPA-600/4-77-040, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, August 1977.

American Society for Testing and Materials. ASTM Standards, Water; Atmospheric Analysis. Part 23. Philadelphia, PA, October 1968, p. 226.

O'KEEFFE, A. E. and ORTMAN, G. C. Primary Standards for Trace Gas Analysis. *Anal. Chem.*, 38:760, 1966.

SCARINGELLI, F. P.; FREY, S. A. and SALTZMAN, B. E. Evaluation of Teflon Permeation Tubes for Use with Sulfur Dioxide. *Amer. Ind. Hygiene Assoc. J.*, 28:260, 1967.

SCARINGELLI, F. P.; O'KEEFFE, A. E.; ROSENBERG, E. and BELL, J. P. Preparation of Known Concentrations of Gases and Vapors With Permeation Devices Calibrated Gravimetrically. *Anal. Chem.*, 42:871, 1970.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM. Variables del Sub-Sistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) y procedimientos para validar la

información generada por las redes de calidad del aire. 2006.

MONTGOMERY, Douglas. Diseño y Análisis de Experimentos. Segunda edición; México: Limusa Wiley. 2004.

MONTGOMERY, Douglas. Control Estadístico de la Calidad. Tercera edición; México: Limusa Wiley. 2006.

DAMA. Informe de técnicas y estrategias de monitoreo utilizadas por el DAMA en sus estaciones de monitoreo ambiental.

Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume II—Ambient Air Specific Methods, EPA-600/4-77-027a, U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Research Triangle Park, NC 27711, 1977.

A procedure for Establishing Traceability of Gas Mixtures to Certain National Bureau of Standards Standard Reference Materials. EPA-600/7-81-010, U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory (MD-77), Research Triangle Park, NC 27711, January 1981.

INTERNET

Diccionario Estadístico del Data Mining Institute, S.L. Madrid, España; [on line]: <http://www.estadistico.com/dic.html>

Tutorial relacionado con la ley de Lambert - Beer. [on line]: <http://teaching.shu.ac.uk/hwb/chemistry/tutorials/molspec/beers1.htm>

Equipos y sistemas de evaluación continua de contaminantes atmosféricos. [on line]: http://www.personal.us.es/jmorillo/medicion5/evaluacion_continua_resumen.pdf