

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que los autores han autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Bibliotecas Bucaramanga
Universidad Santo Tomás**

**DETERMINACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO Y ESPECIES QUÍMICAS DE
INTERÉS EN SALUD PÚBLICA. CASO AUTOPISTA FLORIDABLANCA-
BOGOTÁ. SECTOR UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**

**LAURA SÁNCHEZ MANTILLA
ANDREA FERNANDA GALEANO ÁLVAREZ**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISION DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2015**

**DETERMINACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO Y ESPECIES QUÍMICAS DE
INTERÉS EN SALUD PÚBLICA. CASO AUTOPISTA FLORIDABLANCA-
BOGOTÁ. SECTOR UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**

**LAURA SÁNCHEZ MANTILLA
ANDREA FERNANDA GALEANO ÁLVAREZ**

Trabajo de grado para optar el título de Químico Ambiental

**Director del Proyecto
AMILCAR RIZZO ALVARADO
Ingeniero Químico, *MSc***

**Codirector del Proyecto
HERNANDO CAMARGO GARCÍA
Químico, *PhD***

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISION DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2015**

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo de grado principalmente a Dios por ser luz en nuestro camino, por habernos regalado las herramientas necesarias para alcanzar un sueño más en la vida. Gracias Señor, por permitirnos sobrellevar adversidades, siendo nuestra fortaleza día a día, gracias por mostrarnos que la paciencia y la sabiduría son dos instrumentos fundamentales para alcanzar todo lo soñado, gracias por regalarnos salud y permitirnos la culminación de esta etapa.

A mis padres Jaime y Elide por su inmenso amor, apoyo incondicional y sacrificios realizados. Gracias por sus oraciones, dedico a ustedes esta parte de mis sueños.

A mis hermanos por animarme día a día.

A mi novio Luis Dalmiro, por acompañarme y apoyarme a lo largo de la carrera, por darme la mano cuando lo necesité, por el tiempo dedicado, por los consejos dados, gracias por aportar tu granito de arena para que lograra este sueño.

A mis familiares y amigos que compartieron conmigo este largo camino.

Laura Sánchez Mantilla

A mis padres Oscar y Alexandra, a mi hermana María José por estar conmigo en los momentos difíciles apoyándome y brindándome su compañía, amor y entrega.

A mi abuela Oliva por ser una persona muy importante en mi vida y animarme día a día.

A mi novio Jorge Andrés, por alentarme a lo largo de mi carrera, por estar cuando más los necesitaba, por las palabras de amor y aliento para lograr este triunfo. Gracias por estar siempre presente para lograr este gran sueño.

A todas las personas que han hecho parte de mi desarrollo personal, espiritual y profesional.

Andrea Fernanda Galeano Álvarez

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a nuestro Director de Trabajo de Grado, al Ingeniero Químico Amilcar Rizzo Alvarado por confiar en nuestro trabajo, por darnos la oportunidad de demostrar nuestros conocimientos, por su constante dirección, asesoría y apoyo, infinitas gracias por su paciencia, profesionalismo, sus sabios consejos en el desarrollo de este trabajo investigativo.

A nuestro codirector Hernando Camargo, agradecemos por su esfuerzo y tiempo dedicado en el desarrollo de la parte experimental, por sus importantes aportes que ayudaron a enriquecer la investigación y por la corrección textual del proyecto.

Agradecemos al Grupo Investigativo GINMEA por sus valiosos aportes sugeridos y tiempo dedicado.

Al Laboratorio de Investigación y Ciencias Básicas de la Universidad Santo Tomás por sus servicios prestados.

Al Laboratorio de Rayos-X PTG de la UIS ubicado en Guatiguará y al laboratorio de Fluorescencia de Rayos-X del Centro de Desarrollo Tecnológico y Productivo de Joyería –CDTPJ- ubicado en la zona franca, por brindarnos asistencia en la realización de análisis químicos necesarios para la culminación de este proyecto.

A la Empresa de Ingeniería K2 Ltda por la asesoría brindada y apoyo constante.

