

DESARROLLO Y VALIDACIÓN DEL MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO
PARA LA DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE DIÓXIDO DE AZUFRE Y
DIÓXIDO DE NITRÓGENO MEDIANTE EL MÉTODO DE LA PARAROSANILINA
Y ARSENITO DE SODIO EN EL MARCO DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE
CALIDAD DE AIRE PARA LA CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO

HUGO NELSON ESPINOSA BURBANO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE QUÍMICA
SAN JUAN DE PASTO
2009

DESARROLLO Y VALIDACIÓN DEL MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO
PARA LA DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE DIÓXIDO DE AZUFRE Y
DIÓXIDO DE NITRÓGENO MEDIANTE EL MÉTODO DE LA PARAROSANILINA
Y ARSENITO DE SODIO EN EL MARCO DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE
CALIDAD DE AIRE PARA LA CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO

HUGO NELSON ESPINOSA BURBANO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de Químico

Director, Ing. JAIRO LASSO MEJÍA

Asesor, Ph.D. FREDDY PANTOJA CADENA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE QUÍMICA
SAN JUAN DE PASTO
2009

“Las ideas y conclusiones aportadas en este trabajo de grado, son responsabilidad de su autor”.

Artículo 1º del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

Director

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, Noviembre de 2009

DEDICATORIA

A mi mamá y mis hermanos, por su comprensión y paciencia.

AGRADECIMIENTOS

A mi mayor inspiración, DIOS que es mi Padre, Maestro, Guía y la luz de mi vida.

A mi mamá por todo su apoyo, incentivo y principalmente por la certeza de victoria en todos los momentos de mi vida.

Al ingeniero Jairo Lasso Mejía, por su orientación y por todas sus ideas importantes para la realización de este trabajo, contribuyendo así a una visión más clara de los objetivos a ser alcanzados.

A los jurados evaluadores por el tiempo dedicado a la revisión del presente trabajo de grado, y por sus orientaciones y sugerencias para el mejoramiento del documento final.

A Alejandra Lorza Montenegro por todo su apoyo, cariño y toda su comprensión en los momentos más difíciles de mi vida.

A mis amigos Mario Cabrera, Diana Bacca, Sandra Estrada y Cristian Luna, por su amistad incondicional y su ardo trabajo durante estos 6 años de estudio.

A los profesores y laboratoristas del programa de Química, en especial a los profesores Jesús Cabrera y Freddy Pantoja.

A CORPONARIÑO por haberme facilitado la realización de mi trabajo de grado en sus instalaciones.

A la Universidad Nariño por aporta a mi desarrollo integral y conocimiento espiritual.

Y finalmente, a todos los que colaboraron directa e indirectamente para la realización de este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	26
2. OBJETIVOS	27
2.1 OBJETIVO GENERAL	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3. MARCO TEÓRICO	28
3.1 EFECTOS EN LA SALUD DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	29
3.1.1 Dióxido de azufre	30
3.1.2 Dióxido de nitrógeno	30
3.1.3 Lluvia ácida	31
3.1.4 Metales pesados	32
4. ESTADO DEL ARTE	33
4.1 LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE, UN PROBLEMA MUNDIAL	33
4.2 EL PROBLEMA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LAS CIUDADES	36
4.3 CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	38
4.3.1 Los efectos en la salud humana	38
4.3.1.1 Óxidos de nitrógeno	40
4.3.1.2 Óxidos de azufre	42
4.4 LA LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	43
4.4.1 La gestión de los recursos atmosféricos	45

4.4.2	La aplicación de los mejores medios practicables	45
4.4.3	La combinación de ambos enfoques	45
5.	MARCO LEGAL	47
5.1	LEGISLACIÓN LEGAL	47
5.1.1	Normatividad nacional	48
5.1.1.1	Normas de calidad del aire	49
5.1.2	El Índice de la Calidad del Aire (ICA)	51
6.	MARCO GEOGRÁFICO	54
6.1	ASPECTOS GEOGRÁFICOS DE LA CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO	54
6.2	EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN LA CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO	56
7.	CALIDAD DE AIRE EN LA CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO	58
8.	METODOLOGÍA	60
8.1	ÁREA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO	60
8.2	PARÁMETROS SELECCIONADOS	60
8.3	SITIOS DE MEDICIÓN	60
8.4	PERIODO DE MEDICIÓN	61
8.5	EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS	61
8.5.1	Muestreador APV TRIGAS	62
8.5.1.1	Procedimiento de muestreo con el equipo APV TRIGAS	63
8.5.2	Espectrofotómetro UV/VIS	64
8.6	MÉTODOS	65
8.6.1	Calibración del equipo APV TRIGAS	65
8.6.2	Estandarización del método espectrofotométrico	66

8.6.3 Toma de muestras	66
8.7 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE DIÓXIDO DE AZUFRE	66
8.7.1 Tratamiento de las muestras de dióxido de azufre	66
8.7.2 Preparación de las soluciones patrón	66
8.8 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO	67
8.8.1 Tratamiento de las muestras de dióxido de nitrógeno	67
8.8.2 Preparación de las soluciones patrón	67
8.9 PREVALIDACIÓN DEL MÉTODO ANALÍTICO	68
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
9.1 ESTANDARIZACIÓN DE LA TÉCNICA ESPECTROFOTOMÉTRICA	70
9.1.1 Estandarización de la técnica espectrofotométrica para el dióxido de azufre	70
9.1.2 Estandarización de la técnica espectrofotométrica para el dióxido de nitrógeno	71
9.1.3 Linealidad	71
9.1.4 Sensibilidad	71
9.1.5 Precisión y repetibilidad	72
9.1.6 Límite de cuantificación para el dióxido de azufre	72
9.1.7 Límite de cuantificación para el dióxido de nitrógeno	72
9.1.8 Límite de detección para el dióxido de azufre	72
9.1.9 Límite de detección para el dióxido de nitrógeno	72
9.2 ANÁLISIS QUÍMICO	72
9.2.1 Determinación de dióxido de azufre en la atmósfera	72
9.2.2 Determinación de dióxido de nitrógeno en la atmósfera	73

9.3 RESULTADOS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO	74
9.3.1 Dióxido de azufre	75
9.3.2 Dióxido de nitrógeno	76
9.3.3 Índice de Calidad de Aire, ICA	76
10. CONCLUSIONES	78
11. RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXOS	84

LISTA DE ACRÓNIMOS

APV Muestreador de Pequeño Volumen (Amostrador de Pequeño Volume)
BaOH Hidróxido de Bario
CAAA Departamento de Leyes del Aire Limpio (Clear Air Act Amendments)
CFC Clorofluorocarbonados
CH₄ Metano
cm Centímetros
CO Monóxido de Carbono
COTs Compuestos Orgánicos Totales
CV Coeficiente de Variación
DAMA Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente
DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadística
EDTA Ácido Etilendiaminotetracético
EPA Agencia de Protección Ambiental
EPOC Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica
etc Etcétera
g Gramos
GPS Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)
H₂O₂ Peróxido de Hidrógeno
H₂SO₄ Ácido Sulfúrico
H₃NO₃S Ácido Sulfámico
H₃PO₄ Ácido Fosfórico
HC Hidrocarburos
HCl Ácido Clorhídrico
Hg Mercurio
HgCl₂ Cloruro Mercúrico
Hgl₂ Yoduro Mercúrico
ICA Índice de Calidad del Aire
IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
KCl Cloruro de Potasio
KI Yoduro de Potasio
KIO₃ Yodato de Potasio
Km Kilómetros
Km² Kilómetros cuadrados
KMnO₄ Permanganato de Potasio
KPa Kilopascales
L Litro
M Molar
m Metro
m³ Metros cúbicos
MAVDT Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

mg Miligramos
min Minutos
mL Mililitros
mm Milímetros
msnm Metros sobre el nivel del mar
N Normal
N₂ Nitrógeno
N₂O Óxido Nitroso
Na₂CO₃ Carbonato de Sodio
Na₂S₂O₃ Tiosulfato de Sodio
Na₂S₂O₅ Metabisulfito de Sodio
NaAsO₂ Arsenito de Sodio
NaOH Hidróxido de Sodio
NEDA N-(1-naftil)-etilendiamina
nm Nanómetros
NO Monóxido de Nitrógeno
NO₂ Dióxido de Nitrógeno
NO_x Óxidos de Nitrógeno
N^o Número
O₂ Oxígeno
O₃ Ozono
°C Grados centígrados
OMS Organización Mundial de la Salud
PAN Nitratos de Peroxiacetilo
POT Plan de Ordenamiento Territorial
PARA Pararosanilina
pH Potencial de Hidrógeno
PM Material Particulado
PM₁₀ Material Particulado de 10 micras
PM_{2,5} Material Particulado de 2,5 micras
ppb Partes por billón
ppm Partes por millón
R² Coeficiente de correlación
RMCAP Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Pasto
RSD Desviación Estándar Relativa
SINA Sistema Nacional Ambiental
SO₂ Dióxido de Azufre
SO₃ Trióxido de Azufre
SO_x Óxidos de Azufre
SS Solución de Sulfito
TMC Tetracloromercurato
Ton Tonelada
TSP Partículas Totales Suspendidas
U.S. Estados Unidos
UV Ultravioleta

Vis Visible

W Peso

μg Microgramos

% Porcentaje

> Mayor que

< Menor que

\pm Más o menos

λ Longitud de onda

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Localización de las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Pasto.	25
Tabla 2. Aporte de contaminantes por tipo de vehículos en la zona centro de San Juan de Pasto.	29
Tabla 3. Los gases causantes del efecto invernadero.	35
Tabla 4. Niveles promedio de 24 horas de mezclas de contaminación atmosférica conteniendo SO ₂ y partículas en suspensión por encima de los cuales se pueden esperar efectos agudos sobre la salud humana.	43
Tabla 5. Normas de calidad de aire.	50
Tabla 6. Normas de calidad de aire para la ciudad de San Juan de Pasto	51
Tabla 7. Índice de Calidad del Aire (ACI).	52
Tabla 8. Categoría de calidad para ACI y sus efectos en la salud.	53
Tabla 9. Parámetros de las estaciones de monitoreo de la RMCAP.	60
Tabla 10. Volúmenes de las soluciones patrón de sulfito-TCM.	67
Tabla 11. Volúmenes de las soluciones patrón de nitrito de sodio.	68
Tabla 12. Parámetro de precisión (repetibilidad) para el SO ₂ .	92
Tabla 13. Parámetro de precisión (repetibilidad) para el NO ₂ .	93
Tabla 14. Parámetro de límite de detección para SO ₂ y NO ₂ .	93
Tabla 15. Parámetro de coeficiente de variación para SO ₂ y NO ₂ .	93
Tabla 16. Concentración de dióxido de azufre y nitrógeno.	94
Tabla 17. Resumen estadístico de las concentraciones de SO ₂ y NO ₂ en las tres estaciones de monitoreo.	95
Tabla 18. Categoría de calidad de aire para SO ₂ y NO ₂ .	96
Tabla 19. Nivel de contaminación para SO ₂ y NO ₂ .	97

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Imagen satelital del hueco de la capa de ozono en la Antártida.	34
Fotografía 2. Las congestiones vehiculares son una situación común en Todos los países en desarrollo.	37
Fotografía 3. Los Ángeles en un día de verano.	42
Fotografía 4. Panorámica de la ciudad de San Juan de Pasto.	55
Fotografía 5. Trafico vehicular en el centro de la ciudad de San Juan de Pasto	57
Fotografía 6. Equipo muestreador APV TRIGAS.	62
Fotografía 7. Espectrofotómetro UNICAM UV-VIS 2-100 UH 15.	64

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa geográfico de la ciudad de San Juan de Pasto.	54
Figura 2. Ubicación geográfica de las estaciones de la RMCAP.	59
Figura 3. Esquema del equipo muestreador APV TRIGAS.	63
Figura 4. Curva de calibración para el dióxido de azufre (λ 548 nm).	70
Figura 5. Curva de calibración para el dióxido de nitrógeno (λ 540 nm).	71
Figura 6. Comportamiento de la concentración de SO ₂ en 30 días.	75
Figura 7. Comportamiento de la concentración NO ₂ en 30 días.	76
Figura 8. Comportamiento de la concentración SO ₂ en la Estación 1.	89
Figura 9. Comportamiento de la concentración NO ₂ en la Estación 1.	90
Figura 10. Comportamiento de la concentración SO ₂ en la Estación 2.	90
Figura 11. Comportamiento de la concentración NO ₂ en la Estación 2.	91
Figura 12. Comportamiento de la concentración SO ₂ en la Estación 3.	91
Figura 13. Comportamiento de la concentración NO ₂ en la Estación 3.	92

LISTA DE ESQUEMAS

	Pág.
Esquema 1. Formación del ozono.	41
Esquema 2. Reacción del ozono con hidrocarburos.	41
Esquema 3. Formación de nitrato de peroxiacetilo (PAN).	41
Esquema 4. Formación del complejo diclorosulfitomercurato (II).	72
Esquema 5. Formación del ácido metilsulfámico de pararosanilina.	73
Esquema 6. Reacción de Griess. Formación del colorante azoico.	74

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Preparación de los reactivos utilizados para la determinación de SO ₂ y NO ₂ en el muestreo de campo y en el análisis químico en el laboratorio.	84
Anexo B. Parámetros de estandarización del método espectrofotométrico.	89
Anexo C. Resultados de la calidad de aire en la ciudad de San Juan de Pasto	94
Anexo D. Formatos de muestreo y formatos de calibración del equipo muestreador APV TRIGAS.	98

RESUMEN

En el presente trabajo, se presentan los resultados y el análisis de la determinación cuantitativa de las concentraciones de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en el aire ambiente de San Juan de Pasto. Las muestras fueron recolectadas en las tres estaciones que conforman la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Pasto (RMCAP), durante los meses de agosto y septiembre de 2009.

Las concentraciones promedio de SO₂ (29,2, 35,1 y 19,7 µg/m³) encontradas durante el periodo de 30 días de medición en las tres estaciones de muestreo cumplen con la norma diaria de calidad del aire para la ciudad de Pasto (191 µg/m³).

Las concentraciones promedio de NO₂ (20, 23,9 y 14,7 µg/m³) encontradas durante el periodo de 30 días de medición en los tres puntos de muestreo cumplen con la norma diaria de calidad del aire para la ciudad de Pasto (115 µg/m³).

El ICA empleado establece que la calidad del aire se encuentra en la categoría "Buena" y en un nivel de contaminación "Bajo". Lo anterior ratifica que la ciudad de San Juan de Pasto, no presenta problemas de contaminación del aire por los contaminantes monitoreados (SO₂ y NO₂).

Palabras claves: dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, calidad de aire.

ABSTRACT

In the present work, there appear the results and the analysis of the quantitative determination of the concentrations of sulfur dioxide and nitrogen dioxide in the air of San Juan de Pasto. The samples were taken on all three stations that shape the Net Monitoring Air Quality in Pasto (RMCAP), during the months of August and September 2009.

The average concentrations of SO₂ (29,2, 35,1 and 19,7 µg/m³) found during the 30 days of measurement in the three sampling stations comply with the standard daily air quality for the city of Pasto (191 µg/m³).

The average concentrations of NO₂ (20, 23,9 and 14,7 µg/m³) found during the 30 days of measurement in the three sampling points meet the standard daily air quality for the city of Pasto (115 µg/m³).

The ICA provides that employee air quality is in the category "Good" and a pollution level "Low". This confirms that the city of Pasto, no problem of air pollution monitored pollutants (SO₂ and NO₂).

Key words: sulfur dioxide, nitrogen dioxide, air quality.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica se define como el fenómeno de acumulación o concentración de contaminantes, definidos estos últimos como fenómenos físicos sustancias o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente.

Las fuentes de contaminación atmosférica se clasifican en naturales y antropogénicas. Las naturales siempre han existido, mientras que las antropogénicas, como su nombre lo indica, son causadas por las actividades humanas. Sobre una base global, las emisiones por fuentes naturales son muchas, pero en especial el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de azufre (SO₂), significativamente mayores que las originadas por fuentes antropogénicas. Sin embargo, las fuentes antropogénicas están concentradas en zonas urbanas y es por lo tanto en estas áreas en donde su contribución es dominante.

La explotación intensiva de los recursos naturales y el desarrollo de grandes concentraciones industriales y urbanas en determinadas zonas, son fenómenos que, a través de los años, han dado lugar a la saturación de la capacidad asimiladora y regeneradora de la naturaleza y pueden llevar a perturbaciones irreversibles del equilibrio ecológico general, cuyas consecuencias a largo plazo no son fácilmente previsible.

Una atmósfera contaminada puede afectar la salud de las personas, alterar los ciclos naturales y afectar a las plantas y animales. Pero, además, los cambios que se producen en la composición química de la atmósfera pueden cambiar el clima, producir lluvia ácida o destruir el ozono, fenómenos todos ellos de una gran importancia global. Se entiende la urgencia de conocer bien estos procesos y de tomar las medidas necesarias para que no se produzcan situaciones graves para la vida de la humanidad y de toda la biosfera.

Se considera el aire como un bien común limitado, indispensable para la vida; por lo tanto, su utilización debe estar sujeta a normas que eviten el deterioro de su calidad por el uso o abuso indebido del mismo, de tal modo que se preserve su pureza como garantía del normal desarrollo de los seres vivos sobre la Tierra. Todos tenemos el deber de trabajar para lograr un mundo limpio y habitable, soporte de una mejor calidad de vida para las generaciones futuras.

La ley 99 de 1993, fundamento de la política ambiental colombiana, establece en el Artículo 1 del Título I, lo siguiente: "La formulación de las políticas ambientales tendrá en cuenta el resultado del proceso de investigación científica. No obstante, las autoridades ambientales y los particulares darán aplicación al principio de

precaución conforme el cual, cuando exista peligro de daño grave e irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces para impedir la degradación del medio ambiente”.¹

De esta manera la acción de las autoridades y de la comunidad debe basarse fundamentalmente en la investigación y en el conocimiento de los problemas. La deficiencia básica en la toma de decisiones y especialmente en la gestión de la calidad del aire, ha sido la falta de conocimiento de la problemática, esta situación se ha reflejado con especial fuerza en las decisiones frente a la contaminación atmosférica.

Actualmente la contaminación atmosférica es motivo de preocupación de las autoridades intermediarias del municipio de Pasto, la cual se ve incrementada por el constante crecimiento de la población en la ciudad, permitiendo la mezcla de usos de suelos y por ende la compatibilidad de algunas actividades industriales con sectores residenciales. En este sentido la ciudad de San Juan de Pasto, no ha dimensionado el problema y los beneficios que pueden traer consigo el estudio y posterior implementación de medidas que conlleven a mejorar la calidad del aire o en otras palabras a disminuir la contaminación atmosférica.

El uso del automóvil se ha incrementado de forma masiva en la ciudad de San Juan de Pasto, contribuyendo de manera directa con el calentamiento global a consecuencia de los gases contaminantes que se emiten por los tubos de escape. Los principales contaminantes emitidos por los vehículos que utilizan motores de ciclo diesel camiones y autobuses son partículas sólidas en forma de hollín que da lugar a los humos negros, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno y anhídrido sulfuroso procedente del azufre contenido en el combustible. El principal problema de de la ciudad de San Juan de Pasto radica en el desconocimiento, por parte de las autoridades ambientales y municipales, sobre los niveles de contaminación atmosférica; y además de esto, la falta de argumentos técnicos, económicos y de salud que no han permitido llevar a cabo las medidas correspondientes de control y mitigación de las emisiones que afectan el recurso aire.

En la ciudad de San Juan de Pasto no existe información alguna que permita conocer la calidad del recurso aire y es por ello que la Corporación Autónoma Regional de Nariño, CORPONARIÑO, está realizando el diagnóstico del recurso aire en el municipio de Pasto y las principales zonas que posiblemente presentan afectación por las actividades comerciales e industriales en el Departamento de Nariño con el propósito de aportar herramientas que permitan establecer programas para proteger y mejorar la calidad del aire; e implantar políticas de

¹ República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Sistema Nacional Ambiental -SINA-. Ley 99 de 1993.

gestión de la calidad del aire en el departamento de Nariño. En la actualidad CORPONARIÑO cuenta con la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Pasto (RMCAP) que opera bajo el objetivo primordial de evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad de aire para la ciudad. La RMCAP está constituida por tres estaciones de monitoreo. En la tabla 1 se registran los datos generales de la localización de las estaciones de la RMCAP.

Tabla 1. Localización de las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Pasto.

Número de Estación	Nombre de la Estación	Localización
Estación fija 1	Universidad Mariana	Calle 18 N° 34 - 104
Estación fija 2	Instituto Departamental de Salud	Calle 14 N° 18 - 20
Estación móvil 3	CORPONARIÑO	Calle 25 N° 7 Este 84

Con la presente investigación se pretende complementar y mejorar el Laboratorio de Control Atmosférico perteneciente a la RMCAP, además se tiene como propósito fundamental evaluar la calidad de aire y medir en que niveles de concentración se encuentran el dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno, los cuales son unos de los contaminantes de mayor interés en la atmosfera.

La realización y culminación de este proyecto es un paso importante al entendimiento de la problemática de la contaminación atmosférica en el municipio de San Juan de Pasto. Este tipo de estudios son un esfuerzo importante para lograr el mejoramiento continuo de la calidad del aire en las diferentes ciudades de Colombia y así contribuir la calidad de vida de sus habitantes.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La economía del municipio de San Juan de Pasto se basa en la prestación de servicios bancarios, comerciales, de transportes, las actividades agropecuarias y ganaderas. El sector industrial en el municipio es mínimo, por ende la capital del departamento de Nariño es un territorio netamente agrícola y comercial.

En la ciudad de San Juan de Pasto las fuentes de contaminación más evidentes son: las emanaciones de gases contaminantes provenientes de los procesos de erupción del Volcán Galeras, la expulsión de vapores a partir de fuentes fijas y las emisiones de gases y partículas procedentes de los vehículos de transporte terrestre. Estas emisiones de gases incrementan la concentración natural de gases contaminantes en la atmósfera generando un microclima en la ciudad.

Actualmente la conglomeración de fuentes móviles terrestres y fuentes fijas ha sido uno de los principales problemas que ha tenido la ciudad debido al crecimiento poblacional y al desarrollo económico sostenible de la ciudad. Según la Secretaría de Tránsito y Transporte de la ciudad de San Juan de Pasto en el presente año existen 70000 vehículos inscritos;² las fuentes fijas ascienden a un número de 1500.³

Las fuentes móviles y fijas causan las emisiones de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, alterando la composición natural del aire del municipio de Pasto, por lo tanto no se conoce en que magnitud ó concentración se encuentran estos gases y si dicha concentración se encuentra dentro de los niveles permisibles estipulados en la Resolución 601 de 2006.⁴

² Secretaria de Tránsito y Transporte Municipal (Pasto). Información disponible en la página web www.pasto.gov.co/dependencias/dattm/. Visitada el 28 de marzo de 2009.

³ Inventario de fuentes fijas con trámite de permiso de emisiones. CORPONARIÑO. 2009.

⁴ República de Colombia. Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución número 601, 4 de abril de 2006.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Estandarizar y prevalidar el método espectrofotométrico asociado a la determinación y análisis químico de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, mediante el método de la pararosanilina y el método del arsenito de sodio, para garantizar resultados confiables que permitan su implementación en el sistema de vigilancia de calidad de aire para la ciudad de San Juan de Pasto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar cuantitativamente la presencia de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en las diferentes estaciones de muestreo, a lo largo del proceso de prevalidación con el fin de comparar las mediciones de una estación a otra.

Realizar las actividades y los procesos correspondientes a la prevalidación del método analítico, asociado a la cuantificación de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. Determinación del límite de detección, límite de cuantificación, linealidad, sensibilidad, precisión y exactitud del método analítico a validar.

Comparar los resultados encontrados con los reportados por la normatividad vigente, para aportar las bases que permitan crear mecanismos de control frente al posible impacto ambiental que podría generarse.

3. MARCO TEÓRICO

El monitoreo de la contaminación de aire, es un campo importante en el área ambiental, ya que aporta datos de la variación y aporte de los contaminantes provenientes de diferentes actividades humanas a las concentraciones naturales de sustancias como monóxido de carbono, material particulado, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y metales pesados entre otros, información que se emplea para tomar decisiones a nivel de políticas de gestión ambiental en un sector o una región determinada.

De acuerdo con el Decreto 948 de 1995⁴ una fuente de emisión es toda actividad, proceso u operación, realizada por los seres humanos, o con su intervención, susceptible de emitir contaminantes al aire. Las denominadas fuentes fijas son todas aquellas situadas en un lugar determinado e inamovible, aún cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa. Dichas fuentes fijas pueden ser puntuales (aquella que emite contaminantes al aire por ductos o chimeneas) o dispersas (cuando los focos de emisión de una fuente fija se dispersan en un área, por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión, como en el caso de las quemas abiertas controladas en zonas rurales o las emisiones fugitivas o dispersas de contaminantes por actividades de explotación minera a cielo abierto).⁵

El decreto 948 de 1995⁴ define las fuentes móviles de la siguiente forma, es la fuente de emisión que por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza. Los vehículos automotores aportan en gran manera emisiones contaminantes a las áreas urbanas como son, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), compuestos orgánicos totales (COTs), material particulado (PM) entre otros. Por esta razón, las emisiones de este tipo de fuentes son estudiadas y manejadas de manera independiente.⁶

Las emisiones de vehículos automotores están compuestas por un gran número de contaminantes que provienen de varios procesos. El tubo de escape es la principal fuente de contaminación procedente de los vehículos ya que desde allí son emitidos el total de monóxidos de carbono y óxidos de nitrógeno y la mitad de los hidrocarburos que produce el vehículo. Las emisiones por el tubo de escape resultan de la combustión del combustible. Los contaminantes de interés en este

⁵ República de Colombia. Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Manual de Inventario de Fuentes Puntuales. Consultor K2 Ingeniería Ltda. 2002.

⁶ República de Colombia. Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Manual de Inventario de Fuentes Móviles. Consultor K2 Ingeniería Ltda. 2002.

tipo de emisiones son los compuestos orgánicos, CO, NO_x, SO_x, PM, gases tóxicos del aire (por ejemplo 1,3-butadieno, benceno, formaldehído, etc.), y las especies reductoras de visibilidad (por ejemplo, amoníaco, sulfatos, PM2,5, etc.).

El total de emisiones generadas por los vehículos automotores que circulan en la zona centro de la ciudad de San Juan de Pasto son del orden de 804 toneladas anuales.⁷ En la tabla 2, se registran los contaminantes más representativos de la zona centro de la ciudad de San Juan de Pasto.

Tabla 2. Aporte de contaminantes por tipo de vehículos en la zona centro de San Juan de Pasto.²

Tipo de vehículos	Ton/año					
	CO	NO _x	PST	SO ₂	TOTAL	%
Autos pequeños	274,63	33,09	1,23	0,21	309,17	38,48
Autos medianos	81,29	11,57	0,48	0,08	93,42	11,63
Camioneta	53,68	8,81	0,38	0,06	62,93	7,83
Bus	16,31	53,17	3,13	5,98	78,59	9,78
Camiones	1,63	5,21	0,42	0,80	8,06	1,00
Motos	248,15	0,33	2,77	0,09	251,35	31,28
TOTAL (Ton/año)	675,69	112,18	8,41	7,22	803,52	100,00

De acuerdo a los estudios adelantados por el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA) se estima que las fuentes móviles (automotores) que funcionan con hidrocarburos aportan el 60% al 70% del total de hidrocarburos, monóxido de carbono, material particulado y demás partículas tóxicas que se queda en el ambiente, a causa de la mala combustión de la gasolina y el diesel.⁸

3.1 EFECTOS EN LA SALUD DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

La actividad humana esta alterando la compleja mezcla de gases que forman la atmósfera. En el nivel de la tropósfera, parte inferior de la atmósfera en la se desarrollan las actividades humanas, el 99% de su composición es nitrógeno, oxígeno y gases nobles. El resto son los denominados gases trazas (dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos etc.) y es en estos donde se manifiesta una alteración de sus

⁷ Agenda Ambiental del Municipio de Pasto. Subdirección de Conocimiento y Calidad Ambiental. CORPONARIÑO, 2007. pp. 284.

⁸ Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). Información disponible en la página web www.dama.gov.co/. Visitada el 30 de marzo de 2009.

respectivas concentraciones habituales, que son las causantes de toda una serie de fenómenos locales y globales aún no muy claras pero muy preocupantes.⁹

3.1.1 Dióxido de azufre. El SO_2 es un gas incoloro, de olor picante, soluble en agua, reactivo e irritante para el sistema respiratorio y puede conducir, con una exposición de larga duración, al incremento de enfermedades de las vías respiratorias como la bronquitis. En períodos cortos de exposición puede producir cambios en la función pulmonar en asmáticos.

El SO_2 proviene en gran parte de la combustión de combustibles fósiles sobre todo del carbón sulfurado y en menor parte de los gases de escape de los vehículos que funcionan con diesel. La quema de leña es otra fuente antropogénica de éste contaminante. Los volcanes son una fuente natural del SO_2 .

El SO_2 es una sustancia que contribuye en la formación de la lluvia ácida. La oxidación del SO_2 genera SO_3 que rápidamente experimenta la hidratación para formar ácido sulfúrico. El monitoreo a largo plazo con métodos pasivos permite hacer un seguimiento de la contaminación en sistemas ecológicos sensibles.

En ciudades de países en desarrollo, las concentraciones medias anuales de SO_2 en el aire ambiental pueden variar de niveles muy bajos a $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones pico medidas como promedios de diez minutos pueden ser mayores de $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en condiciones de poca dispersión atmosférica como las inversiones o cuando determinadas condiciones atmosféricas llevan las emisiones al nivel del suelo. El SO_2 también puede alcanzar altas concentraciones en algunos ambientes interiores a través del uso de combustibles que contienen azufre, como el carbón usado para la calefacción y la cocina.

3.1.2 Dióxido de nitrógeno. El NO_2 es un gas tóxico, relativamente insoluble en agua. Éste gas puede inhalarse en grandes cantidades y penetrar a las vías respiratorias inferiores del pulmón, lo que puede generar respuestas biológicas. Al igual que el SO_2 , los individuos que padecen de asma son más susceptibles de desarrollar una respuesta de constricción bronquial. Se ha comprobado que el NO_2 es unas cuatro veces más tóxico que el NO ; presenta toxicidad cruzada con el O_3 y de ahí su importancia toxicológica al formar nitratos de peroxiacetilo

Su origen puede ser natural, ya que se forma en las tempestades y erupciones volcánicas. Las fuentes antropogénicas son el tráfico motorizado, principalmente por la combustión en motores diesel, así como los fuegos domésticos y procesos industriales de combustión.

⁹ RODRÍGUEZ, Ramón y RODRÍGUEZ Ignacio Muñoz. Manual de Gestión del Medio Ambiente. Madrid: MAPFRE S.A., 1994

El NO_2 juega un papel importante como precursor en la formación de ozono y oxidantes, que son también tóxicos en especial para las plantas. El NO_2 es un contaminante tanto primario como secundario. Los vehículos automotores emiten NO y NO_2 . En la atmósfera, el NO se oxida y se transforma a dióxido lentamente en reacción con el oxígeno, pero rápidamente en reacción con el O_3 . Esto explica las bajas concentraciones de O_3 que generalmente se observan cerca de las fuentes de óxido de nitrógeno.

Las concentraciones ambientales de NO_2 en el aire son variables. Las concentraciones naturales de fondo en el aire ambiental pueden ubicarse en el rango de menos de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a más de $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones anuales medias en el aire ambiental urbano pueden variar entre 20 y $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con concentraciones máximas de 75 a $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora. Las concentraciones de NO_2 en interiores pueden alcanzar concentraciones promedio de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante varios días, con concentraciones máximas de $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora en los casos en que hay dispositivos de calefacción de gas con poca ventilación.

3.1.3 Lluvia ácida. Los óxidos de azufre y nitrógeno derivados de la quema de combustibles fósiles se mezclan con el agua en la atmósfera y producen la lluvia ácida; los efectos de ésta pueden percibirse sobre la salud humana, los ecosistemas terrestres, la fauna, la flora, los cultivos, las aguas subterráneas y las construcciones.

La lluvia ácida, causa la descomposición del suelo y la remoción de los nutrientes; los árboles pierden su color y sus hojas la capa de grasa protectora, la cual es corroída por el depósito seco de SO_2 .

En los ecosistemas acuáticos, entre más acidez tenga la lluvia, más especies de plantas y animales declinan o desaparecen, debido a que las interacciones entre los organismos vivos y la química de sus habitantes acuáticos son extremadamente complejas.

En el caso de los pájaros pequeños que viven cerca de aguas acidificadas se ve afectada su reproducción, debido a que sus huevos presentan paredes muy delgadas causadas por el efecto del aluminio ingerido a través de los insectos de los cuales se alimentan. Dichos insectos precisamente se desarrollan en aguas acidificadas. Por otra parte, los animales herbívoros se ven afectados, ya que al acidificarse los suelos, las plantas que aquellos ingieren, acumulan una mayor cantidad de metales pesados (aluminio, cadmio, entre otros).

El efecto de la lluvia ácida sobre los cultivos es posible verlo en la reducción de las semillas de las plantas. También, cuando el pH de la lluvia es muy bajo (inferior a 4) se generan graves lesiones en el follaje de los cultivos afectando el crecimiento de vegetales como: el frijol, la soya, la cebolla, la espinaca y la lechuga.

La lluvia ácida causa en las construcciones, estatuas y monumentos de piedra erosión. Los materiales de construcción como acero, pintura, plásticos, cemento, acero galvanizado, piedra caliza, piedra arenisca y mármol también están expuestos a sufrir daños. Los efectos de los diversos contaminantes todavía no se pueden separar unos de otros de manera confiable. Sin embargo el principal agente corrosivo individual de los materiales de construcción es el SO₂.

3.1.4 Metales pesados. El mercurio de actividades humanas ingresa a la atmósfera, procedente de la volatilización en las fusiones metálicas y de la combustión del carbón y otros combustibles fósiles, además de la fabricación de cloro.¹⁰

La concentración de plomo en el aire, se debe especialmente a las emisiones de combustión de combustibles como gasolina, la aplicación de pinturas y las emisiones de empresas que emplean en sus procesos de producción.

La presencia de cadmio y níquel como contaminante del aire está relacionada con la utilización de metales como plomo y zinc en refinado y fabricación de sustancias.

Veintisiete metales pesados se consideran tóxicos en mayor o menor proporción, los que se consideran con mayor peligro en el aire son: mercurio, níquel, cadmio, plomo, berilio y antimonio, asociados generalmente a fuentes industriales.

¹⁰ Análisis de los Contaminantes del Aire. CORPONARIÑO. Agenda Ambiental de Nariño. 2002.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1 LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE, UN PROBLEMA MUNDIAL

La contaminación del aire ha sido un problema de salud pública desde el descubrimiento del fuego. En la antigüedad, las personas encendían fogatas en sus cuevas y cabañas y frecuentemente contaminaban el aire con humo nocivo.

A finales del siglo XIII en Londres, se registran las primeras pruebas de contaminación atmosférica por causas antropogénicas; en narraciones hechas por cronistas de la época, se describe como el humo producido por la combustión del “carbón de mar” producía una espesa niebla que cubría la ciudad. Durante cientos de años este no dejó de ser un problema puntual, que no implicaba grandes consecuencias en la salud humana, y por tanto no se estudió a fondo.

Con el crecimiento insostenible de la industria y la tecnología durante los últimos 100 años, el problema se volvió más común y peligroso en las grandes ciudades. Se estima que las concentraciones de CO₂, principal producto de la combustión, han aumentado un 10% en el mundo desde 1890 y que siguen creciendo a una rata del 0,27 % anual.

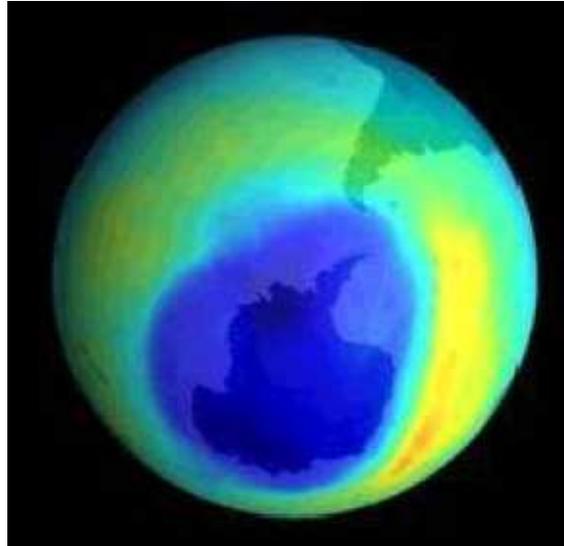
Las incontroladas emisiones de las chimeneas industriales, y luego el crecimiento vertiginoso del parque automotor, convirtieron a la contaminación del aire en una prioridad sanitaria en las ciudades industrializadas, en las que miles de personas morían por problemas relacionados a los altos niveles de polución.

Este problema, obligó a los países industrializados a desarrollar legislaciones estrictas que impulsaron el desarrollo de nuevos combustibles y procesos industriales más “limpios”, y alejaron los centros productivos del centro de las ciudades. Pero el crecimiento exponencial de la industria y el automóvil compensaron una menor rata de emisión, con una mayor cantidad de fuentes, y el problema continuó presente, aunque solo se concentraba en las ciudades.

Fue en 1982 cuando se prenden las alarmas mundiales sobre el problema. En ese año la estación japonesa SYOWA¹¹ descubre un hueco en la capa de ozono sobre la Antártica (ver fotografía 1), y se descubre que éste es causado por el uso indiscriminado en todo el mundo de clorofluorocarbonos (CFC), sustancias que reaccionan con el ozono de la estratósfera terrestre y que poseen una muy larga vida.

¹¹ SYOWA BASE. Suborbital Launch Site. Japan. Información disponible en la página web www.astronautix.com/sites/syoabase.htm/. Visitada: 19 de agosto de 2009.

Fotografía 1. Imagen satelital del hueco en la capa de ozono sobre la Antártica.¹¹



A este problema se le suma el fenómeno de la lluvia ácida en varios países, por causa de las altas concentraciones de óxidos inorgánicos y el descubrimiento de un aumento paulatino de la temperatura global, en lo que se llama el efecto invernadero por los altos niveles de CO₂. Este aumento en la temperatura podría generar un cambio climático de consecuencias terribles en la Tierra. Algunos científicos se atreven a afirmar que ya se están observando los efectos del cambio climático, aunque otros aseguran que es un proceso normal en nuestro planeta.

Lo cierto es que el problema de la contaminación atmosférica es global, por lo que se deben tomar medidas que involucren a todos los países con el fin de disminuir las emisiones en todo el mundo. Con ese fin fue realizada la cumbre de la Tierra en 1992 en Río de Janeiro,¹² en el que participaron más de 120 países, y en el que se dio el primer paso para la firma del Protocolo de Kyoto, donde actualmente se señalan las metas de emisión en el mundo.

El Protocolo de Kyoto¹³, firmado en la mencionada ciudad japonesa en 1998, es un acuerdo mundial dirigido a disminuir las emisiones que provocan el efecto invernadero. En la tabla 3 se describen los gases causantes del efecto invernadero y sus principales fuentes.

¹² Las Conferencias de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, también conocidas como las Cumbres de la Tierra. Cumbres Internacionales que tuvieron lugar en Río de Janeiro (Brasil) del 3 de junio al 14 de junio.

¹³ Protocolo de KYOTO de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Naciones Unidas, 199. FCCC/INFORMAL/83* GE.05-61702 (S) 130605.

Tabla 3. Los gases causantes del efecto invernadero.

Gas del efecto invernadero	% Total de los gases	Fuentes y % del total
Dióxido de carbono (CO ₂)	50	Combustibles fósiles (35) Deforestación (10) Agricultura (3) Industria (2)
Metano (CH ₄)	16	Combustibles fósiles (4) Deforestación (4) Agricultura (8)
Óxido nitroso (N ₂ O)	6	Combustibles fósiles (4) Agricultura (2)
Clorofluorcarbonados (CFC)	20	Industria (20)
Ozono (O ₃)	8	Combustibles fósiles (6) Industria (2)

El tratado establece unos niveles máximos de emisión para cada país y así lograr que en el 2012 se tengan los mismos niveles de contaminantes que en 1990. Actualmente no ha podido entrar en vigor pues Rusia y Estados Unidos, quienes aportan el 17 y 36% respectivamente de las emisiones globales de CO₂, no han ratificado el acuerdo.

El Protocolo también expone unos mecanismos de flexibilidad, donde se describe como los países pueden comerciar sus derechos de emisión con otras naciones. Por ejemplo, un país que reduzca su emisión a niveles menores que los especificados por el Protocolo, puede vender ese cupo a un país que supere los niveles señalados.

Otra opción que se plantea, es que los países que poseen grandes extensiones de bosques y selvas, cobren a las naciones contaminantes por su papel como receptores de dióxido de carbono. Los países contaminantes podrían aumentar su cupo de emisión de esta manera, al tiempo que se financia a las naciones en desarrollo para que cuiden y mantengan extensas zonas verdes.

El futuro de la humanidad en la Tierra, está dependiendo del compromiso de las naciones más industrializadas con el crecimiento sostenible, aunque la incertidumbre actual sobre la ratificación del Protocolo de Kyoto no abriga muchas esperanzas sobre cambios radicales a corto plazo.

En un futuro ya muy cercano, cuando las diferentes naciones del mundo sientan en sus economías el fuerte golpe del deterioro ambiental, ocurrirán sin duda los cambios más drásticos. El problema es que para ése día ya podría ser muy tarde.

4.2 EL PROBLEMA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LAS CIUDADES

La calidad del aire en las ciudades sigue siendo otra parte importante del problema. La gran concentración de personas en las ciudades, el uso generalizado del automóvil como medio principal de movilización, la cercanía de los centros industriales a los centros residenciales y la falta de planeación urbana, siguen deteriorando la calidad de vida de las personas en los grandes centros urbanos.

Una de las primeras ciudades que sufrieron los efectos del desarrollo industrial en la calidad del aire, fue Londres, que desde la Edad Media ha tenido que restringir el uso del carbón, por las terribles nubes insalubres que se formaban sobre la ciudad. Con la revolución industrial, también llegaron nuevos combustibles menos contaminantes, como el petróleo y sus derivados, pero con el auge de la producción y el invento del automóvil, la cantidad de fuentes emisoras aumentó increíblemente, por lo que el problema se agravó.

El problema llegó a su punto más crítico en la ciudad de Londres, en diciembre de 1952, cuando por una prolongada inversión térmica se formó una densa niebla fotoquímica o “smog”, que causó más de 4000 muertos en una semana y 8000 más en los tres meses siguientes. Esta situación condujo a la elaboración del Acta de Aire Limpio de Gran Bretaña¹⁴ en 1956.