A la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga por suministrar datos meteorológicos históricos que enriquecieron la investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. DETERMINACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO Y ESPECIES QUÍMICAS DE INTERÉS EN SALUD PÚBLICA. CASO AUTOPISTA FLORIDABLANCA-BOGOTÁ. SECTOR UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.	20
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2. JUSTIFICACIÓN	22
3. OBJETIVOS	23
3.1 OBJETIVO GENERAL	23
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
4. MARCO REFERENCIAL	24
4.1 MARCO TEÓRICO	24
4.1.1 Material Particulado	24
4.1.2 Riesgos del material particulado para la salud	25
4.1.3 Metales pesados	26
4.1.4 Riesgos de los metales pesados para la salud	26
4.1.5 Técnicas de Especiación Química.	27
4.1.5.1 Difracción de Rayos-X de muestras policristalinas	28
4.1.5.2 Fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva (EDXRF)	29
4.1.6 Monitoreo ambiental	29
4.1.6.1 Campañas de monitoreo	30
4.1.6.2 Equipos utilizados durante la campaña de monitoreo	30
4.1.6.3 Muestreador de aire BGI modelo PQ-200 - PM ₁₀	30
4.1.6.4 Estación meteorológica DAVIS	31
4.1.7 Rosa de Los Vientos	32
4.1.7.1 Software para crear Rosas de Viento	33
4.1.8 Índice de Calidad del Aire	33
4.1.9 El Municipio de Floridablanca	34
4.2 MARCO DE ANTECEDENTES	35
4.3 MARCO NORMATIVO	37
4.3.1 Normatividad para contaminantes criterio (PM ₁₀ y PM _{2.5})	37
4.3.2 Normatividad para metales pesados.	38
5. DISEÑO METODOLÓGICO	38
5.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES PARA LA ZONA DE ESTUDIO	39
5.1.1 Variables topográficas y meteorológicas.	39
5.2 CAMPAÑA DE MONITOREO PARA MATERIAL PARTICULADO –PM ₁₀ –	40

5.2.1	Sitios de monitoreo	40
5.2.2	Periodos seleccionados para monitoreos	41
5.2.3	Medio de recolección de las muestras	41
5.2.4	Procedimiento de monitoreo para captación de PM ₁₀	42
5.2.5	Determinación de la concentración de material particulado	43
5.2.6	Determinación del Índice de Calidad del Aire	45
5.3	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO PRESENTE EN LOS FILTROS DE ESTUDIO	46
5.3.1	Difracción de Rayos-X de muestras policristalinas	46
5.3.1.2	Toma de datos por DRX	46
5.3.1.3	Determinación de fases cristalinas	47
5.3.2	Fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva	47
5.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO SPSS (STATISTICAL PACKAGE FOR THE SOCIAL SCIENCES)	48
5.5	ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN Y VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA LA ZONA	49
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
6.1	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES TOPOGRÁFICAS y METEOROLÓGICAS	50
6.3	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO PRESENTE EN LOS FILTROS DE ESTUDIO	60
6.3.1	Difracción de Rayos-X de muestras policristalinas	60
6.3.2	Fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva	62
7.	CONCLUSIONES	71
8.	RECOMENDACIONES	74
	BIBLIOGRAFÍA	75
	ANEXOS	82

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Clasificación del material particulado según su diámetro	25
Tabla 2. Metales pesados de mayor importancia presentes en el PM ₁₀	27
Tabla 3. Escala Beaufort de velocidades del viento	32
Tabla 4. Intervalos IBUCA	34
Tabla 5. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio PM ₁₀ y PM _{2.5} según Resolución 610/2010	38
Tabla 6. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio PM ₁₀ y PM _{2.5} según OMS	38
Tabla 7. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales	38
Tabla 8. Características del filtro para recolección de muestras	42
Tabla 9. Norma de Calidad del Aire para Bogotá utilizadas en el Cálculo ICAF _M	45
Tabla 10. Resultados válidos concentración PM ₁₀ –invierno (color celeste) y verano (color amarillo) / Valores Máximos Permisibles según Resolución 610/210 y OMS	54
Tabla 11. Registros Filtro Blanco	62
Tabla 12. Registros Datos Fluorescencia – Filtros de invierno	63
Tabla 13. Registros Datos Fluorescencia – verano	65
Tabla 14. Cumplimiento de la normatividad – invierno (color celeste) y verano (color amarillo)	67