Uno de los países pioneros en las medidas de control de las emisiones fue los Estados Unidos, que desde antes del desastre de Londres comenzó a trabajar en políticas estrictas de control de emisiones. En 1942, Pittsburg, conocida como la ciudad humosa por su industria siderúrgica y actividad ferroviaria, fue la primera ciudad en desarrollar medidas efectivas de control y disminución de contaminantes, que fijaban límites estrictos a las industrias y hogares.

De esta manera, los Estados Unidos se ponen a la vanguardia en materia de medidas de control de emisiones. En el año de 1955 se firma el Acta para el Control de la Contaminación del Aire, que traía las primeras herramientas para manejar el problema. Luego, en 1970 se crearía la CAAA (Clear Air Act Amendments¹⁵), un poderoso conjunto de políticas dirigidas a disminuir los niveles de contaminación en los siguientes años en todo el país. Muchos países seguirían su ejemplo y actualmente prácticamente todos los países del mundo cuentan en su legislación con herramientas que procuren controlar las emisiones atmosféricas en las ciudades, en procura de una mejor calidad de vida de sus habitantes.

¹⁴ The Clean Air Act 1956. El Parlamento del Reino Unido aprobó esta ley en respuesta a la gran “smog” de Londres en 1952.

¹⁵ Clear Air Act Amendments. Los Estados Unidos crean una legislación promulgada por el Congreso para controlar la contaminación del aire a nivel nacional en 1955.

Especial atención merecen las emisiones de contaminantes provenientes de fuentes móviles, especialmente por vehículos automotores, cuyo número ha crecido de manera exponencial en todo el mundo y presentan el problema de ser variadas, complejas y encontrarse muy cercanas a los seres humanos, animales y construcciones.

Actualmente la problemática de la calidad del aire urbano se está trasladando a los países en vías en desarrollo, como lo señala la OMS¹⁶: “El rápido crecimiento industrial y demográfico, combinado con el mejoramiento de los niveles de vida, están produciendo en los países en desarrollo modalidades de uso de los vehículos automotores similares a los del mundo industrializado”. Ver fotografía 2.

Fotografía 2. Las congestiones vehiculares son una situación común en todos los países en desarrollo.



Lastimosamente, la mayoría de países en desarrollo no han adelantado estrategias gubernamentales que combatan el problema, por lo que la situación puede empeorar en los próximos años. Es por esto que se hace imperante adelantar investigaciones, que diagnostiquen la calidad del aire en las ciudades y señalen estrategias de control de emisiones, antes que el problema sea inmanejable.

¹⁶ Organización Mundial de la Salud (OMS). Calidad del Aire y Salud. Disponible en: www.who.int/es/. Visitada: 8 de agosto de 2009.

4.3 CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Cuando algunas sustancias o compuestos se encuentran en el aire en concentraciones o niveles tales que pueden causar daños o molestias a personas, animales, vegetación o materiales se denominan contaminantes atmosféricos. En países como los Estados Unidos, la contaminación causa pérdidas anuales de billones de dólares a causa de sus efectos negativos en bosques, cultivos, edificios, ciudades y cuerpos.

Las plantas y cultivos se ven afectados directamente por el ozono. Grandes zonas de cultivo de trigo y otros cereales son destruidos por oleadas de ozono provenientes de ciudades ubicadas a cientos de kilómetros. La lluvia ácida causada por la condensación de óxidos de azufre y nitrógeno también afecta de forma muy negativa a las plantas y animales.

La visibilidad es otro factor que se afecta de manera importante por la contaminación. Aparte de sus efectos psicológicos en la población, la disminución en la visibilidad afecta los vuelos comerciales y daña la vista de paisajes naturales, lo que afecta el turismo.

Uno de los principales efectos de la contaminación, por sus importantes consecuencias económicas, es el acelerado daño en la fachada de los edificios urbanos y estructuras cercanas a zonas de gran carga de contaminantes. Esto incluye monumentos de gran valor histórico y arquitectónico como el Partenón en Atenas o el Coliseo en Roma.

4.3.1 Los efectos en la salud humana. Respirar aire contaminado es peligroso y si la dosis del contaminante, es decir la relación entre tiempo de exposición y concentración, es lo suficientemente alta, puede ser mortal. Los compuestos y partículas peligrosas entran directamente a nuestro organismo al respirar, afectan todo el sistema respiratorio y entran a la sangre en el intercambio de los alvéolos. Sus efectos pueden asimilarse a los de fumar, aunque ésta última actividad es más intensa y peligrosa.

El aire enrarecido de las ciudades es un problema grave, que afecta la calidad de vida de las ciudades y dispara los índices de enfermedades cardiorrespiratorias, con el consecuente aumento en el gasto gubernamental en materia de salud. La OMS estima que del 2 al 5% de las muertes en países en vías de desarrollo, son causados por concentraciones elevadas de contaminantes.

En Colombia se calcula que ocurren cerca de 6000 muertes anuales, debido a casos de mortalidad prematura, por problemas cardiopulmonares, cáncer de pulmón y a casos de morbilidad en niños por enfermedades de tipo respiratorio, con un costo anual estimado en 1,5 billones de pesos en salud pública, debido a contaminación del aire en zonas urbanas.

Colombia como signatario de varios convenios, protocolos y cumbres, desarrollados a nivel latinoamericano y mundial, esta comprometida a proteger los ecosistemas y reducir los peligros a la salud, erradicar la pobreza, promover y fortalecer el desarrollo económico y social y la protección ambiental en los planos nacional, regional y local, es de ahí y debido a estos compromisos y obligaciones que Colombia ha desarrollado e implementado la Agenda Verde y la Agenda Gris, asociada la primera al manejo sostenible de los recursos naturales y ecosistemas a escala global y regional. La agenda Gris se ha enfocado a enfrentar las amenazas del ambiente sobre la salud y el bienestar de la población a escala local, dentro de la cual se encuentra la contaminación del aire.

El 'problema del problema' es la diversidad de factores que influyen en agravarlo, como son "la complejidad de los contaminantes múltiples del aire, el gran número de fuentes de donde provienen, y la gran población expuesta". Por lo tanto se requiere de un trabajo interdisciplinario y desde diferentes enfoques, que ataque las causas del problema y mitigue sus efectos.

Los síntomas por la exposición a altas concentración de contaminantes, cambian de un individuo a otro, presentándose los principales problemas médicos en aquellas personas con enfermedades cardiovasculares preexistentes, o en aquellas susceptibles por su edad: niños y ancianos. A su vez, los síntomas son diferentes según el tipo o combinación de contaminantes a los que se está expuesto.

Es importante notar que usualmente las personas en las ciudades se encuentran expuestas a una gran variedad de contaminantes atmosféricos, los cuales actúan en conjunto y crean un efecto sinérgico de gran peligrosidad.

Los contaminantes provenientes de fuentes móviles, pueden agruparse en las siguientes clases:

- ✓ Monóxido de Carbono.
- ✓ Óxidos de Nitrógeno.
- ✓ Hidrocarburos.
- ✓ Óxidos de Azufre.
- ✓ Partículas en suspensión.

En lo que compete a esta investigación, solo se tratará a los contaminantes objetos de estudio, tales como son los óxidos de azufre y nitrógeno.

4.3.1.1 Óxidos de nitrógeno. Los óxidos de nitrógeno son producidos en los procesos de combustión y su concentración presenta una clara dependencia con la temperatura y la calidad de la mezcla. Estos factores también determinan la proporción de óxido nítrico (NO) u óxido nitroso (NO₂) que se formará. Es importante aclarar que también se produce nitrógeno (N₂), pero éste gas no tiene implicaciones para la salud humana.

Las concentraciones de los estos óxidos aumentan cuando existen diferencias de temperatura en el dispositivo en el que ocurre la combustión, que para un vehículo convencional corresponde al pistón. Es por esto que la producción de óxido de nitrógeno es mucho mayor en los primeros minutos de funcionamiento del vehículo, cuando las paredes del pistón están frías; esto explica también porque los procesos químicos que involucran a los óxidos de nitrógeno (como el smog) ocurren en las mañanas, cuando comienza la actividad vehicular.

Los gases de óxidos de nitrógeno pueden viajar grandes distancias, causando una gran variedad de problemas ambientales y de salud en lugares alejados del sitio de emisión. En el viaje es común que sufran procesos químicos al combinarse con otros gases y por acción de la luz solar.

El principal problema de los óxidos de nitrógeno no es su presencia en sí, sino la capacidad que tienen para formar contaminantes secundarios mucho más peligrosos, como lo es el ozono, y de potenciar la formación de material particulado en la atmósfera.

La contaminación fotoquímica es el nombre que se le ha dado al proceso de producción de contaminantes secundarios en la atmósfera, por causa de complejas reacciones químicas en presencia de la luz solar. Los principales componentes de éste procesos son los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos, el oxígeno y la luz ultravioleta del sol.

Se considera que el ozono es el contaminante secundario más perjudicial para la salud humana, pero algunos efectos, como la irritación ocular, se le atribuyen a otros contaminantes fotoquímicos como los nitratos orgánicos y los aldehídos. El proceso se puede simplificar en tres etapas:

a. La luz ultravioleta, rompe las partículas de dióxido de nitrógeno, liberando partículas libre de oxígeno, que reaccionan con el oxígeno molecular y forman ozono en zonas muy cercanas a la superficie de la Tierra.

Fotografía 3. Los Ángeles en un día típico de verano.



Los principales síntomas en la salud humana por los altos niveles de ozono y otros contaminantes fotoquímicos en la tropósfera son:

- ✓ Dificultad al respirar.
- ✓ Pérdida notable de visibilidad.
- ✓ Daños en el sistema respiratorio.
- ✓ Disminución de la actividad cardiovascular.
- ✓ Irritación ocular, de garganta y de otras mucosas.
- ✓ Tos, fatiga y anemia.

Según varios estudios epidemiológicos se ha determinado que el ozono es la “principal causa de los efectos de la contaminación fotoquímica sobre la salud humana en Norteamérica”. Estos mismos estudios han relacionado aumentos de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en los niveles de ozono con incrementos hasta del 4% en el número de ingresos hospitalarios por enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), del 3,5% en ingresos por asma y del 2,3% de defunciones por esta causa.

4.3.1.2 Óxidos de azufre. Los óxidos de azufre producidos por fuentes móviles, provienen principalmente de los vehículos diesel, aunque en los últimos años se ha comenzado a considerar importante el aporte de éste contaminante por vehículos a gasolina.

El SO_2 es el óxido más estable y el que más complicaciones presenta a la salud humana. Usualmente, la presencia de SO_2 se relaciona directamente con el material particulado, siendo este el origen de las partículas más pequeñas, al

condensarse en el aire. La combinación de SO₂ y material particulado, provoca una parte importante de la contaminación de las grandes ciudades, actuando en forma conjunta y por separado, en un fenómeno que se suele denominar “smog de invierno”.

A diferencia de otros contaminantes, el SO₂ actúa muy rápidamente sobre la salud humana, usualmente a los pocos minutos de sufrir la exposición. Al igual que otros contaminantes afecta las funciones respiratorias y cardiovasculares.

En la tabla 4 se pueden apreciar los efectos en la salud humana según la concentración de SO₂ en el aire, según estudios de la OMS.

Tabla 4. Niveles promedios de 24 horas de mezclas de contaminación atmosférica conteniendo SO₂ y partículas en suspensión por encima de los cuales se pueden esperar efectos agudos sobre la salud humana.

SO ₂ (µg/m ³)	Efectos sobre la salud	Grados de clasificación de los efectos
200	Disminución ligera y transitoria de la función en niños y adultos que puede durar de 2 a 4 semanas	Moderados
250	Aumento de la morbilidad respiratoria entre los adultos susceptibles y posiblemente entre los niños	Moderados
400	Mayor incremento en la morbilidad respiratoria	Graves
500	Aumento de la morbilidad entre los ancianos y los enfermos crónicos	Graves

4.4 LA LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica es uno de los principales problemas ambientales en los centros urbanos de mediano y gran tamaño alrededor del mundo. Suele ser el resultado de “la aplicación de una tecnología defectuosa o mal empleada, así como de la ausencia de criterios ambientales al realizar las planificaciones económicas nacionales”.

A diferencia de otras variables ambientales afectadas por el desarrollo de las ciudades (como las corrientes de agua superficial), disminuir los niveles de contaminación del aire por medio de tratamientos artificiales es una tarea prácticamente imposible en la actualidad. Esta labor se le deja a la naturaleza.

La atmósfera cuenta con las herramientas suficientes para procesar todos los contaminantes producidos por la actividad humana, de hecho, la producción global de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y demás

contaminantes urbanos primarios, es causada en una gran proporción por medios naturales.

El problema de la contaminación urbana se debe a la gran concentración de las fuentes, lo que no permite la dispersión de contaminantes en la tropósfera, ni el escape de estos a las capas superiores de la atmósfera, con la velocidad y eficiencia suficientes, como para no causar problemas en los organismos vivos.

Debido a la imposibilidad actual de diseñar mecanismos viables de remoción de contaminantes, la lucha contra la contaminación está centrada principalmente en diseñar estrategias gubernamentales de planificación y desarrollo sostenible, junto con la implementación de tecnologías cada vez más eficientes y menos contaminantes.

Las estrategias de disminución de contaminantes atmosféricos usualmente traen consecuencias económicas negativas, al igual que la mayoría de las medidas ambientales, por lo que es muy importante la optimización de los beneficios obtenidos a partir de estas estrategias. Por lo tanto, el primer paso debe consistir en un claro y preciso diagnóstico de la calidad del aire existente y las tecnologías aplicadas por los diferentes emisores.

Un diagnóstico adecuado de la calidad del aire en cualquier zona urbana, debe contener al menos los siguientes planes específicos:

- * Realización de un inventario completo de las fuentes de contaminación, incluyendo las fuentes fijas y móviles, así como un estimado de las concentraciones de los contaminantes criterios en una zona determinada.
- * Estudio de las tecnologías utilizadas por las industrias y vehículos, así como las relaciones costo/beneficio de los cambios tecnológicos.
- * Desarrollo e implementación de modelos atmosféricos que permitan conocer las relaciones entre las emisiones en los distintos focos y la calidad del aire de los receptores.
- * Investigaciones epidemiológicas sobre los efectos en la salud, de las distintas concentraciones de contaminantes.
- * Estudios económicos y ambientales sobre los daños en los bienes materiales y la ecología, por la contaminación ambiental.

Alrededor del mundo, se han planteado dos enfoques distintos a la hora de formular estrategias para combatir la contaminación atmosférica:

- ✓ La gestión de los recursos atmosféricos.
- ✓ La aplicación de los mejores medios practicables.

4.4.1 La gestión de los recursos atmosféricos. Esta estrategia se basa en la fijación de unas normas de calidad del aire que no deben sobrepasarse. Este tipo de estrategia es la que han desarrollado países como Estados Unidos, Alemania y Colombia.

En este tipo de estrategias, se exige a todas las industrias que cumplan con unos parámetros fijos de niveles máximos de contaminación, lo que puede ser discriminante para algunas actividades industriales, en las que por su proceso productivo, emiten más contaminantes.

4.4.2 La aplicación de los mejores medios practicables. Esta estrategia esta basada en el control de las emisiones mediante el empleo de la mejor tecnología disponible, económicamente aplicable para la reducción de la contaminación.

Este tipo de estrategia se ha seguido principalmente en el Reino Unido. Para este tipo de estrategias, se les exige a las industrias y vehículos, que apliquen la tecnología de punta existente, y por tanto la menos contaminante. Puede ocurrir que aunque se usa la tecnología menos contaminante existente, la densidad de las fuentes de emisión, las condiciones meteorológicas y la topografía influyan negativamente en mantener niveles no admisibles de contaminación.

4.4.3 La combinación de ambos enfoques. Hoy día se sabe que la mejor estrategia para combatir la contaminación atmosférica debe ser una combinación de ambos enfoques, en el que se hagan cumplir unas normas mínimas de calidad del aire en la zona, al tiempo que se estimule el uso de los mejores medios practicables en industrias y transportes.

Existen varios tipos de acciones correctivas y preventivas, que tienen el objetivo de mejorar la calidad del aire en los centros urbanos. Estas son algunos de los principales planes de acción que se aplican en la actualidad en todo el mundo:

- * Usar sistemas de contención de gases y humos en industrias y vehículos (filtros, convertidores catalíticos, etc.).
- * Optimizar los sistemas productivos en industrias, y adoptar nuevas tecnologías menos contaminantes.
- * Optimizar la capacidad de autopurificación de la atmósfera (elevar la altura de las chimeneas, modificar la velocidad y temperatura de emisión de gases, utilizar dispersores de grandes dimensiones).
- * Desarrollar técnicas de producción ambientalmente sostenibles.
- * Estimular el ahorro energético.
- * Planificar adecuadamente la estructura urbanística de las ciudades (localizar polígonos industriales con criterios medioambientales, alejar las vías de gran flujo vehicular de las zonas pobladas, fomentar el uso del transporte público, crear zonas verdes amortiguadoras, entre otras).
- * Realizar estudios previos de impacto ambiental.

* Implementar programas de vigilancia de la calidad del aire (redes de monitoreo ambiental).

Una vez se han formulado las estrategias de lucha contra la contaminación atmosférica, es necesario poner en práctica instrumentos legislativos eficaces que hagan posible la ejecución de tales estrategias. Una ley eficaz en combatir el problema ha de ser “políticamente aplicable, técnicamente posible y económicamente no ha de suponer dificultades excesivas.”

Por último, se hace indispensable desarrollar planes educativos que involucren a toda la comunidad, en los que se informen los peligros de la contaminación atmosférica y se expongan las diferentes maneras en que los ciudadanos, empresarios y entes gubernamentales, pueden ayudar a solucionar el problema.

5. MARCO LEGAL

5.1 LEGISLACIÓN AMBIENTAL

Sobre el tema ambiental específico de contaminación del aire, poco se ha dicho en el gobierno nacional, comparativamente con la complejidad del asunto, dentro de un marco conceptual ya científico y/o jurídico. No obstante, cuando se consultan las estadísticas científico-informativas de las consecuencias nocivas del mal manejo y escasa regulación sobre los contaminantes atmosféricos, generados tanto por el desarrollo industrial, como el parque automotor y demás actividades de mayor o menor envergadura que expulsen sus residuos por vía aérea, las cifras producen escalofrío, por el abandono legislativo, jurisprudencial y doctrinario, que en teoría jurídica se denomina “déficit legislativo” y “déficit de ejecución”.

Y es que abrumba saber que la simple encendida de un vehículo, dicho de manera concisa, mata las neuronas de los frágiles cerebros de los niños, disminuye la expectativa de vida de la población por producir cáncer broncopulmonar, entre otros perjuicios del mismo calibre y que las autoridades públicas carezcan de mecanismos logísticos y jurídicos suficientes para controlar, por lo menos, el desenfrenado desarrollo industrial y automovilístico, toda vez que, en síntesis, en 90 años de haber sido puesto en marcha el primer automóvil por Henry Ford (modelo T), hoy circulan alrededor de 600 millones de autos. Cifra alarmante, si se compara con la descompensación frente al deficiente e inoperante marco legal que pretende controlar sus emisiones de gases contaminantes y de material particulado.

La normatividad nacional, regional y local que existe sobre el tema aire es relativamente escasa, subsumida de manera concreta en el Decreto 948 del 5 de junio de 1995, por el cual se reglamentan, parcialmente la Ley 23 de 1973¹⁷, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto ley 2811¹⁸ (Código de Recursos Naturales) de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979¹⁹ y la Ley 99 de 1993²⁰, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire.

¹⁷ República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Ley 23 de 1973. Diciembre 19 de 1973.

¹⁸ República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto - Ley 2811. Diciembre 18 de 1974.

¹⁹ República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Ley 9 de 1979. Enero 24 de 1979.

²⁰ República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Ley 99 de 1993. Diciembre 22 de 1993.

El Decreto 2811 de 1974, por el cual se dictó el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de protección al Medio Ambiente apenas tiene 5 artículos sobre dicha temática tan compleja, los cuales fueron ampliados y reglamentados en virtud del Decreto 948 de 1995, ya mencionado y el cual derogó el Decreto 02 de 1982, salvo sus artículos transitorios 31, 32, 33, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 67, 68, 70, 71, 72, 74, 75, 76, 77 y 79 excepto el inciso final de su parágrafo 2º, 80, 81, 84, 87, y 89.

La evolución entonces de la normatividad Colombiana en cuanto a preservar, conservar y prevenir el deterioro de la calidad del aire no para y es así como se expiden diferentes decretos, leyes y resoluciones en el tiempo cuyo objetivo es enfrentar los nuevos retos ante la generación de nuevos contaminantes.

No se puede desconocer tampoco que Colombia es signataria de convenios y protocolos a nivel Internacional de gran importancia, debido a que marcan el camino para establecer criterios, políticas y normas que conllevan a la conservación del recurso aire.

A continuación se presenta entonces la normatividad existente a nivel Nacional objeto de este estudio.

5.1.1 Normatividad Nacional. Resolución 19622 de 1985.²¹ Por la cual se adopta un procedimiento para análisis de la calidad del aire.

Decreto 948 de 1995. Por el cual se reglamentan; parcialmente, la Ley 23 de 1973; los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto-Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire.

Resolución 05 de 1996.²² Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por fuentes móviles terrestres a gasolina o diesel, y se definen los equipos y procedimientos de medición de dichas emisiones y se adoptan otras disposiciones.

Resolución 909 de 1996.²³ Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 005 de 1996 que reglamenta los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por fuentes móviles terrestres a gasolina o diesel, y se definen los

²¹ República de Colombia. Ministerio de Salud. IDEAM. Resolución No. 19622 del 31 de Diciembre de 1985. Diciembre 31 de 1985.

²² República de Colombia. Ministerio de Desarrollo Económico. Resolución 05 de 1996. Febrero 20 de 1996.

²³ República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 909 de 1996. Enero 1 de 1996.

equipos y procedimientos de medición de dichas emisiones y se adoptan otras disposiciones.

Decreto 1228 de 1997.²⁴ Por medio del cual se modifica parcialmente el Decreto 948 de 1995 que contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire.

Resolución 619 de 1997.²⁵ Por la cual se establecen parcialmente los factores a partir de los cuales se requiere permiso de emisión atmosférica para fuentes fijas.

Resolución 1048 de 1999.²⁶ Por medio de la cual se fijan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por fuentes móviles terrestres a gasolina o diesel, en condición de prueba dinámica, a partir del año modelo 2001.

5.1.1.1 Normas de calidad del aire. A partir del 05 de julio de 2006 empezó a aplicarse en el país la Resolución 601 del 04 de abril de 2006, expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). Esta Resolución establece las normas de calidad del aire, o niveles de inmisión, en todo el territorio nacional, en condiciones de referencia. En la tabla 5 se presentan los niveles máximos permisibles para los contaminantes criterios, definidos en dicha Resolución.

Basados en los efectos de los contaminantes sobre la salud humana y en el tiempo de residencia de los contaminantes en el aire, los gobiernos establecen las normas de calidad para el aire ambiental. Estas normas especifican los niveles máximos permisibles para cada tipo de contaminante. Por encima de estos niveles se pueden presentar efectos nocivos para la salud. Las normas de Colombia y Estados Unidos se presentan en la tabla 5. El Decreto 02 de 1982 del Ministerio de Salud Pública establece las normas de calidad del aire para el territorio colombiano.

²⁴ República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 1228 de 1997. Mayo 6 de 1997.

²⁵ República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 619 de 1997. Julio 7 de 1997.

²⁶ República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 1048 de 1999. Diciembre 6 de 1999.

Tabla 5. Normas de calidad del aire.²⁷

Contaminante	Limite Máximo Permissible*		Periodo
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppb	
Partículas PST	100	-	1 año
	300	-	24 horas
Partículas PM 10	150	-	1 año
	70	-	24 horas
Dióxido de azufre (SO ₂)	80	31	1 año
	250	96	24 horas
	750	287	3 horas
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	100	53	1 año
	150	80	24 horas
	200	106	1 hora
Ozono (O ₃)	80	41	8 horas
	120	61	1 hora
Monóxido de carbono (CO)	10	8800	8 horas
	40	350000	1 hora

* A condiciones normales, 25°C y 760 mm Hg.

En la tabla 6 se presentan los niveles máximos permisibles para los contaminantes criterios a condiciones locales, es decir en la ciudad de San Juan de Pasto.

²⁷ República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Sistema Nacional Ambiental -SINA-. Resolución 601 de 04 de abril de 2006.

Tabla 6. Normas de calidad del aire para la ciudad de San Juan de Pasto.

Contaminante	Limite Máximo Permisible*		Periodo
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppb	
Partículas PST	77	-	1 año
	230	-	24 horas
Partículas PM 10	115	-	1 año
	54	-	24 horas
Dióxido de azufre (SO ₂)	61	24	1 año
	191	74	24 horas
	574	222	3 horas
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	77	30	1 año
	115	44	24 horas
	153	59	1 hora
Ozono (O ₃)	61	24	8 horas
	92	36	1 hora
Monóxido de carbono (CO)	8	3	8 horas
	31	12	1 hora

* A condiciones locales, 19°C y 570 mm Hg.

5.1.2 El Índice de Calidad del Aire (ICA). El índice de calidad del aire (ICA) aplicado para la RMCAP, sirve para presentar el estado en que se encuentra una atmósfera previamente monitoreada. El ICA se caracteriza por su relación directa con los niveles de concentración del contaminante y los efectos en la salud. Este indicador fue desarrollado por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos U.S. EPA, en su última revisión (2002) incluye algunos contaminantes como el dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas menores de 10 micras (PM10) y partículas menores de 2,5 micras (PM2,5). Los intervalos que describen los niveles de calidad del aire, en términos de adaptación del ICA, son los presentados en la tabla 7.

Tabla 7. Índice de Calidad del Aire (ICA).

PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24 horas	PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24 horas	SO ₂ (ppb) 24 horas	NO ₂ (ppb) 24 horas	CALIDAD
0 – 54	0 – 15,4	0 – 34	0 - 650	Buena
55 – 154	15,5 – 65,4	35 – 144	–	Moderada
155 – 224	65,5 – 100,4	145 – 224	–	Inadecuada para grupos sensibles
255 – 354	100,5 – 150,4	225 – 304	–	Poco saludable
355 – 424	150,5 – 250,4	305 – 604	650 – 1240	Muy poco saludable
425 – 604	250,5 – 500,4	605 – 1004	1250 – 2040	Peligrosa

Las categorías atmosféricas relacionadas con el valor del índice se presentan en la tabla 8, las cuales identifican la calidad del aire debida a uno o varios contaminantes en la atmósfera y los efectos que presenta en la población. Con el objetivo de informar y proteger a los ciudadanos urbanos el ICA es una ventaja como herramienta política y administrativa para el diseño de estrategias de disminución de la contaminación y para la toma de medidas de intervención.

Tabla 8. Categoría de calidad para el ICA y sus efectos en la salud.

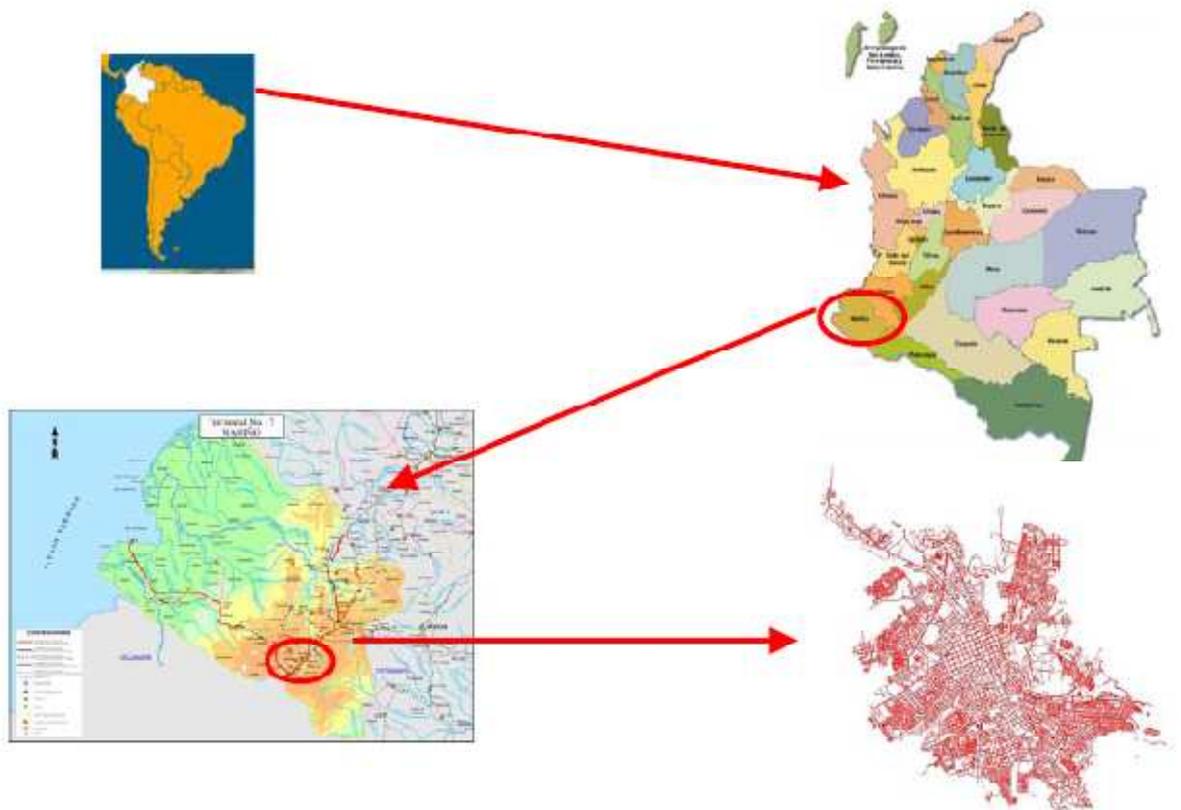
Categoría	Índice	Efecto general
Buena	0 – 50	Ninguna
Moderada	51 – 100	Las personas sensibles deben considerar limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
Inadecuada para grupos sensibles	101 – 150	Los niños y adultos activos, y las personas con enfermedades respiratorias, tales como el asma, deben limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
Poco saludable	151 – 200	Los niños y adultos activos, y las personas con enfermedades respiratorias, tales como el asma, deben limitar los esfuerzos prolongados al aire libre; todos los demás, especialmente los niños, deben limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.
Muy poco saludable	201 – 300	Los niños y adultos activos, y las personas con enfermedades respiratorias, tales como el asma, deben limitar los esfuerzos prolongados al aire libre; todos los demás, especialmente los niños, deben limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.
Peligrosa	ICA sobre 300	Es muy probable que la población entera sea afectada.

6. MARCO GEOGRÁFICO

6.1 ASPECTOS GEOGRÁFICOS DE LA CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO

El municipio de San Juan de Pasto es la capital del Departamento de Nariño, situado sobre el Valle de Atriz a 795 Km al sur occidente de la capital de la República de Colombia (ver figura 1). Limita al norte con La Florida, Chachagüí y Buesaco, por el sur con el Departamento de Putumayo y Funes, por el oriente con Buesaco y el Departamento de Putumayo y por el occidente con Tangua, Consacá y La Florida.

Figura 1. Ubicación del municipio de San Juan de Pasto.²⁸



La ciudad de San Juan de Pasto (ver fotografía 4), se encuentra ubicada en las estribaciones de la Cordillera Central de Colombia, con coordenadas geográficas de 1° 12' latitud norte y 77° 16' longitud oeste con respecto al Meridiano de Greenwich, con una altura promedio de 2559 msnm, una presión atmosférica de

²⁸ Sistema de Vigilancia de la Calidad de Aire (CD-ROM). Pasto. Octubre del 2007.

570 mm de Hg (1029,1 KPa), una temperatura media de 19 °C y una precipitación media anual de 700 milímetros.²⁹ La extensión total del municipio de San Juan de Pasto es de 1128,4 Km², según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT)³⁰.

Fotografía 4. Panorámica de la ciudad de San Juan de Pasto.



Su relieve es muy variado, presenta terrenos planos, ondulados y montañosos. Como principales accidentes orográficos se encuentran el Volcán Galeras a 4276 msnm, el Cerro Bordoncillo, Morasurco, Patascoy, Campanero, Alcalde, Pan de Azúcar y Putumayo. Por su diferencia de alturas presenta pisos térmicos medios, fríos y páramos.

Al municipio de San Juan de Pasto lo bañan ríos como el Río Bobo, Jurado, Esteros, Guamuez, Alísales, Opongoy, Pasto, Patascoy y presenta una de las lagunas más importantes en Colombia como es la laguna de La Cocha, que vierte sus aguas al Río Putumayo.

Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) la ciudad de San Juan de Pasto cuenta con una población de 381712 habitantes, que esta distribuida en 12 comunas. La población urbana corresponde a 312759 y la rural

²⁹ Colombia Link. Información disponible en la página web www.colombialink.com/. Visitada el 29 de marzo de 2009.

³⁰ Artículo 23. Plan de Ordenamiento Territorial, Pasto 2012: Realidad posible.

68953 y que el porcentaje de mujeres es de 53,1% y el de hombres es de 46,9%, además se cuenta con 96364 hogares y 92343 viviendas.³¹

6.2 EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN LA CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO

La concentración local de emisiones del material particulado, monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos sin quemar y otros, alcanza niveles considerables, particularmente en los centros urbanos de la ciudad, donde la circulación de vehículos es muy densa (50000 vehículos motorizados en el día), lo cual incide en la salud de los pastusos y en los distintos componentes del ecosistema urbano, el microclima y el régimen hidrológico de la ciudad.

El centro de Pasto, por sus condiciones físicas y por las actividades comerciales que ahí se desarrollan, se constituye en un componente especial del ecosistema urbano. El alto desarrollo constructivo de la zona, tanto volumétrico como en altura, y la carencia de controles ambientales de protección han generado condiciones tales como:

- * Altas congestiones de tráfico vehicular.
- * Aglomeraciones humanas, cada vez más abundantes, en horas pico.
- * Aumento de la contaminación por smog fotoquímico, manifestando el ardor en los ojos y en las vías respiratorias que sufre la población cuando va al centro de la ciudad o esta cerca de este.
- * Aumento de la temperatura, debido al microclima de la ciudad y a la escasez de zonas verdes en el centro de la ciudad.

Las situaciones anteriores muestran como la atmósfera de la ciudad ha alcanzado durante las últimas décadas niveles de deterioro sin precedentes, a causa de las emisiones de gases y otros contaminantes. La mayor contaminación del aire en el municipio de Pasto la producen los vehículos automotores, lo cual se explica por el progresivo consumo de combustible promovido por el crecimiento y la densidad poblacional. Otros factores que influyen en esta situación son la baja eficiencia y calidad de los combustibles utilizados y el atraso tecnológico del parque automotor.

³¹ Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Información disponible en la página web www.dane.gov.co/censo/. Visitada el 29 de marzo de 2009.

Fotografía 5. Trafico vehicular en el centro de la ciudad de San Juan de Pasto.



Con lo que compete a está investigación, La Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Pasto, a través del Laboratorio de Control Atmosférico exclusivamente monitoreará y cuantificará dos gases en particular, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, mediante el denominado analizador de tres gases (APV TRIGAS³²), el cual es un equipo semiautomático que mediante el uso de una bomba de vacío, hace burbujear el aire atmosférico en reactivos especiales y con un caudal conocido. Los contaminantes contenidos en el aire son entonces recolectados para análisis posterior en el laboratorio.

³² TRIGAS. Información disponible en la página web www.trigas.com.ve/. Visitada el 3 de abril de 2009.

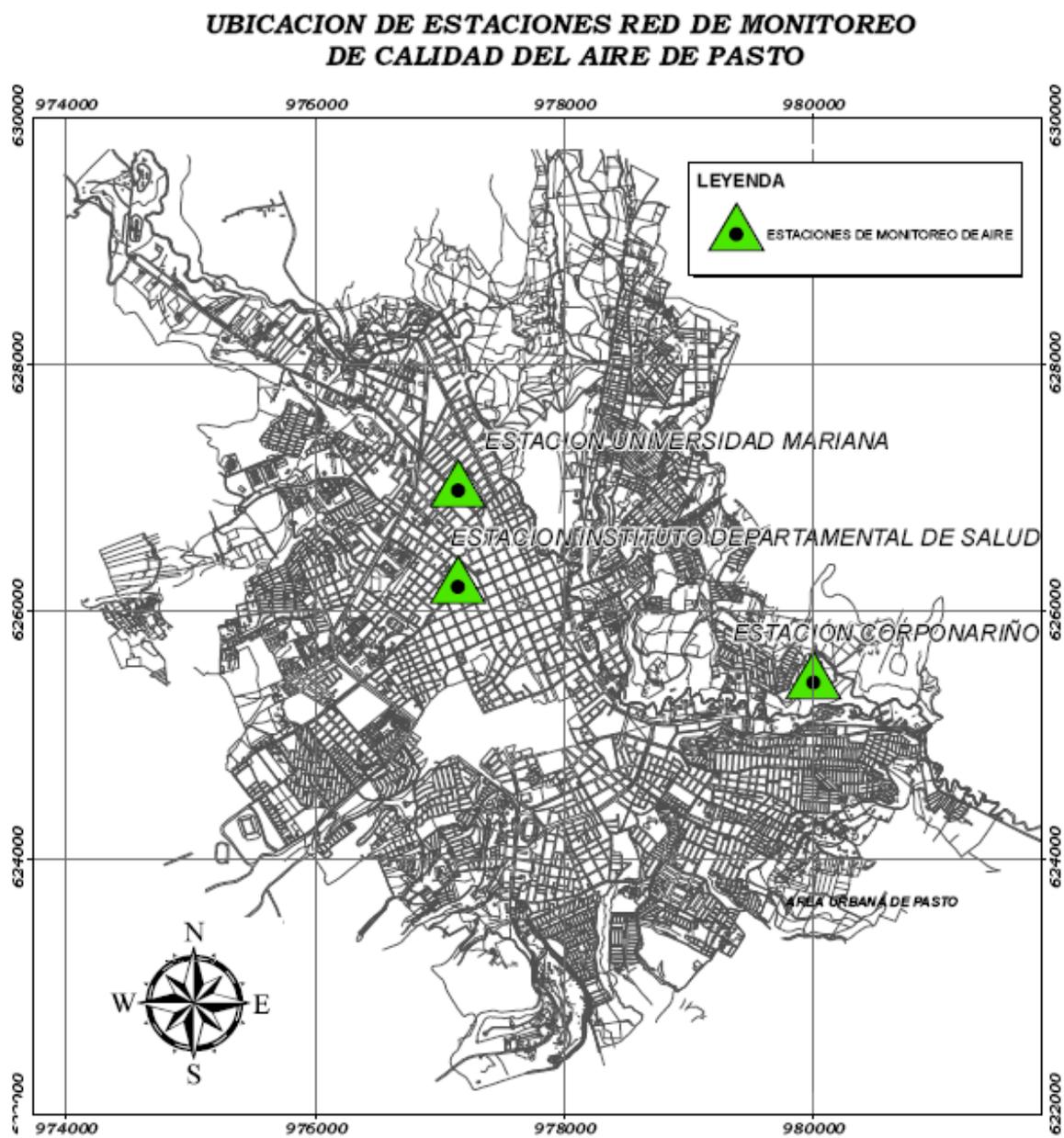
7. CALIDAD DE AIRE EN LA CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO

La Corporación Autónoma Regional de Nariño, CORPONARIÑO, a través del Laboratorio de Control Atmosférico perteneciente a la RMCAP, inició desde el 9 de diciembre de 2008 el control y monitoreo de la calidad del aire en el área urbana de municipio de San Juan de Pasto. Esta red de monitoreo ha tenido el apoyo del MAVDT y del Instituto Departamental de Salud, además este grupo está conformado por las Autoridades Ambientales y algunas Universidades de la ciudad. Las mediciones se iniciaron con equipos manuales de PM_{2,5}, PM₁₀, con los que se inició la primera etapa de la RMCAP, entre 2008 y 2009, y en los últimos meses la red de monitoreo se ha modernizado adquiriendo equipos de medición automática, gracias a la gestión y esfuerzo del MAVDT y CORPONARIÑO, convirtiéndose así en una de las redes de monitoreo más completa y moderna de la región y del país.

La información que genere la RMCAP, permitirá evaluar el estado de la calidad del aire respecto a los contaminantes críticos y las variables meteorológicas, con la finalidad de mantener informada a la población sobre el control de la contaminación para la protección de la salud de la población y el mejoramiento del medio ambiente.

Desde el 9 de diciembre de 2008, hasta el momento, la RMCAP está manipulando los siguientes equipos: 2 equipos medidores de partículas menores de 10 micras (PM₁₀), 3 equipos medidores de partículas menores de 2,5 micras (PM_{2,5}), 2 equipos medidores de partículas suspendidas totales (PST), 1 medidor de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno (APV TRIGAS), 2 estaciones meteorológicas automáticas, 4 sonómetros digitales automáticos, 1 banco de gases, 1 medidor automático isocinético de gases, 2 estaciones automáticas fijas y 1 estación móvil. En la figura 2 se presenta la ubicación geográfica de las estaciones de la RMCAP.

Figura 2. Ubicación geográfica de las estaciones de la RMCAP.



8. METODOLOGÍA

8.1 ÁREA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO

El estudio para la determinación de la calidad del aire en el municipio de San Juan de Pasto, se realizó en las tres estaciones de monitoreo pertenecientes a la RMCAP, la cual está constituida por tres estaciones de monitoreo. En la tabla 9 se presentan los parámetros de las estaciones.

Tabla 9. Parámetros de las estaciones de monitoreo de la RMCAP.

Número de la Estación	Coordenadas			Humedad (%)	Temperatura promedio (°C)	Presión barométrica (mm de Hg)
	x	y	h			
1	977060	627089	2533	34,5	19	570
2	977136	626281	2562	34,5	19	570
3	977248	629586	2593	34,5	19	570

Estación 1: Universidad Mariana.

Estación 2: Instituto Departamental de Salud.

Estación 3: CORPONARIÑO.

8.2 PARÁMETROS SELECCIONADOS

Se determinó la concentración de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en el aire ambiente, por ser estos contaminantes aportados por procesos volcánicos, procesos de combustión en industrias y fuentes móviles.

8.3 SITIOS DE MEDICIÓN

Los sitios de muestreo se localizaron de acuerdo con los criterios de representatividad explicados en el Código de Regulaciones Federales de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (altura de muestreo, localización fuentes cercanas, evaluación de obstáculos naturales y artificiales, seguridad, acceso y facilidades de instalación).