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Generación de los Rayos-X	28
Figura 2. Equipo muestreador PQ-200	31
Figura 3. Estación Meteorológica Davis	32
Figura 4. Plano urbanístico georeferenciado de la zona en estudio	39
Figura 5. Rosa de Los Vientos Histórica / Periodos 2013-2015	40
Figura 6. Procedimiento de monitoreo para captación de concentración de PM ₁₀	42
Figura 7. Acondicionamiento de filtros limpios en el desecador	43
Figura 8. Acondicionamiento del pesaje inicial del filtro	43
Figura 9. Pesaje final del filtro expuesto y almacenamiento para análisis	44
Figura 10. Preparación de la muestra para análisis de difracción de Rayos-X	46
Figura 11. Preparación de la muestra para análisis de fluorescencia de Rayos-X	47
Figura 12. Emisiones de fuentes hacia la Parcela Volumétrica	49
Figura 13. Rosa de Los Vientos – periodos invierno 2014 /verano 2014-2015	51
Figura 14. Punto 1 y 2 internos Campus Floridablanca USTA/Cancha Múltiple y Portería	52
Figura 15. Punto 3 de monitoreo – Conjunto Torres de Sevilla	53
Figura 16. Punto 4 de monitoreo – Comando Policía Floridablanca	53
Figura 17. Resultados Válidos Concentración PM ₁₀ – invierno año 2014	56
Figura 18. Resultados válidos Concentración PM ₁₀ –verano año 2014/2015	56
Figura 19. Resultados válidos Concentración PM ₁₀ –verano e invierno	57
Figura 20. Registros válidos obtenidos de PM ₁₀ de las cuatros estaciones monitoreadas – invierno/verano 2014-2015	58
Figura 21. Índice de la calidad del aire	59
Figura 22. Espectro DRX /Identificación de fases cristalinas del filtro blanco	61
Figura 23. Superposición perfiles por DRX	61

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Carta de Operaciones	82
Anexo B. Formato de Campo para datos de material particulado –PM ₁₀ -	95
Anexo C. Datos cuantitativos del Punto 1 de monitoreo “Campus Floridablanca Cancha Múltiple” –CFCM-	96
Anexo D. Datos cuantitativos del Punto 2 de monitoreo “Campus Floridablanca Portería Múltiple” –CFP-	97
Anexo E. Datos cuantitativos del Punto 3 de monitoreo “Conjunto Torres de Sevilla”–CTS-	98
Anexo F. Datos cuantitativos del Punto 4 de monitoreo “Comando de Policía de Floridablanca”–CPF-	99
Anexo G. Perfiles Fluorescencia de Rayos-X filtros blanco e invierno y verano	100

LISTA DE ABREVIATURAS

AAS	(<i>Atomic Absorption Spectroscopy</i>) Espectroscopía de Absorción Atómica
AC	(<i>Alternating current</i>) Corriente alterna
AMB	Área Metropolitana de Bucaramanga
ATSDR	(<i>Agency for Toxic Substances and Disease Registry</i>) Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades
CDMB	Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga
CDTPJ	
CFR	Código de Reglamentaciones Federales
CO	Monóxido de carbono
CSM	(<i>Crystallographica-Search Match</i>). Búsqueda Cristalográfica.
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DC	(<i>Direct Current</i>) Corriente Directa
DHHS	(<i>Department of Health and Human Services</i>) Departamento de Salud y Servicios Humanos
DIGESA	Dirección General de Salud Ambiental
DRX	Difracción de Rayos-X
ECAS	Estándares de Calidad Ambiental
EDXRF	Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva
E.E.U.U	Estados Unidos.
EPA	(<i>Environmental Protection Agency</i>) Agencia de Protección ambiental
EPOC	Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica
FP	Parámetros Fundamentales
GINMEA	Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Energías Alternativas
GNV	Gas Natural Vehicular
HAPs	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
HC	Hidrocarburos
IARC	(<i>International Agency for Research on Cancer</i>) Agencia Internacional para Investigaciones de Cáncer
IBUCA	Índice de la Calidad del Aire de Bucaramanga y su área Metropolitana
ICAF _M	Índice de Calidad del Aire de Floridablanca en meses

IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
IRA	Infección Respiratoria Aguda
ISO 9001	Organización Internacional para la Estandarización 9001
ISS	Conjunto integrado de sensores
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MSNM	Metros sobre el nivel del mar
MAVDT	Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
NAAQS	<i>(Indian National Ambient Air Quality Standard)</i> Norma Nacional de Calidad del Aire para el ambiente de India
NO _x	Óxidos de nitrógeno
PID	<i>(Proportional Integrate Derivate)</i> Derivación integral derivada
PM _{2.5}	Material Particulado en la atmósfera con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros.
PM ₁₀	Material Particulado en la atmósfera con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros.
PPM	Partes por millón
PPB	Partes por billón
PST	Partículas Suspendidas Totales
RM CAB	Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá
SEM	Microscopio de barrido de emisión por electrones
SENA	Servicio Nacional de Aprendizaje
SO _x	Óxidos de azufre
SPSS	<i>(Statistical Product and Service Solutions)</i> Producto Estadístico y Soluciones de Servicio
SVCA	Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire
UIICSE	Unidad de Investigación Interdisciplinaria de las Ciencias de la Salud y Educación
USEPA	<i>(US Environmental Protection Agency)</i> Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
USTA	Universidad Santo Tomás
OMS	<i>(World Health Organization)</i> . Organización Mundial de la Salud
WRPLOT	<i>(Wind Rose Plot)</i> Parcela Rosa de los Vientos
ZMB	Zona Metropolitana de Bucaramanga

GLOSARIO*

AEROSOL: gotas o partículas muy pequeñas suspendidas en la atmósfera, que típicamente contienen moléculas de especies químicas contaminantes como el azufre. Estos aerosoles son emitidos usualmente de forma natural (por ejemplo: en erupciones volcánicas) o como resultado de actividades antropogénicas (humanas) tales como la combustión de combustibles fósiles.

AGENTE CONTAMINANTE: cualquier entidad física, química, o biológica que pueda hacerle daño a un organismo. Un sinónimo es “agente estresor ambiental.”

AIRE AMBIENTE: cualquier porción de la atmósfera que puede estar constituida por una parcela volumétrica o no delimitada como el aire libre.

CALENTAMIENTO GLOBAL: se define como el aumento en la temperatura cercana de la superficie de la tierra. El Calentamiento global no es un fenómeno reciente, en el pasado ha sido el resultado de eventos naturales; sin embargo el término se utiliza con mayor frecuencia en referencia a las predicciones de calentamiento esperadas como resultado del aumento de emisiones de gases de efecto invernadero.

CAMBIO CLIMÁTICO: la expresión “cambio climático” se refiere a todas las formas de inconsistencia climática. Sin embargo, debido a que el clima de la Tierra no es estático, el término es usado más apropiadamente para implicar un cambio significativo de una condición climática a otra. Estos cambios por lo general van seguidos de efectos negativos en los ecosistemas y grupos poblacionales tanto a nivel local como global.

CANCERÍGENO: cualquier sustancia que puede causar o agravar el cáncer.

COMBUSTIBLE FÓSIL: energéticos derivados de procesos de transformación de materia orgánica durante periodos extremadamente largos; por ejemplo: procesos de formación de la turba, la hulla, carbón, petróleo crudo y gas natural.

COMBUSTIÓN: es la reacción química de quema u oxidación rápida de un combustible, con el oxígeno del aire que libera energía en forma de calor y luz.

COMPUESTO QUÍMICO: una sustancia formada por la unión de dos o más elementos en proporción determinada por peso.

COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES – VOCs: cualquier compuesto orgánico generado por procesos naturales o antropogénicos que participan en la

fotoquímica atmosférica excepto aquellos catalogados por US EPA como de baja reactividad fotoquímica.

CONCENTRACIÓN: la cantidad relativa de una sustancia mezclada con otra sustancia.

CONCENTRACIONES TÓXICAS: es la cantidad de sustancia presente en concentración tal que produce un efecto tóxico a un organismo.

CONTAMINACIÓN: es la introducción de microorganismos, sustancias químicas, sustancias tóxicas, desperdicios, o aguas negras en el agua, el aire o el suelo, en tal concentración que el medio no es apto para su uso. En general, es la presencia de una sustancia en el ambiente que, debido a su cantidad o composición química, inhibe el normal funcionamiento de procesos naturales, ocasionando efectos indeseables para la salud y el medio ambiente.

CONTAMINANTE: es toda sustancia introducida en el medio ambiente con consecuencias adversas para la utilidad de un recurso o para la salud de los seres humanos, animales o ecosistemas.

CONTAMINANTE DEL AIRE: cualquier sustancia en el aire que en concentraciones elevadas, podría afectar a los seres humanos, animales, la vegetación o deteriorar las estructuras u obras arquitectónicas.

DENSIDAD: una medida de cuán pesado es el volumen específico de un sólido, líquido o gas en comparación con el agua. Depende de la sustancia química.