Para los casos anteriores, la estación de monitoreo debe estar localizada en un lugar a una distancia comprendida en un rango de 10 Km de la fuente propuesta. No debe estar a más de 1 Km de la zona en donde se encuentre la máxima concentración por fuentes de emisión existentes o en donde se obtendrá el efecto combinado de las existentes y propuestas.

En caso de cumplirse cualquiera de las condiciones indicadas, los datos obtenidos pueden ser utilizados para determinar, mediante la aplicación de modelos de simulación, la concentración en los otros puntos de interés. Sin embargo, en zonas de terreno complejo o condiciones aerodinámicas complicadas, puede ser necesario el monitoreo en más de una de las localidades indicadas.

Con base en lo señalado anteriormente, se realizaron los muestreos de SO₂ y NO₂ en las tres estaciones de monitoreo (ver figura 2).

Estación fija 1 Universidad Mariana. Se encuentra ubicada entre calle 18 y la carrera 34.

Estación fija 2 Instituto Departamental de Salud. Se encuentra ubicado en la zona céntrica de San Juan de Pasto, entre calle 14 y la carrera 18.

Estación móvil 3 CORPONARIÑO. Sitio que se encuentra ubicado en el barrio La Carolina, calle 25 N° 7 Este 84 Finca Lope.

8.4 PERIODO DE MEDICIÓN

La EPA requiere hasta 1 año de monitoreo, con un mínimo de 4 meses, pasado un mes de calibración y medición, con el fin de asegurar la confiabilidad de los resultados. En Colombia está normatizada la duración de un muestreo de 24 horas y un año para determinar la calidad del aire. La práctica correcta es de muestrear por un mínimo de un año, lo cual es representativo a la calidad del aire en el área de estudio, teniendo en cuenta las condiciones metrológicas del sitio.

Los muestreos se realizaron entre el 10 de agosto y 8 de septiembre de 2009 para las tres estaciones ubicadas dentro del municipio de San Juan de Pasto durante 24 horas para un periodo de 5 días (por duplicado), es decir 10 muestras por sitio. Por lo tanto se colectó un total de 30 muestras de dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂). En el muestreo se realizó la recolección de los gases contaminantes y su respectiva cuantificación.

8.5 EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS

Para la realización del trabajo en campo y en laboratorio, se requirió de los equipos y materiales que se relacionan a continuación:

- ✓ Muestreador APV TRIGAS.
- ✓ Espectrofotómetro UV/VIS.
- ✓ Balanza analítica de precisión.
- ✓ Calibrador de burbuja.
- ✓ GPS.
- ✓ Altímetro.

- ✓ Barómetro.
- ✓ Cronómetro.
- ✓ Termómetro.
- ✓ Reactivos químicos.

Estos equipos, instrumentos y materiales consumibles fueron suministrados por el Laboratorio de Control Atmosférico, de la Corporación Autónoma Regional de Nariño, CORPONARIÑO.

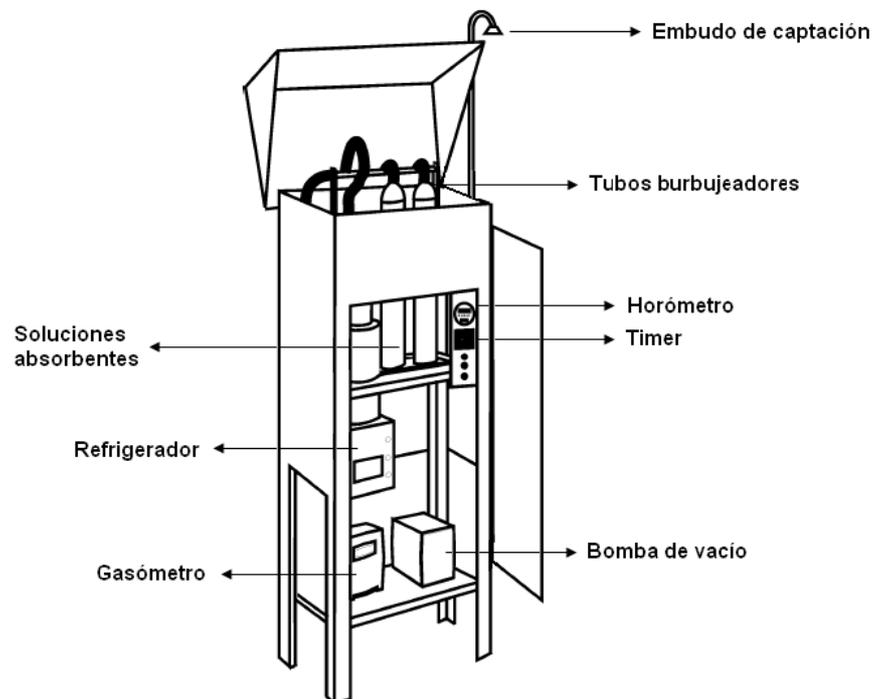
8.5.1 Muestreador APV TRIGAS. El muestreador APV TRIGAS (ver fotografía 6) es un instrumento fabricado para el muestreo y colecta de contaminantes gaseosos en el aire atmosférico. Con este equipo se pueden hacer colectas de uno a tres gases simultáneamente del aire ambiente. En una descripción simplificada, el muestreador APV TRIGAS está formado por un tren de muestreo que mediante el uso de una bomba de vacío, hace burbujear el aire atmosférico en reactivos especiales, con un flujo de aire conocido. Los contaminantes presentes en el aire ambiente son recolectados en unos recipientes de vidrio (tubos burbujeadores) con soluciones absorbentes específicas para cada gas recolectado, para luego realizar un análisis posterior en el laboratorio.

Fotografía 6. Equipo muestreador APV TRIGAS.



8.5.1.1 Procedimiento de muestreo con el equipo APV TRIGAS. Se limpia los tubos burbujeadores con detergente doméstico, detergente alcalino, detergente neutro y agua destilada antes de cada muestreo y en este orden. A continuación se purga los tubos burbujeadores con las soluciones absorbentes respectivas: TCM para muestreo de dióxido de azufre (SO₂) y arsenito de sodio para muestreo de dióxido de nitrógeno (NO₂). Inmediatamente se marca los tubos burbujeadores con el nombre del gas contaminante.

Figura 3. Esquema del equipo muestreador APV TRIGAS.



El tubo burbujeador de SO₂ se llena con 50 mL de solución de TCM y el tubo burbujeador de NO₂ con 50 mL de solución de arsenito de sodio. El tubo que no muestreará contaminante se llena con 50 mL de agua destilada. Se tapan inmediatamente los tubos. Al tubo burbujeador para muestreo de SO₂ se lo coloca en el refrigerador del equipo.

Se enciende manualmente el equipo y se verifica que haya burbujeo en los tres tubos burbujeadores. Se programa el timer para un periodo de muestreo de 24 horas. Se registra la fecha de muestreo y la lectura del registrador de tiempo (horómetro), en el formato muestreo de SO₂ y NO₂.

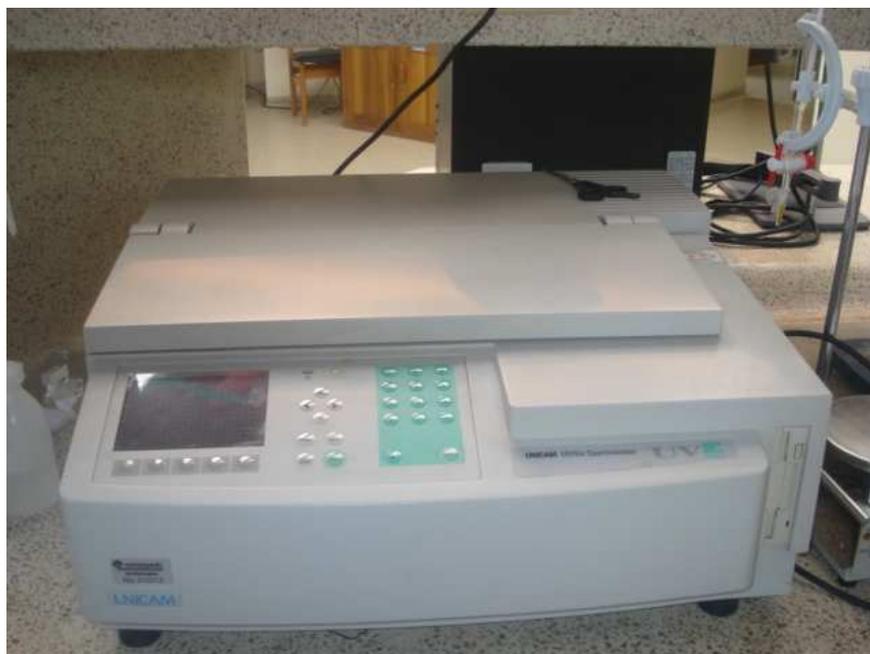
Después de un periodo de 24 horas, se apaga el equipo y se retira los tubos burbujeadores del equipo. Posteriormente se transvasa el contenido de los tubos burbujeadores a dos erlenmeyers de 250 mL. Los erlenmeyers de recolección

fueron previamente lavados con detergente neutro, isopropanol y agua destilada y en este orden.

Se marcan los erlenmeyers de recolección de las muestras con la fecha, el gas contaminante (SO_2 ó NO_2) y el lugar donde se tomó la muestra. Se transporta las soluciones en una nevera de icopor con hielo, para su respectivo análisis químico en el laboratorio.

8.5.2 Espectrofotómetro UV/VIS. El espectrofotómetro UNICAM UV-VIS 2-100 VH15 (ver fotografía 7) es un instrumento que permite comparar la radiación absorbida o transmitida por una solución que contiene una cantidad desconocida de soluto, y una que contiene una cantidad conocida de la misma sustancia.

Fotografía 7. Espectrofotómetro UNICAM UV-VIS 2-100 VH15.



Todas las sustancias pueden absorber energía radiante. La radiación absorbida por las moléculas desde esta región del espectro provoca transiciones electrónicas que pueden ser cuantificadas. La espectroscopia UV/VIS se utiliza para identificar algunos grupos funcionales de moléculas, y además, para determinar el contenido de una sustancia.

8.6 MÉTODOS

8.6.1 Calibración del equipo APV TRIGAS.³³ Para demostrar la idoneidad del método, se calibró el equipo APV TRIGAS realizando múltiples ensayos hasta encontrar las condiciones apropiadas para el estudio. Dentro de los parámetros de calibración estandarizados se encuentran:

- ✓ Flujo óptimo (caudal) para el muestreo.
- ✓ Orificio crítico (aguja hipodérmica).
- ✓ Horómetro (registrador del tiempo).
- ✓ Timer (programador del tiempo).

* Flujo óptimo. Los dispositivos de medición de caudal más conocidos son los medidores de burbuja de jabón. El medidor volumétrico con burbuja indicadora consiste de un tubo de vidrio largo, en el interior del cual una burbuja de jabón, recorre, en un tiempo cronometrado, un volumen delimitado por dos líneas. El medidor volumétrico utilizado para la calibración fue de 150 mL con agujas hipodérmicas de 200 mL/min. Para la determinación del flujo óptimo se utilizó una mezcla homogénea de agua jabón en proporción 2:1, se midió el tiempo cronometrado y el volumen de desplazamiento, a condiciones patrón de 25° C temperatura ambiente, 15 °C de temperatura del agua y 570 mm de Hg de presión. Este ensayo se lo realizó por triplicado para garantizar la validez de los resultados. El flujo óptimo fue de 0,22 L/min.

* Orificio crítico. Se calibra con un dispositivo de medición de caudal, tal como el medidor volumétrico con burbuja indicadora (procedimiento anterior). Para la calibración, el medidor volumétrico con burbuja indicadora se utiliza: una mezcla homogénea de agua y jabón, en proporción 2:1, un burbujeador con agua, dos filtros de protección, el orificio que se quiere calibrar, una bomba de vacío con manómetro, un cronómetro, un barómetro y un termómetro. Esta calibración se realizó a condiciones patrón, 25° C temperatura ambiente, 15 °C de temperatura del agua y 570 mm de Hg de presión. Este ensayo se lo realizó por triplicado para obtener un resultado óptimo. El caudal calculado fue de 0,20L/min.

* Horómetro. Se calibró contra un cronómetro de exactitud comprobada. La ganancia o pérdida no superó los 2 min en un periodo de 24 horas. Error de medición de 1/100 de la hora.

* Timer. Se calibró contra un cronómetro de exactitud comprobada. El timer sirve para encender y apagar automáticamente el muestreador APV TRIGAS. Es de alta precisión. Se programó el encendido y apagado del muestreador el día, la hora y el minuto de la semana señalado.

³³ COELHO DÍAS, José. FRONDIZI, Carlos Alberto. Manual de operação. APV TRIGÁS Amostrador de Pequeno Volume Para Coleta de Até Três Gases. Rio de Janeiro, 2001

8.6.2 Estandarización del método espectrofotométrico. Con el fin de demostrar la idoneidad del método espectrofotométrico, para análisis de SO₂ y NO₂, se estandarizó el método. En el espectrofotómetro UNICAM UV-VIS 2-100 VH-15 se realizó diferentes ensayos hasta encontrar las condiciones óptimas.

* Preparación de las soluciones patrón de SO₂ (28,8, 21,6, 14,4, 7,2, 3,6 y 0 µg SO₂/mL) y NO₂ (0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5 y 2 µg NO₂/mL).

* Barrido espectral las soluciones patrón de 7,20 µg SO₂/mL y 500 µg NO₂/mL, para obtener la longitud de onda máxima de absorción del SO₂ y NO₂.

* Curva de calibración.

8.6.3 Toma de muestras. En cada una de las estaciones se recolectó NO₂ y SO₂ en 50 mL de solución absorbente (por ser una muestra representativa) contenida en los tubos burbujeadores, durante un periodo de 24 horas. Las muestras se preservaron a partir de su recolección a 4 °C. El proceso de toma de muestras se realizó en el lapso de 30 días, en cada estación se recogieron diez muestras de 24 horas cada una, con el fin de verificar los posibles cambios en el aire ambiente del sector.

8.7 ANÁLISIS DE LA MUESTRA DE DIÓXIDO DE AZUFRE³⁴

8.7.1 Tratamiento de la muestra de dióxido de azufre. En un balón aforado de 25 mL se depositan 10 mL de la muestra recolectada. Se deja que la muestra repose durante 20 minutos para que el ozono que puede estar presente se descomponga. Luego se adiciona 1 mL de H₃NO₃S (0,6%) y se deja reaccionar durante 10 minutos. En seguida se adicionan 2 mL de la solución de formaldehído (0,2%) y 5 mL de la solución de pararosnilina. Se lleva el balón a volumen con agua destilada recientemente hervida y enfriada (a temperatura ambiente) y se agita vigorosamente. Durante 30 minutos la solución deben estar en un ambiente de temperatura controlada en un rango de 20 – 30 °C. Después de 30 minutos y antes de 60 minutos, se determina la absorbancia a 548 nm usando celdas de 1 cm de longitud.

8.7.2 Preparación de las soluciones patrón. Se prepara una dilución de 10 mL de la solución de sulfito-TCM en 100 mL de reactivo de absorción TCM (solución de trabajo diluida). De acuerdo con la tabla 10, se mide de manera muy precisa los volúmenes indicados de la solución de sulfito-TCM en balones aforados de 25 mL. Posteriormente se adiciona el reactivo absorbente TCM según se indica para llevar el volumen de cada balón a 10 mL.

³⁴ United States Environmental Protection Agency. Method 20. Determination of Nitrogen Oxides, Sulfur Dioxide, and Diluents emissions from stationary gas turbines. Norma EPA 40 CFR part 50 App. A, que tiene su equivalente en la norma ASTM D 2914 (Método A) y en la NTC-ISO6767.

Tabla 10. Volúmenes de las soluciones patrón de sulfito-TCM.

Solución sulfito – TCM (S.S/TCM)	Volumen S.S/TCM	Volumen TCM	Concentración $\mu\text{g SO}_2/\text{mL}$
De trabajo diluida	4,0	6,0	28,8
De trabajo diluida	3,0	7,0	21,6
De trabajo diluida	2,0	8,0	14,4
De trabajo diluida	10,0	0,0	7,2
De trabajo diluida	5,0	5,0	3,6
De trabajo diluida	0,0	10,0	0,0

A cada balón aforado se le adiciona 1 mL de $\text{H}_3\text{NO}_3\text{S}$ (0,6%) y 2 mL de solución de formaldehído al 0,2%. Inmediatamente se añaden 5 mL de solución de pararosanilina y se inicia el conteo de 30 minutos. Se lleva los balones a volumen con agua destilada recién hervida y enfriada, y se agita vigorosamente. Después de 30 minutos se determina la absorbancia para cada estándar a 548 nm frente a agua destilada como referencia.

La ecuación de calibración es determinada usando el método de mínimos cuadrados. La cantidad total de SO_2 en μg contenida en cada solución es la variable X, y la absorbancia asociada a cada solución es la variable Y. Para que la calibración sea valida, el coeficiente de correlación debe ser mayor de 0,998.

8.8 ANÁLISIS DE LA MUESTRA DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO³⁵

8.8.1 Tratamiento de la muestra de dióxido de nitrógeno. En un erlenmeyer de 100 mL se depositan 10 mL de la muestra recolectada. A continuación se adiciona 1 mL de solución de H_2O_2 , 10 mL de solución de sulfanilamina y 1,4 mL de solución de NEDA. Se agita vigorosamente durante la adición de cada reactivo. Después de 10 minutos de reacción en los que se desarrolla el color, se mide la absorbancia 540 nm. Se determina la concentración de NO_2 en $\mu\text{g NO}_2^-/\text{mL}$ a partir de la curva de calibración obtenida.

8.8.2 Preparación de las soluciones patrón. Se preparan los estándares de calibración haciendo las diluciones correspondientes de la solución estándar de trabajo de nitrito de sodio, según la tabla 11, se usa reactivo de absorción para todas las soluciones.

³⁵ United States Environmental Protection Agency. Method 20. Determination of Nitrogen Oxides, Sulfur Dioxide, and Diluents emissions from stationary gas turbines. Norma ASTM D1607-91, que tiene su equivalente en la norma VDI 2453.

Tabla 11. Volúmenes de las soluciones patrón de nitrito de sodio.

Volumen de solución estándar de trabajo (mL)	Volumen final (mL)	Concentración $\mu\text{g NO}_2^-/\text{mL}$
1	100	0,1
2	100	0,2
5	100	0,5
10	100	1,0
15	100	1,5
20	100	2,0

Se mide y se registra las absorbancias corregidas para cada estándar de calibración (0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5, 2 $\mu\text{g NO}_2^-/\text{mL}$) a 540 nm frente a agua destilada como referencia. En la grafica, el eje Y corresponde a las absorbancias y el eje X corresponde a la concentración de $\mu\text{g NO}_2^-/\text{mL}$. Se determina la ecuación de la recta que mejor describa al sistema, se debe obtener una línea recta con un coeficiente de correlación mayor a 0,998.

8.9 PREVALIDACIÓN DEL MÉTODO ANALÍTICO

Los resultados de los anteriores ensayos de adecuación se estudiaron estadísticamente para validar el método y garantizar el aceptable desempeño de los criterios de ensayo para su propósito. Los parámetros analizados y que nos permiten la validación del método son:

- ✓ Linealidad y sensibilidad.
- ✓ Precisión.
- ✓ Exactitud.

Linealidad y sensibilidad. Para determinar la proporcionalidad entre la concentración del analito y su respuesta, se utilizaron los datos de las curvas de calibración realizadas mediante la medición de la absorbancia de soluciones patrón de concentraciones conocidas (SO_2 : 28,8, 21,6, 14,4, 7,2, 3,6 y 0 $\mu\text{g SO}_2/\text{mL}$; y NO_2 : 0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5 y 2 $\mu\text{g NO}_2^-/\text{mL}$), cada una por triplicado, con el fin de encontrar el rango lineal el cual corresponde al intervalo comprendido entre la concentración mínima y máxima del analito. La absorbancia fue determinada a una longitud de onda de 548 nm para el SO_2 y 540 nm para el NO_2 .

La curva de calibración conseguida a partir de estas medidas fue analizada por método de regresión lineal, calculándose el coeficiente de correlación de la ecuación de la recta. A partir del dato de la pendiente en la ecuación de la recta se pudo conocer la sensibilidad de calibración y la sensibilidad del método espectrofotométrico que corresponde a la determinación de los parámetros: límites de cuantificación y detección.

Límites de cuantificación y detección. Con el fin de conocer la sensibilidad del método espectrofotométrico se determinó el límite de cuantificación y detección para cada uno de los gases de la muestra estándar, para esto, se midieron las absorbancias de las soluciones de las tablas 10 y 11. El análisis se efectuó por triplicado y con los datos obtenidos se realizaron las correspondientes curvas de calibración de cada gas presente en la muestra lo cual permite el cálculo de los parámetros deseados.

Precisión. Para conocer la dispersión de las medidas alrededor de su valor medio o central y a la vez, el grado de concordancia entre ensayos individuales cuando el método se aplica repetidamente se calculó la precisión expresada en parámetros de repetitividad (que refleja la precisión del método cuando se realiza bajo las mismas condiciones, utilizando la misma muestra en un periodo corto de tiempo³⁶) y reproducibilidad (medida de la precisión de los resultados de ensayos realizados sobre la misma muestra en diferentes días⁷¹) expresados en términos de desviación estándar, porcentaje de desviación estándar relativa (RSD) ó coeficiente de variación (CV) e intervalos de confianza del 95%.

Repetitividad. Para la determinación de este parámetro se trabajo con cada una de las soluciones de las tablas 10 y 11, con concentraciones dentro del rango lineal definido, preparadas a partir de una solución patrón madre de 7,2 µg SO₂/mL del estándar de SO₂ y de 500 µg NO₂/mL del estándar de NO₂. A cada una de estas soluciones se le determinó la absorbancia y realizó este proceso por triplicado con el mismo analista y en el mismo día.

Reproducibilidad. Para evaluar la reproducibilidad del método espectrofotométrico se trabajó con una solución de cada concentración (ver tablas 10 y 11) del rango lineal establecido, para cada una de las cuales fue medida la absorbancia por triplicado.

³⁶ PÉREZ CUADRARO, José. PUJOL FORM, Martí. Validación de Métodos Analíticos. A.E.F.I España, 2001

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

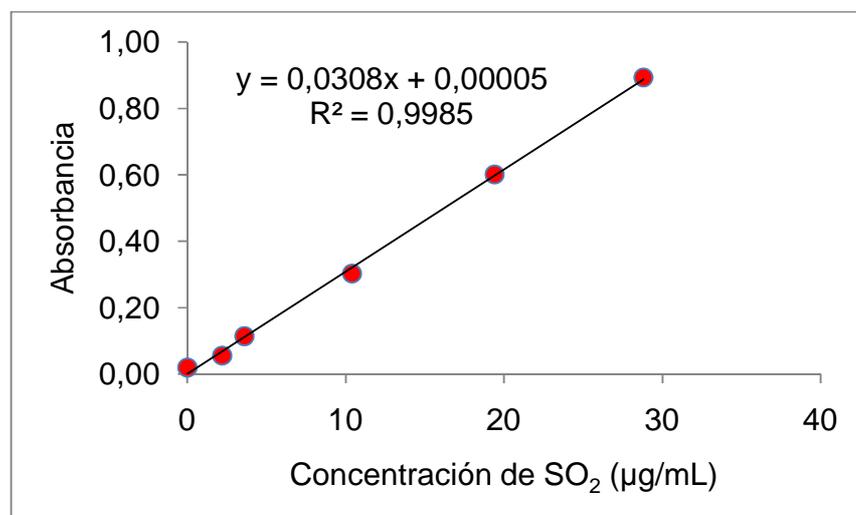
9.1 ESTANDARIZACIÓN DE LA TÉCNICA ESPECTROFOTOMÉTRICA

Teniendo en cuenta los métodos^{18,19} reportados por la Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos US EPA para el análisis de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno utilizando espectrofotometría, se hizo necesario estandarizar las condiciones del espectrofotómetro para garantizar resultados confiables en el análisis de SO₂ y NO₂ a partir de muestras del aire ambiente de la ciudad de San Juan de Pasto.

Al realizar el barrido espectral a las soluciones patrones se obtuvo un máximo de absorción en la longitud de onda de 548 nm para la solución de 7,2 µg SO₂/mL y 540 nm para la solución de 500 µg NO₂/mL.

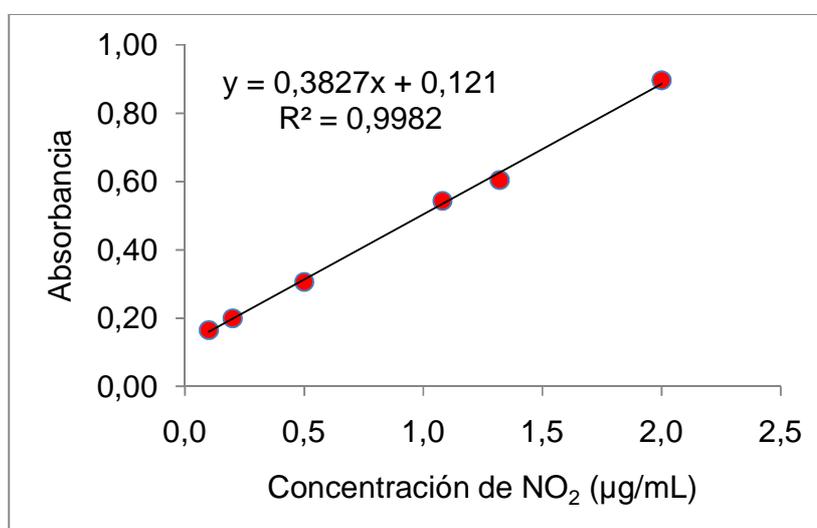
9.1.1 Estandarización de la técnica espectrofotométrica para el dióxido de azufre. La determinación de la concentración máscica de SO₂ se hizo por medio de la preparación de soluciones patrón de sulfito-TCM de concentración conocida (28,8, 21,6, 14,4, 7,2, 3,6 y 0 µg SO₂/mL) para realizar una curva de calibración. La curva de calibración de la figura 4 relacionan las concentraciones de SO₂ determinadas por el método espectrofotométrico. La curva de calibración se hizo para un total de 30 muestras de SO₂, cuyo coeficiente de correlación es de 0,9985. Estos datos presentan un error absoluto promedio de 0,48%, con una desviación estándar de 0,076%.

Figura 4. Curva de calibración para el dióxido de azufre (λ 548 nm).



9.1.2 Estandarización de la técnica espectrofotométrica para el dióxido de nitrógeno. De igual manera la determinación de la concentración másica de NO₂ se hizo por medio de la preparación de soluciones patrón de nitrito de sodio de concentración conocida (0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5 y 2 µg NO₂⁻/mL) para realizar una curva de calibración. La figura 5 muestra la curva de calibración para un total de 30 muestras de NO₂. La curva tiene un coeficiente de correlación de 0,9982 y los datos presentan un error absoluto promedio de 0,04%, con una desviación estándar de 0,071%.

Figura 5. Curva de calibración para el dióxido de nitrógeno (λ 540 nm).



9.1.3 Linealidad. Las curvas de calibración (figuras 4 y 5) que se obtuvieron muestran que el método espectrofotométrico es lineal y presenta un coeficiente de correlación igual a 0,9985 (figura 4) y 0,9982 (figura 5). La linealidad determina la región de la curva respuesta o de cuantificación en que hay relación directa entre la señal instrumental y la concentración del gas analizado, siendo un método lineal³⁷ cuando presenta una $r > 0,99$.

9.1.4 Sensibilidad. Las pendientes de las rectas de las curvas patrón fueron 0,0308 (figura 4) y 0,3827 (figura 5), se observa que estos valores son menores a 1, lo cual indica que hay una buena sensibilidad del método espectrofotométrico en función de la concentración del analito.

³⁷ Maeda K, Fukura M. Guidance on Validation of Analytical Methods: Methodology. Press. London, 2000. pp. 283 - 358.

9.1.5 Precisión y repetibilidad. Los resultados de las pruebas de precisión muestran las variaciones obtenidas en las absorbancias, la absorbancia media y la desviación estándar (tablas 12 y 13, ver anexos B).

La repetibilidad de los valores de desviación estándar relativa (RSD) están por debajo del 1%, lo cual indican que el método es preciso, por lo tanto el método espectrofotométrico es considerado aceptable.²⁰

La repetibilidad fue establecida al comparar los resultados de las mediciones obtenidas a seis niveles de concentración, y sus coeficientes de variación son inferiores a 1%.

9.1.6 Límites de cuantificación para el dióxido de azufre. El límite inferior de cuantificación es de 0,75 $\mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ en 10 mL de TCM, en una muestra de aire de 30 litros en un periodo de muestreo de 24 horas).

El límite superior de cuantificación es de 34 $\mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ en 10 mL de TCM, en una muestra de aire de 30 litros en un periodo de muestreo de 24 horas.

9.1.7 Límites de cuantificación para el dióxido de nitrógeno. El límite inferior de cuantificación es de 9 $\mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ (0,005 ppm) en 50 mL de reactivo absorbente, en una muestra de aire de 30 litros y durante 24 horas.

El límite superior de cuantificación es de 750 $\mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ (0,4 ppm) en 50 mL de reactivo absorbente, en una muestra de aire de 30 litros y durante 24 horas.

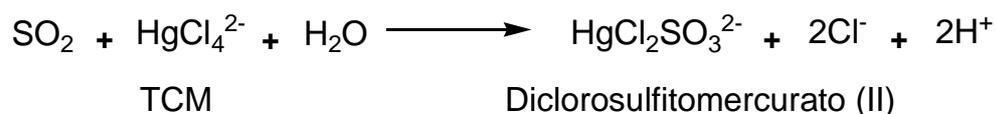
9.1.8 Límite de detección para el dióxido de azufre. La mínima concentración de dióxido de azufre que se puede analizar es de 0,075 $\mu\text{g SO}_2/\text{mL}$.

9.1.9 Límite de detección para el dióxido de nitrógeno. La mínima concentración de dióxido de azufre que se puede analizar es de 0,005 $\mu\text{g NO}_2/\text{mL}$.

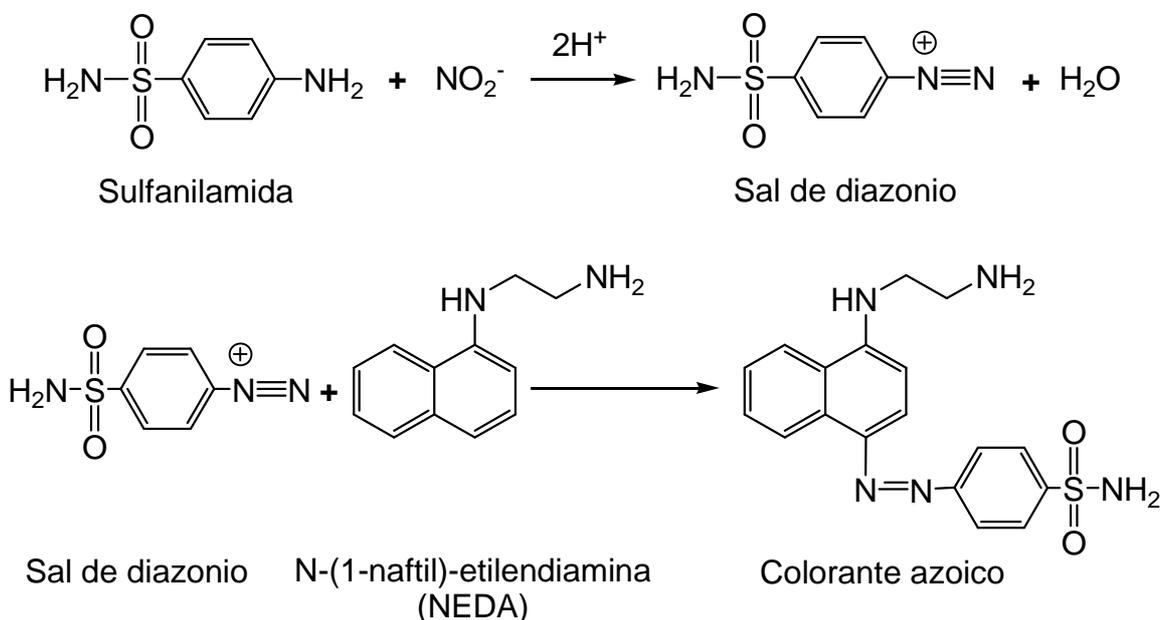
9.2 ANÁLISIS QUÍMICO

9.2.1 Determinación de dióxido de azufre en la atmósfera. El SO_2 presente en el aire ambiente reacciona con la solución absorbente de tetracloromercurato (TCM) de potasio, $\text{K}_2[\text{HgCl}_4]$, formando el complejo diclorosulfitomercurato (II), $\text{HgCl}_2\text{SO}_3^{2-}$.

Esquema 4. Formación de complejo diclorosulfitomercurato (II).



Esquema 6. Reacción de Griess.³⁸ Formación del colorante azoico.



9.3 RESULTADOS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO

El resultado de las mediciones de las concentraciones de SO₂ y NO₂ en las diferentes estaciones de muestreo se presenta en la tabla 16 (ver anexos C). De acuerdo con los resultados obtenidos de las concentraciones de SO₂ y NO₂ durante el periodo de medición en los diferentes puntos de muestreo, se observa que las concentraciones cumplen con la norma diaria de calidad del aire para la ciudad de San Juan de Pasto, 191 µg/m³ para SO₂ y 115 µg/m³ para NO₂. No se lleva a cabo una comparación de las concentraciones obtenidas en campo con la norma anual (61µg/m³ para SO₂ y 77 µg/m³ para NO₂), ya que el periodo de muestreo fue tan solo de 30 días; sin embargo, si las concentraciones de SO₂ y NO₂ presentan el mismo comportamiento que el registrado en el periodo de muestreo para un periodo de 12 meses, posiblemente todos los sitios de muestreo cumplirían con la norma anual de calidad del aire.

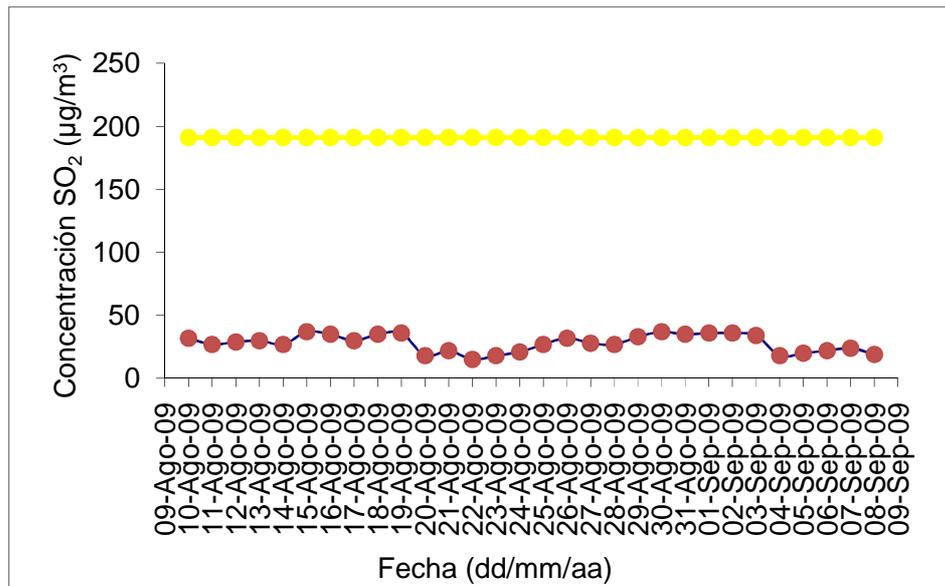
La tabla 17 (ver anexos C) contiene el resumen estadístico de las concentraciones de SO₂ y NO₂ halladas en los tres puntos de medición. Al comparar los valores promedio de las concentraciones de SO₂ y NO₂ de la estación 1 y 2, con respecto a la estación 3, se puede observar que los valores son inferiores a los de las otras

³⁸ Determinación espectrofotométrica de nitritos en el aire ambiente. Universidad de Castilla La Mancha. Química analítica aplicada. Disponible en la página web www.uclm.es/. Visitada el 19 de septiembre de 2009.

estaciones, debido a que la estación 3 se encuentra retirada del centro de la ciudad, es decir que el aire ambiente de esta estación se halla menos contaminado, en cambio el aire ambiente de las estaciones 1 y 2 está más contaminado a causa del parque automotor y de las actividades comerciales del centro de la ciudad. De acuerdo con los valores de la tabla 16 se puede observar que en la estación 2 los valores son los más altos, debido a que en esta vía de la ciudad (sector Bomboná) hay una gran movilidad de vehículos y es una calle donde el tráfico vehicular se moviliza a una baja velocidad, debido a la longitud de esta calle es muy angosta. Con lo que respecta a la estación 1, la vía es amplia donde los vehículos se movilizan a mayor velocidad ya que es una avenida de doble carril.

9.3.1 Dióxido de azufre. En la figura 6 se muestran graficados los valores de concentración de SO₂ para un periodo de 30 días del SO₂ en las tres estaciones de monitoreo.

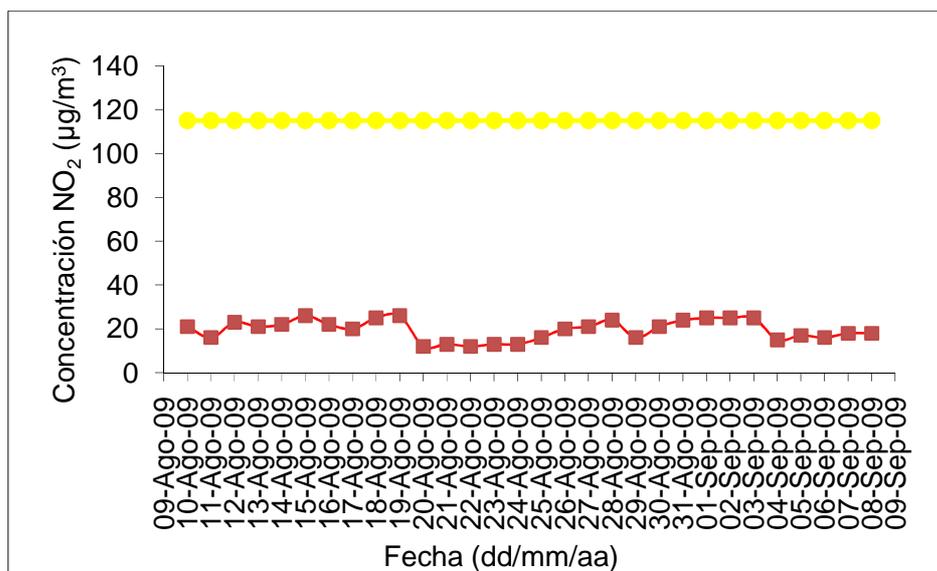
Figura 6. Comportamiento de la concentración de SO₂ en 30 días.



En esta grafica se puede observa que los valores de concentración de SO₂ se mantienen por debajo de 40 µg/m³, es decir que se considera que el SO₂ se ha constituido como un contaminante de menor impacto en la Calidad del Aire de la ciudad de San Juan de Pasto, con una concentración estable que varía entre 15 y 37 µg/m³. Lo anterior significa que la totalidad de los datos (30 días) se ubican por debajo del 80% (191 µg/m³, línea amarilla) de la normatividad Colombiana, indicando una calidad de aire “buena” con respecto al SO₂.

9.3.2 Dióxido de nitrógeno. En la figura 7 se muestra graficado el comportamiento de la concentración de NO₂ en un periodo de 30 días, para las tres estaciones de muestreo.

Figura 7. Comportamiento de la concentración de NO₂ en 30 días.



Se puede observar en la anterior gráfica que los valores de concentración de NO₂ están por debajo de 30 µg/m³, es decir que el NO₂ es un contaminante en términos epidemiológicos que no representa un riesgo importante para la salud de la población. Las concentraciones diarias de NO₂ se encuentran en un rango entre 12 y 26 µg/m³ los cuales son inferiores a la norma Colombiana en un 75% (115 µg/m³, línea amarilla).

9.3.3 Índice de Calidad del Aire, ICA. En base a los datos obtenidos en las tres estaciones, para categorizar la calidad del aire en la ciudad de San Juan de Pasto, a continuación se presentan los datos consolidados del 10 de agosto al 8 de septiembre de 2009. En las tablas 18 y 19 (ver anexos C) se muestra el valor cualitativo del ICA para cada día el cual permite conocer el comportamiento en el mes.

La tabla 19 consigna los niveles de contaminación en los que se encuentran los diferentes sitios de muestreo, según los valores guía UK DETR³⁹ para la contaminación del aire por óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno.

³⁹ Department of the Environment, Transport and the Region's (DETR). Department of the Environment (1999). Feedback. London, UK: DETR.

Como se esperaba los resultados del estudio de los niveles de concentración de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en el municipio de San Juan de Pasto se encuentra entre 15 y 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para dióxido de azufre (SO_2), y 12 y 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para dióxido de nitrógeno (NO_2), concentraciones que en ningún momento están por encima de la norma de emisiones que establece la Resolución 601 de 2006, 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para SO_2 y 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para NO_2 , pero a condiciones locales es de 191 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para SO_2 y 115 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para NO_2 . Además la Calidad de Aire de la ciudad de San Juan de Pasto esta en la categoría “Buena” y en un nivel de contaminación “Bajo”. Por lo tanto se concluye de todo el estudio realizado que la Calidad de Aire de la ciudad de San Juan de Pasto es considerada como satisfactoria, por lo tanto la contaminación del aire es mínima.

Los eventos meteorológicos tales como lluvia, radiación solar, dirección y velocidad del viento son diferentes en cada época del año; las actividades humanas por igual, es decir que en temporadas decembrinas, carnavales, escolares el flujo vehicular se incrementa y por lo tanto la contaminación aumenta; y los eventos naturales tales como las erupciones del Volcán Galeras no es contante, de acuerdo a todo lo anterior se recomienda realizar un monitoreo anual de estos gases ya que los eventos meteorológicos, las actividades humanas y las manifestaciones naturales durante el transcurso del año no son similares.

10. CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis diarios y horarios realizados durante el 2009 en las tres estaciones de monitoreo de calidad de aire de Pasto, indican que durante el 10 de agosto y 8 de septiembre no se superaron las normas de calidad de aire estipuladas en la Resolución 601 de 2006, para dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂).

En términos generales se concluye que en el municipio de San Juan de Pasto no se presentan problemas de contaminación del aire por óxidos de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO₂). Por lo tanto las concentraciones de estos contaminantes no representan un problema serio para la salud de la población, es decir que las concentraciones de SO₂ y NO₂ están por debajo de las normas de calidad del aire.

Todas las concentraciones promedio de SO₂ (29,2, 35,1 y 19,7 µg/m³) encontradas durante el periodo de 30 días de medición en las tres estaciones de muestreo cumplen con la norma diaria de calidad del aire para la ciudad de Pasto (191 µg/m³).

Todas las concentraciones promedio de NO₂ (20, 23,9 y 14,7 µg/m³) encontradas durante el periodo de 30 días de medición en los tres puntos de muestreo cumplen con la norma diaria de calidad del aire para la ciudad de Pasto (115 µg/m³).

El Índice de Calidad del Aire empleado establece que la calidad del aire se encuentra en la categoría "Buena" y en un nivel de contaminación "Bajo". Lo anterior ratifica que la ciudad de San Juan de Pasto, no presenta problemas de contaminación del aire por los contaminantes monitoreados (SO₂ y NO₂).

Este trabajo permitió concluir que los datos obtenidos en las estaciones de monitoreo, presentan una concentración remanente en el tiempo con tendencia a la disminución en algunos sectores e incrementos en otros, como es el caso de las estaciones 1 y 2 que son las más afectadas ya que se hallan en la zona céntrica de la ciudad, mientras la estación 3 es el sector más limpio, ya que se encuentra ubicada en una zona residencial a las afueras de la ciudad.

El método espectrofotométrico UV/VIS, es un método confiable para la determinación de la concentración de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en el aire ambiente, y puede ser utilizado para estudios posteriores relacionados con este aspecto.

Finalmente se concluye que en el periodo del 10 de agosto y el 8 de septiembre, se obtuvieron los valores de concentración inferiores al nivel de prevención establecidos por la resolución 601 de 2006, por el cual el Laboratorio de Control Atmosférico perteneciente a la RMCAP continuará con las actividades de seguimiento y control a las fuentes móviles y fijas en la ciudad de San Juan de Pasto.

11. RECOMENDACIONES

Si bien las concentraciones de SO₂ y NO₂ obtenidas en las muestras de Calidad de Aire en San Juan de Pasto no superan los estándares nacionales, es recomendable el monitoreo periódico de estos y otros contaminantes contenidos en el aire, para evaluar su evolución y poder tomar acciones preventivas antes que correctivas en el fenómeno de la contaminación del aire.

Hay varios sitios de medición que posiblemente no cumplirían con la norma anual de calidad del aire si las concentraciones de SO₂ y NO₂ presentan el mismo comportamiento que el registrado en el periodo de muestreo para un periodo de 12 meses y otros que estarían muy cerca de alcanzarla. Lo anterior muy seguramente se debe al alto porcentaje del parque automotor que se moviliza en la zona centro del municipio de San Juan de Pasto y por lo tanto se debe buscar la forma de hacerle seguimiento de emisiones a este sector y en su defecto realizar control de emisiones a las fuentes móviles.

Se recomienda ubicar cuatro puntos estratégicos de muestreo, los cuales dos se ubiquen en la zona céntrica de la ciudad y los otros en las vías más transitadas en las horas pico.

Es importante anotar que los índices de calidad del aire se establecen con base en las normas de calidad del aire a corto plazo (24 horas o menos) y por lo tanto no tienen en cuenta los efectos a largo plazo. Desde ese punto de vista, habría que hacer mediciones durante un periodo de muestreo de 12 meses, para compararla con la norma anual de calidad del aire.

Se recomienda realizar un estudio referente a otros contaminantes presentes en la atmosfera tales como ozono, metales pesados, fluorocarbonados, monóxido de carbono, etc., ya que no se conoce cual es la concentración actual en el aire ambiente de la ciudad de San Juan de Pasto.

Es necesaria una labor Interinstitucional que genere proyectos enfocados a culturizar el uso del vehículo particular en el centro de la ciudad, y a reducir el ritmo de aumento del parque automotor, para evitar que la concentración de gases contaminantes en el aire siga creciendo y continúe generando impactos.

BIBLIOGRAFÍA

Agenda Ambiental del Municipio de Pasto. Subdirección de Conocimiento y Calidad Ambiental. CORPONARIÑO, 2007. pp. 284.

Análisis de lo Contaminantes del Aire. CORPONARIÑO. Agenda Ambiental de Nariño. 2002.

Artículo 23. Plan de Ordenamiento Territorial, Pasto 2012: Realidad posible.

Clear Air Act Amendments. Los Estados Unidos crean una legislación promulgada por el Congreso para controlar la contaminación del aire a nivel nacional en 1955.

COELHO DÍAS, José. FRONDIZI, Carlos Alberto. Manual de operação. APV TRIGÁS Amostrador de Pequeño Volume Para Coleta de Até Três Gases. Rio de Janeiro, 2001

Colombia Link. Información disponible en la página web www.colombialink.com/. Visitada el 29 de marzo de 2009.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Información disponible en la página web www.dane.gov.co/censo/. Visitada el 29 de marzo de 2009.

Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). Información disponible en la página web www.dama.gov.co/. Visitada el 30 de marzo de 2009.

Department of the Environment, Transport and the Region's (DETR). Department of the Environment (1999). Feedback. London, UK: DETR.

Determinación espectrofotométrica de nitritos en el aire ambiente. Universidad de Castilla La Mancha. Química analítica aplicada. Disponible en la página web www.uclm.es/. Visitado el 19 de septiembre de 2009.

Inventario de fuentes fijas con trámite de permiso de emisiones. CORPONARIÑO. 2009.

Las Conferencias de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, también conocidas como las Cumbres de la Tierra. Cumbres Internacionales que tuvieron lugar en Río de Janeiro (Brasil) del 3 de junio al 14 de junio.

Maeda K, Fukura M. Guidance on Validation of Analytical Methods: Methodology. Press. London, 2000. pp. 283 - 358.

Organización Mundial de la Salud (OMS). Calidad del Aire y Salud. Información disponible en la página web www.who.int/es/. Visitada: 8 de agosto de 2009.

PÉREZ CUADRARO, José. PUJOL FORM, Martí. Validación de Métodos Analíticos. A.E.F.I España, 2001

Protocolo de KYOTO de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Naciones Unidas, 199. FCCC/INFORMAL/83* GE.05-61702 (S) 130605.

República de Colombia. Ministerio de Desarrollo Económico. Resolución 05 de 1996. Febrero 20 de 1996.

República de Colombia. Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución número 1955, 8 de noviembre de 2007.

República de Colombia. Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Manual de Inventario de Fuentes Puntuales. Consultor K2 Ingeniería Ltda. 2002.

República de Colombia. Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Manual de Inventario de Fuentes Móviles. Consultor K2 Ingeniería Ltda. 2002.

República de Colombia. Ministerio de Salud. IDEAM. Resolución No. 19622 del 31 de Diciembre de 1985. Diciembre 31 de 1985.

República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Sistema Nacional Ambiental -SINA-. Ley 99 de 1993.

República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Ley 23 de 1973. Diciembre 19 de 1973.

República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto - Ley 2811. Diciembre 18 de 1974.

República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Ley 9 de 1979. Enero 24 de 1979.

República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Ley 99 de 1993. Diciembre 22 de 1993.

República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 909 de 1996. Enero 1 de 1996.

República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 1228 de 1997. Mayo 6 de 1997.

República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 619 de 1997. Julio 7 de 1997.

República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 1048 de 1999. Diciembre 6 de 1999.

República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Sistema Nacional Ambiental -SINA-. Resolución 601 de 04 de abril de 2006.

RODRÍGUEZ, Ramón y RODRÍGUEZ Ignacio Muñoz. Manual de Gestión del Medio Ambiente. Madrid: MAPFRE S.A., 1994

Secretaria de Transito y Transito Municipal (Pasto). Información disponible en la página web www.pasto.gov.co/dependencias/dattm/. Visitada el 28 de marzo de 2009.

Sistema de Vigilancia de la Calidad de Aire (CD-ROM). Pasto. Octubre del 2007. SYOWA BASE. Suborbital Launch Site. Japan. Información disponible en la página web www.astronautix.com/sites/syoabase.htm/. Visitada: 19 de agosto de 2009.

The Clean Air Act 1956. El Parlamento del Reino Unido aprobó esta ley en respuesta a la gran "smog" de Londres en 1952.

TRIGAS. Información disponible en la página web www.trigas.com.ve/. Visitada el 3 de abril de 2009.

United States Environmental Protection Agency. Method 20. Determination of *Nitrogen Oxides, Sulfur Dioxide, and Diluents* emissions from stationary gas turbines. Norma EPA 40 CFR part 50 App. A, que tiene su equivalente en la norma ASTM D 2914 (Método A) y en la NTC-ISO6767.

United States Environmental Protection Agency. Method 20. Determination of *Nitrogen Oxides, Sulfur Dioxide, and Diluents* emissions from stationary gas turbines. Norma ASTM D1607-91, que tiene su equivalente en la norma VDI 2453.

ANEXOS

Anexo A. Preparación de reactivos utilizados para la determinación de SO₂ y NO₂ en el muestreo y en el análisis químico en el laboratorio.

A.1 REACTIVOS PARA MUESTREO

A.1.1 Agua destilada. Procedimiento de verificación de pureza. Se adicionan 0,20 mL de solución de KMnO₄ (0,316 g/1 litro) a una mezcla de 500 mL de agua destilada y 1 mL de H₂SO₄. Si la coloración del KMnO₄ (rosado) no desaparece luego de una hora de reposo a temperatura ambiente, el agua es apta de ser utilizada; si el color desaparece, debe repurificarse el agua.

A.1.2 Procedimiento de purificación del agua destilada. Se adiciona 1 g de KMnO₄ y BaOH a cada litro de agua destilada. Redestilar el agua en un destilador de vidrio.

A.1.3 Reactivo de absorción de SO₂. Tetracloruromercurato de potasio. Se disuelven 10,86 g de HgCl₂, 0,066 g de EDTA y 0,6 g de KCl en agua destilada, se diluye hasta 1 litro en un balón aforado del volumen correspondiente.

A.1.4 Reactivo de absorción de NO₂. Arsenito de sodio. Se disuelven 4 g de NaOH en agua destilada. Luego se adicionan 1 g de NaAsO₂, a continuación se diluye con agua destilada hasta 1 litro en un balón aforado del volumen correspondiente.

A.2 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DE SO₂

A.2.1 Preparación de reactivos de análisis para la determinación de SO₂.

A.2.1.1 Ácido Sulfámico 0,6%. Se disuelven 0,6 g de H₃NO₃S en 100 mL de agua destilada. Este reactivo debe prepararse diariamente para la ejecución del análisis.

A.2.1.2 Formaldehído 0,2%. Se diluyen 5 mL de formaldehído (36 - 38 % pureza) en 1000 mL de agua destilada. Este reactivo debe prepararse a diario.

A.2.1.3 Solución de yodo (0,1 N) (solución stock). Se colocan 12,7 g de yodo resublimado en un beaker de 250 mL. A continuación se adicionan 40 g de KI y 25 mL de agua destilada. Se agita hasta disolver. Luego se transvasa la solución a un balón aforado de 1000 mL y se completa el volumen con agua destilada.

A.2.1.4 Solución de trabajo de yodo (0,01 N). Se depositan 50 mL de la solución stock de yodo en un balón aforado de 500 mL y se completa el volumen con agua destilada. La solución debe prepararse cada día que se vaya a utilizar.

A.2.1.5 Indicador solución de almidón. Se trituran y pesan 0,4 g de almidón soluble y 0,002 g de HgI_2 . Posteriormente se agrega agua destilada y se agita hasta formar una pasta. En seguida se añade la pasta lentamente a 200 mL de agua destilada hirviendo. Se continúa el calentamiento hasta que la solución se clarifique. Se mantiene la agitación constante. Finalmente se enfría.

A.2.1.6 Ácido clorhídrico (1 N). Se depositan 500 mL de H_2O destilada en un balón aforado de 1000 mL. Inmediatamente se adicionan lentamente 86 mL de HCl concentrado, y se agita vigorosamente. Luego se deja enfriar y se completa el volumen con agua destilada.

A.2.1.7 Solución de yodato de potasio. Se ponen a secar KIO_3 durante 3 horas a $180\text{ }^\circ\text{C}$. Se deja enfriar en un desecador, y luego se pesan exactamente 1,5 g de KIO_3 , se registra este peso (W). Finalmente se disuelve en 500 mL de agua destilada en un balón aforado.

A.2.1.8 Solución stock de tiosulfato de sodio (0,1 N). Se disuelven 25 g de $Na_2S_2O_3$ en 1000 mL de agua destilada hervida, a temperatura ambiente. A continuación se adicionan 0,1 g de Na_2CO_3 a la solución. Se deja que la solución repose durante un día por lo menos, antes de estandarizarla.

A.2.1.8.1 Estandarización de la solución de tiosulfato de sodio (0,1 N). En un erlenmeyer de 500 mL se depositan 50 mL de la solución de KIO_3 , inmediatamente se adicionan 2 g de KI y 10 mL de HCl (1 N), se tapa el erlenmeyer y se deja reposar la solución durante 5 minutos. Luego se titula la solución con la solución stock de tiosulfato de sodio (0,1 N) hasta cambio de color a amarillo pálido. Se adicionan 5 mL de solución de almidón y se continúa titulando hasta que el color azul desaparezca. La normalidad se calcula con la siguiente ecuación.

$$N_s = \frac{W}{M} \times 2,80 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Ns: Normalidad de la solución stock de tiosulfato de sodio.

W: Peso del yodato de potasio en g.

M: Volumen de tiosulfato consumido en la titulación.

A.2.1.8.2 Solución titulante de tiosulfato de sodio (0,01 N). En un balón aforado de 1000 mL se depositan exactamente 100 mL de solución stock de tiosulfato de sodio y se completa el volumen con agua destilada, hervida y enfriada. Esta solución no es estable, por ende debe prepararse cada día que vaya a ser utilizada. La normalidad se la calcula con la ecuación 2.

$$Nt = Ns \times 0,1 \quad \text{Ecuación (2)}$$

Nt: Normalidad de la Solución titulante.

Ns: Normalidad de la Solución Stock.

A.2.1.9 Solución estándar de sulfito (metabisulfito). Se disuelven 0,30 g de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ en 500 mL de agua destilada a temperatura ambiente, recién hervida. Esta solución es inestable, por esta razón es necesario trabajar con agua de alta pureza para minimizar la inestabilidad. Esta solución contiene el equivalente a 320 - 400 μg de SO_2/mL .

A.2.1.9.1 Estandarización de la solución estándar de sulfito, (metabisulfito). En dos erlenmeyer de 500 mL se depositan 50 mL de solución de yodo (0,01 N), a continuación se añaden 25 mL de solución estándar de sulfito en un erlenmeyer, (t50), y al otro erlenmeyer se le adicionan 25 mL de agua destilada (blanco). Se deja reposar durante 5 minutos y se titula con tiosulfato de sodio (0,01 N) hasta que cambie a un color amarillo pálido. Luego se adicionan 5 mL de solución de almidón y se continua la titulación justo hasta cuando el color azul desaparezca. La estandarización de esta solución debe hacerse inmediatamente después de la preparación. Para calcular la concentración de dióxido de sulfuro en la solución de trabajo se lo hace utilizando la ecuación 3.

$$\frac{CTCM}{\text{SO}_2 \left(\frac{\mu\text{gSO}_2}{\text{mL}} \right)} = \left[\frac{(A - B) \times NT \times 32000}{25} \right] \times 0,02 \quad \text{Ecuación (3)}$$

A: Volumen de tiosulfato consumido en el blanco, mL.

B: Volumen de tiosulfato consumido en la muestra t50, mL.

NT: Normalidad del tiosulfato.

32000: Factor de conversión de miliequivalentes en peso del SO_2 , μg .

25: Volumen de solución estándar de sulfito, mL.

0,02: Factor de dilución.

A.2.1.10 Solución de sulfito-TMC de trabajo. En un balón aforado de 250 mL se depositan 5 mL de la solución estándar de sulfito. Se diluye a volumen con solución de TMC 0,04N. Esta solución debe guardarse a 5 °C, de esta manera es estable durante 30 días, de lo contrario debe prepararse diariamente.

A.2.1.11 Solución stock de Pararosanilina Purificada (PRA 0,2%).

A.2.1.11.1 Purificación de la PRA. En un embudo de separación de 250 mL se depositan 100 mL de 1-Butanol y 100 mL de HCl (1N).

En un beaker de 100 mL se pesan 100 mg de hidrocloreuro de pararosanilina. Inmediatamente se añaden 50 mL de HCl (fase inferior de la mezcla en el embudo de separación) y se deja reposar por varios minutos. Se desecha el ácido remanente en el embudo de separación (solución ácida de la tintura).

En otro embudo de separación de 125 mL, se adicionan 50 mL de 1-butanol (la fase superior del embudo de separación). La solución ácida de la tintura, se la deposita en el embudo de separación para hacer la respectiva extracción. Las impurezas de color violeta se transferirán a la fase orgánica.

Se transfiere la fase acuosa (inferior) a otro embudo de separación, y se adiciona 20 mL de 1-butanol y se realiza nuevamente otra extracción. Se repite seis veces este procedimiento de extracción con 10 mL de 1-butanol.

Después de la extracción final, se filtra la fase ácida a través de una mota de algodón, y se deposita el líquido filtrado en un balón aforado de 50 mL, se llena con ácido clorhídrico (1 N). Este reactivo es de color rojo amarillento.

A.2.1.11.2 Procedimiento de prueba de la PRA. Se prepara una solución buffer stock de acetato-ácido acético 1 M con pH 4,79, disolviendo 13,61 g de acetato de sodio trihidratado en agua destilada en un balón aforado de 100 mL. A continuación se adicionan 5,70 mL de ácido acético glacial y se diluye a volumen con agua destilada.

En un balón aforado de 100 mL se deposita 1 mL de solución stock de PRA y se diluye a volumen con agua destilada. Luego se extrae una alícuota de 5 mL de la solución de PRA diluida a un balón aforado de 50 mL. A continuación se añaden 5 mL de solución buffer acetato-ácido acético 1 M y se diluye la mezcla a volumen con agua destilada. Se deja que la mezcla repose durante una hora.

Se mide la absorbancia de la mezcla a 540 nm en el espectrofotómetro, frente al patrón de referencia de agua destilada. El cálculo del porcentaje de concentración nominal de la PRA se lo realiza mediante la siguiente ecuación.

$$\%PRA = \frac{A \times K}{W} \quad \text{Ecuación (4)}$$

A: Absorbancia medida de la mezcla final (unidades de absorbancia).

W: Peso en g de la tintura PRA.

K: 21,3.

A.2.1.11.3 Reactivo de pararosanilina. En un balón aforado de 250 mL se depositan 20 mL de solución stock de pararosanilina purificada. A continuación se agregan 0,2 mL adicionales de solución stock por cada unidad que estuvo por debajo del 100%, el resultado del porcentaje de la solución stock determinado por la ecuación (4). Posteriormente se añaden 25 mL de H₃PO₄ (3 M) y se diluye a volumen con agua destilada. El reactivo es estable durante por lo menos 6 meses, debe almacenarse lejos del calor y de la luz.

A.2.1.12 Solución estándar de 7,2 µg de SO₂. En un balón aforado de 25 mL se depositan 10 mL de solución diluida de trabajo de sulfito-TCM (10 mL de solución de trabajo en 100 mL de reactivo de absorción). Se trata del mismo modo que la muestra a analizar.

A.2.1.12.1 Solución estándar de 14,4 µg de SO₂. En un balón aforado de 25 mL se depositan 2 mL de la solución de trabajo de sulfito-TCM. Se trata del mismo modo que la muestra a analizar.

A.3 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DE NO₂

A.3.1 Preparación de reactivos de análisis para la determinación de NO₂.

A.3.1.1 Solución stock de nitrito de sodio 500 µg NO₂⁻/mL. Se determinan la cantidad de nitrito de sodio (al 97% o mayor concentración) que se debe pesar usando la siguiente ecuación.

$$G = \frac{1,5}{A} \quad \text{Ecuación (5)}$$

A: Es la concentración del nitrito de sodio.

Se pesa exactamente (exactitud de 0,0001 g) la cantidad (G) de nitrito de sodio previamente desecado durante 24 horas. Se registra la cantidad pesada. A continuación se diluye a 100 mL con agua destilada, en un balón aforado de capacidad correspondiente.

A.3.1.2 Solución de nitrito de sodio estándar de trabajo, 10 µg NO₂⁻/mL. En un balón aforado de 250 mL se depositan 5 mL de solución stock y se diluye hasta que se nivele con el reactivo de absorción. Debe prepararse diariamente.

A.3.1.3 Sulfanilamida. En un balón aforado de 1000 mL se depositan 20 g de sulfanilamida, 700 mL de agua destilada y 50 mL de H₃PO₄ (85%). A continuación se diluyen con agua destilada hasta su volumen respectivo. Se almacena en botella color ámbar y se refrigera a 4°C

A.3.1.4 N-(1-Naftil)-etilendiamina dihidrocloruro (NEDA). Se disuelven 0,5 g de NEDA en 500 mL de agua destilada. Se almacena en botella color ámbar y se refrigera a 4°C.

A.3.1.5 Peróxido de hidrogeno (30%). Se diluyen 0,2 mL de H₂O₂ (30%) en 250 mL de agua destilada. Se almacena en botella color ámbar y se refrigera.

Anexo B. Parámetros de estandarización del método espectrofotométrico.

B.1 Curvas de comportamiento del dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en las tres estaciones de monitoreo.

Figura 8. Comportamiento de la concentración de SO₂ en la Estación 1.

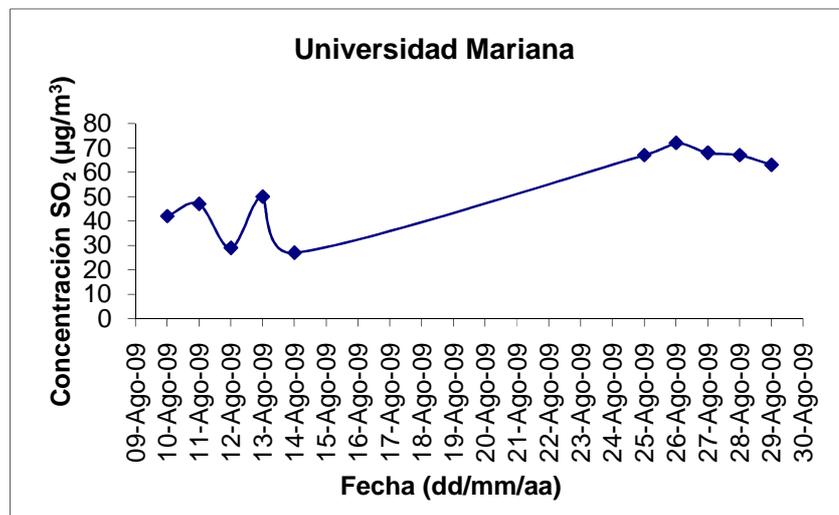


Figura 9. Comportamiento de la concentración de NO₂ en la Estación 1.

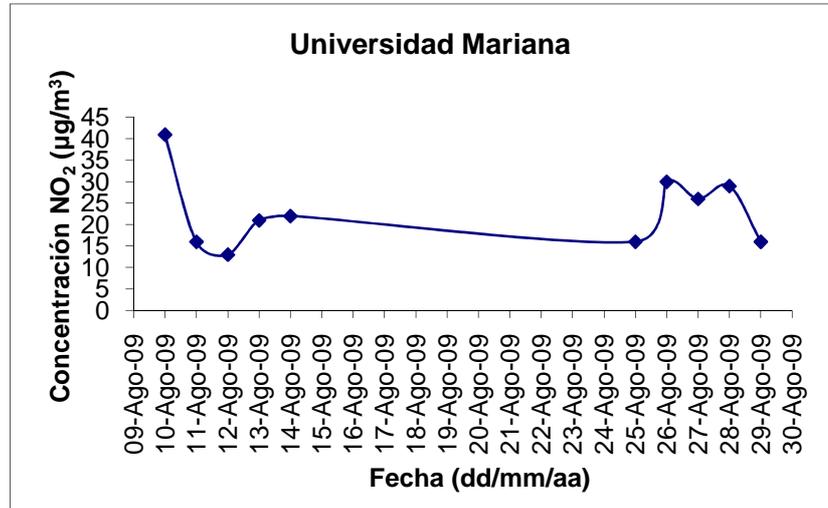


Figura 10. Comportamiento de la concentración de SO₂ en la Estación 2.

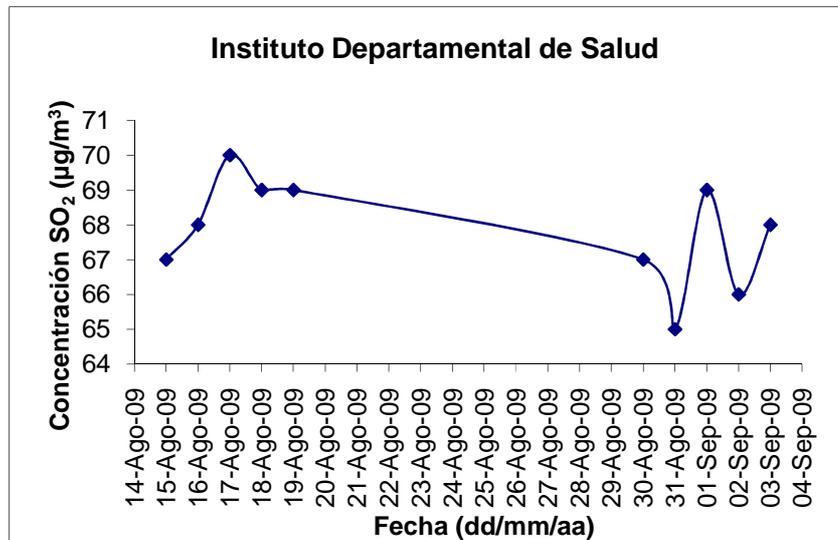


Figura 11. Comportamiento de la concentración de NO₂ en la Estación 2.

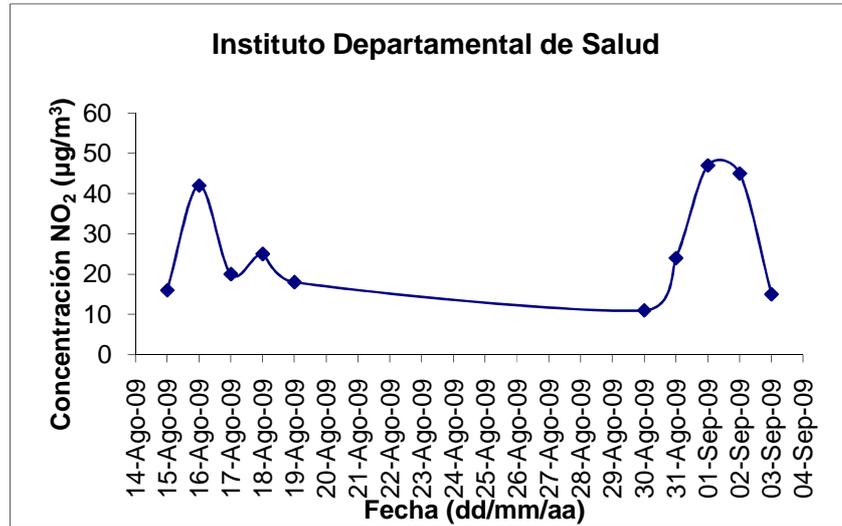


Figura 12. Comportamiento de la concentración de SO₂ en la Estación 3.

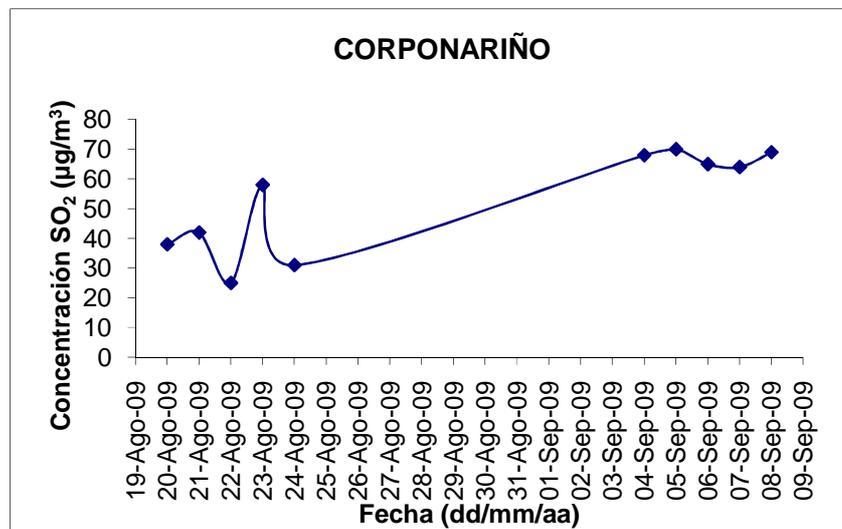
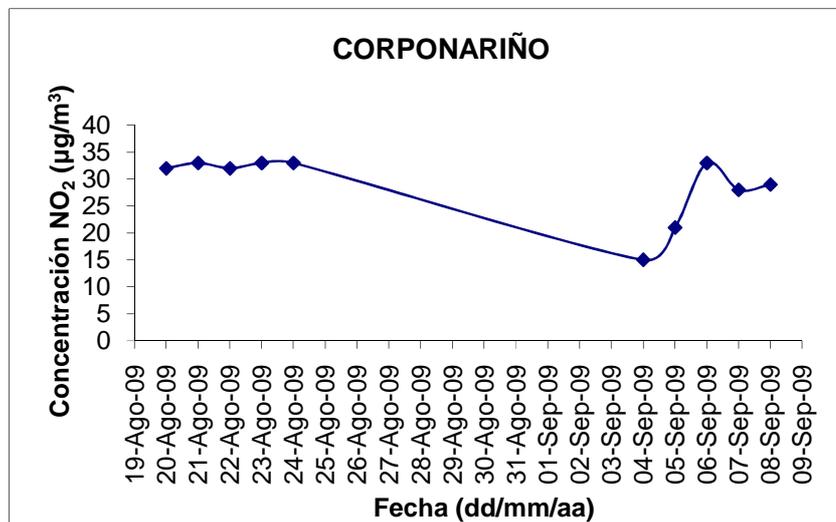


Figura 13. Comportamiento de la concentración de NO₂ en la Estación 3.



B.2 Parámetros de precisión y repetibilidad para dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno.

Tabla 12. Parámetro de precisión (repetibilidad) para el SO₂.

Concentración (µg SO ₂ /mL)	0,0	3,6	7,2	14,4	21,6	28,8
Absorbancia 1	0,019	0,052	0,112	0,302	0,600	0,893
Absorbancia 2	0,021	0,056	0,116	0,301	0,603	0,895
Absorbancia 3	0,018	0,059	0,114	0,305	0,601	0,892
Promedio	0,019	0,056	0,114	0,303	0,601	0,893
RSD	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,002
RSD (%)	0,153	0,351	0,200	0,208	0,153	0,153

Tabla 13. Parámetro de precisión (repetibilidad) para el NO₂.

Concentración (µg NO ₂ /mL)	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0
Absorbancia 1	0,166	0,202	0,307	0,543	0,602	0,899
Absorbancia 2	0,162	0,200	0,305	0,542	0,604	0,897
Absorbancia 3	0,168	0,197	0,307	0,546	0,608	0,894
Promedio	0,165	0,200	0,306	0,544	0,605	0,897
RSD	0,003	0,003	0,001	0,002	0,003	0,003
RSD (%)	0,306	0,252	0,115	0,208	0,306	0,252

Tabla 14. Parámetro de límite de detección para el SO₂ y NO₂.

Límite de detección (µg SO ₂ /mL)	0,074905
Límite de detección (µg NO ₂ /mL)	0,005584

Tabla 15. Parámetro de coeficiente de variación para el SO₂ y NO₂.

Coeficiente de variación (SO ₂)	0,079	0,063	0,018	0,007	0,003	0,002
Coeficiente de variación (NO ₂)	0,018	0,013	0,004	0,004	0,005	0,003

Anexo C. Resultados de la Calidad de Aire en la ciudad de San Juan de Pasto.

Tabla 16. Concentración de dióxidos de azufre y nitrógeno.

Fecha	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
	Estación I		Estación II		Estación III	
	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂
10 – Agosto - 2009	32	21				
11 – Agosto - 2009	27	16				
12 – Agosto - 2009	29	23				
13 – Agosto - 2009	30	21				
14 – Agosto - 2009	27	22				
15 – Agosto - 2009			37	26		
16 – Agosto - 2009			35	22		
17 – Agosto - 2009			30	20		
18 – Agosto - 2009			35	25		
19 – Agosto - 2009			36	26		
20 – Agosto - 2009					18	12
21 – Agosto - 2009					22	13
22 – Agosto - 2009					15	12
23 – Agosto - 2009					18	13
24 – Agosto - 2009					21	13
25 – Agosto - 2009	27	16				
26 – Agosto - 2009	32	20				
27 – Agosto - 2009	28	21				
28 – Agosto - 2009	27	24				
29 – Agosto - 2009	33	16				
30 – Agosto - 2009			37	21		
31 – Agosto - 2009			35	24		
1 – Septiembre - 2009			36	25		
2 – Septiembre - 2009			36	25		
3 – Septiembre - 2009			34	25		
4 – Septiembre - 2009					18	15
5 – Septiembre - 2009					20	17
6 – Septiembre - 2009					22	16
7 – Septiembre - 2009					24	18
8 – Septiembre - 2009					19	18
Promedio	29,2	20,0	35,1	23,9	19,7	14,7

Estación 1: Universidad Mariana.

Estación 2: Instituto Departamental de Salud.

Estación 3: CORPONARIÑO.

Tabla 17. Resumen estadístico de las concentraciones de SO₂ y NO₂ en las tres estaciones de monitoreo.

Estación	Concentración (µg/m ³)							
	Promedio		Desviación Estándar		Máxima		Mínima	
	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂
1	29,2	20,0	2,4	3,0	33	24	27	16
2	35,1	23,9	2,0	2,1	37	26	30	20
3	19,7	14,7	2,6	2,4	24	18	15	12

Estación 1: Universidad Mariana.

Estación 2: Instituto Departamental de Salud.

Estación 3: CORPONARIÑO.

Tabla 18. Categoría de calidad del aire para SO₂ y NO₂.

Fecha	Concentración (µg/m ³)					
	Estación 1		Estación 2		Estación 3	
	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂
10 – Agosto - 2009	Buena	Buena				
11 – Agosto - 2009	Buena	Buena				
12 – Agosto - 2009	Buena	Buena				
13 – Agosto - 2009	Buena	Buena				
14 – Agosto - 2009	Buena	Buena				
15 – Agosto - 2009			Moderado	Buena		
16 – Agosto - 2009			Moderado	Buena		
17 – Agosto - 2009			Buena	Buena		
18 – Agosto - 2009			Moderado	Buena		
19 – Agosto - 2009			Moderado	Buena		
20 – Agosto - 2009					Buena	Buena
21 – Agosto - 2009					Buena	Buena
22 – Agosto - 2009					Buena	Buena
23 – Agosto - 2009					Buena	Buena
24 – Agosto - 2009					Buena	Buena
25 – Agosto - 2009	Buena	Buena				
26 – Agosto - 2009	Buena	Buena				
27 – Agosto - 2009	Buena	Buena				
28 – Agosto - 2009	Buena	Buena				
29 – Agosto - 2009	Buena	Buena				
30 – Agosto - 2009			Moderado	Buena		
31 – Agosto - 2009			Moderado	Buena		
1 – Septiembre - 2009			Moderado	Buena		
2 – Septiembre - 2009			Moderado	Buena		
3 – Septiembre - 2009			Buena	Buena		
4 – Septiembre - 2009					Buena	Buena
5 – Septiembre - 2009					Buena	Buena
6 – Septiembre - 2009					Buena	Buena
7 – Septiembre - 2009					Buena	Buena
8 – Septiembre - 2009					Buena	Buena
Promedio	Buena	Buena	Moderado	Buena	Buena	Buena

Estación 1: Universidad Mariana.
 Estación 2: Instituto Departamental de Salud.
 Estación 3: CORPONARIÑO.

Tabla 19. Nivel de contaminación para SO₂ y NO₂.

Fecha	Nivel de Contaminación					
	Estación 1		Estación 2		Estación 3	
	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂
10 – Agosto - 2009	Bajo	Bajo				
11 – Agosto - 2009	Bajo	Bajo				
12 – Agosto - 2009	Bajo	Bajo				
13 – Agosto - 2009	Bajo	Bajo				
14 – Agosto - 2009	Bajo	Bajo				
15 – Agosto - 2009			Bajo	Bajo		
16 – Agosto - 2009			Bajo	Bajo		
17 – Agosto - 2009			Bajo	Bajo		
18 – Agosto - 2009			Bajo	Bajo		
19 – Agosto - 2009			Bajo	Bajo		
20 – Agosto - 2009					Bajo	Bajo
21 – Agosto - 2009					Bajo	Bajo
22 – Agosto - 2009					Bajo	Bajo
23 – Agosto - 2009					Bajo	Bajo
24 – Agosto - 2009					Bajo	Bajo
25 – Agosto - 2009	Bajo	Bajo				
26 – Agosto - 2009	Bajo	Bajo				
27 – Agosto - 2009	Bajo	Bajo				
28 – Agosto - 2009	Bajo	Bajo				
29 – Agosto - 2009	Bajo	Bajo				
30 – Agosto - 2009			Bajo	Bajo		
31 – Agosto - 2009			Bajo	Bajo		
1 – Septiembre - 2009			Bajo	Bajo		
2 – Septiembre - 2009			Bajo	Bajo		
3 – Septiembre - 2009			Bajo	Bajo		
4 – Septiembre - 2009					Bajo	Bajo
5 – Septiembre - 2009					Bajo	Bajo
6 – Septiembre - 2009					Bajo	Bajo
7 – Septiembre - 2009					Bajo	Bajo
8 – Septiembre - 2009					Bajo	Bajo
Promedio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

Estación 1: Universidad Mariana.
 Estación 2: Instituto Departamental de Salud.
 Estación 3: CORPONARIÑO.

Anexo D. Formatos de muestreo y formatos de calibración del equipo muestreador APV TRIGAS.

D.1 Formato de muestreo para el equipo muestreador APV TRIGAS.

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂) Y DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO ₂)		
Muestreo con el equipo APV TRI-GAS		
DATOS GENERALES DEL MUESTREO		
Lugar _____	TRIGAS N° _____	Gas muestreado _____
Método de muestreo _____	Muestreo N° _____	Flujo nominal _____
Inicio del Muestro ____/____/____.____:____h	Finalización del muestreo ____/____/____.____:____h	
DATOS DEL ORIFICIO CRÍTICO		
Orificio crítico N° _____	Flujo del orificio (Q _{oc}) _____	
Fecha de la última calibración ____/____/____.____:____h	Bolómetro N° _____	
Temperatura (T ₁) _____ K	Presión barométrica (P ₁) _____ mm de Hg	
CONDICIONES DEL MUESTREO		
Temperatura ambiente (T ₂): Inicio _____ K	Finalizo _____ K	Media _____ K
Presión barométrica (P ₂): Inicio _____ mm de Hg	Finalizo _____ mm de Hg	Media _____ mm de Hg
Reloj (t _a): Inicio _____ h	Finalizo _____ h	Tiempo recorrido (t _a) _____ h
VACÍO		
Vacío mínimo $\left[0,55(P_2 + 20,45) mmHg \right]$ _____ mm de Hg		
Manómetro: Inicio _____ mm de Hg	Finalizo _____ mm de Hg	
VOLUMEN DE MUESTREO		
$V_{ar} = (Q_{oc})(t_a) \sqrt{\left(\frac{P_1}{P_2}\right)\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}$		
Volumen de muestreo (V _{ar}) _____ L estándar		
REFRIGERADOR		
Temperatura media del muestreo _____ K		
GASÓMETRO		
Lectura inicial _____ L	Lectura final _____ L	Total _____ L
OBSERVACIONES		

CONCENTRACIÓN (µg/m ³) EN CONDICIONES ESTÁNDAR (25 °C Y 760 mm de Hg)		
C = _____ µg/m ³		
Responsable _____		
Firma _____		

D.2 Formato de Medición del equipo muestreador APV TRIGAS.

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂) Y DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO ₂)					
Medición del bolómetro del equipo APV TRI-GAS					
Nº de serie del bolómetro _____			Fecha de calibración _____		
Volumen desplazado (a) _____ mL			Calibrado por _____		
Vuelta Nº	Temperatura del agua °C	Peso inicial del frasco (W _i) g	Peso final del frasco (W _f) g	Volumen de desplazamiento (V _m) (b)	Observaciones
1					
2					
3					
<p>(a) Volumen de desplazamiento, indicado por el fabricante =</p> <p>(b) $V_m = \frac{W_f - W_i}{D_t} =$ _____ m³; D_t = _____ g/mL</p> <p>(c) $V_m = \frac{V_{m_1} + V_{m_2} + V_{m_3}}{3} =$ _____</p> <p>(d) $\%Error = \left[\frac{V - V_m}{V_m} \right] \times 100 =$ _____ (No puede exceder el 1%).</p>					

D.3 Formato de calibración del orificio crítico del equipo muestreador APV TRIGAS.

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂) Y DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO ₂)			
Calibración del orificio crítico del equipo TRIGAS (En comparación contra el bolómetro)			
Nº del orificio _____ Lugar de calibración _____ Fecha de calibración _____			
Bolómetro N° _____ Volumen nominal _____			
Calibración realizada por _____			
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Presión atmosférica	P _b		mm de Hg
Presión atmosférica patrón	P _p	760	mm de Hg
Temperatura ambiente	T _a		K
Temperatura ambiente patrón	T _p	298	K
Vacío mínimo por la ecuación 1	P _{gm}		mm de Hg
Lectura del manómetro x 25,4	P _g		mm de Hg
Presión de vapor a _____ °C	P _v		mm de Hg
Tiempo medio cronometrado	T _c		min
Volumen medido por el bolómetro	V _m		m ³
Volumen del bolómetro corregido por la ecuación 2	V _{mc}		m ³
Flujo del orificio por la ecuación 3	Q _{oc}		L/min
Cálculo del tiempo promedio cronometrado			
Medida	Tiempo promedio leído en el cronómetro	Conversión a minutos	
1ª			
2ª			
3ª			
Promedio			
Ecuaciones			
$P_{gm} = 0,55 \times (P_b + 20,45); P_g > P_{gm}$		Ecuación 1	
$V_{mc} = V_m \times \left[\frac{P_b - P_v}{P_p} \right] \times \left[\frac{T_p}{T_a} \right]$		Ecuación 2	
$Q_{oc} = \frac{V_{mc}}{1000 \times t_c}$		Ecuación 3	