EFFECTO INVERNADERO: es un fenómeno físico natural debido al calentamiento de la atmósfera de la Tierra atribuido a la acumulación de dióxido de carbono y otros gases que poseen la particularidad de absorber la radiación infrarroja reflejada de la superficie terrestre. Si bien el efecto invernadero ha sido constante por milenios en la tierra, la problemática actual ha cobrado mayor importancia debido a que en el último siglo la temperatura media de la tierra se ha incrementado.

EMISIÓN: material contaminante liberado hacia la atmósfera desde chimeneas de fábricas u otros ductos o sistemas de ventilación o superficies de instalaciones comerciales o industriales, al igual que desde chimeneas residenciales o de los escapes de vehículos motorizados, locomotoras o aeronaves.

ENFOQUE DE SALUD PÚBLICA: enfoque reglamentario y voluntario en acciones de manejo de riesgo efectivas y viables a niveles nacionales y comunitarios para reducir exposiciones y riesgos a seres humanos, dando prioridad a reducir las

exposiciones con los impactos más grandes en términos del número afectado y la gravedad del efecto.

ESTÁNDARES DE LA CALIDAD DEL AIRE: el nivel de contaminantes indicado por reglamentaciones que no debe ser superado para un área determinada y en un periodo de tiempo específico.

EXPOSICIÓN: la cantidad de radiación o contaminante presente en un ambiente dado que representa una amenaza potencial a la salud de los organismos vivos.

HICROCARBUROS: compuestos químicos compuestos totalmente por carbón e hidrógeno.

HOLLÍN: polvo de carbón formado por combustión incompleta.

HUMO: partículas muy pequeñas atrapadas por el vapor en una corriente de gas.

MEDIO AMBIENTAL: una de las mayores categorías ambientales, la cual rodea o está en contacto con seres humanos, animales, plantas y otros organismos.

METALES PESADOS: elementos metálicos con pesos atómicos altos (por ejemplo: mercurio, cromo, cadmio, arsénico y plomo). Estos elementos pueden ser nocivos a los seres vivientes en pequeñas concentraciones y tienden a acumularse en la cadena alimenticia.

MONITOREO: la supervisión o evaluación periódica o continua para determinar el nivel de cumplimiento con los requisitos legales y/o los niveles de contaminantes en diversos medios o en seres humanos, animales y plantas.

MORBILIDAD: tasa de la incidencia de una enfermedad determinada.

MORTALIDAD: tasa de defunciones en cierto grupo de personas en un tiempo determinado.

NIVELES MÁXIMOS: niveles de contaminantes aereotransportados mucho más altos que los niveles promedios, o aquellos que ocurren por periodos breves como resultado de escapes imprevistos.

OXIDACIÓN: la adición química de oxígeno para eliminar contaminantes o desperdicios orgánicos.

PARÁMETRO: una propiedad variable que se puede medir y cuyo valor determina las características de un sistema; por ejemplo: temperatura, presión y densidad son parámetros de la atmósfera.

PARTES POR MILLON (ppm): unidades generalmente usadas para indicar proporciones de contaminación (concentración). Como el porcentaje las ppm se expresan en peso, pero aplicadas a disoluciones acuosas diluidas coinciden por los gramos por millón de mililitros de solución.

PARTÍCULAS AEROTRANSPORTADAS: el total de material particulado suspendido que se encuentra en la atmósfera como partículas sólidas o pequeñas gotas de líquido.

PARTÍCULAS ASPIRABLES: cualquier polvo capaz de entrar al tracto respiratorio de un ser humano.

PM₁₀/PM_{2.5}: el PM₁₀ es una medida de partículas en la atmósfera cuyo diámetro aerodinámico es menor de o igual a 10 micrómetros. El PM_{2.5} es una medida para partículas más pequeñas en el aire.

PRECIPITACIÓN: remoción de sólidos peligrosos en desperdicios líquidos para permitir su eliminación segura.

PROTOCOLO: serie de pasos formales para conducir una prueba.

QUEMAS ABIERTAS: incendios fuera de control en un vertedero abierto.

RADIACIÓN: transmisión de energía a través del espacio o cualquier medio. También conocido como energía radiante.

SISTEMA DE VIGILANCIA: una serie de dispositivos de monitoreo diseñados para observar condiciones ambientales.

SMOG FOTOQUÍMICO: contaminación de aire causada por reacciones químicas de varios contaminantes emitidos por fuentes diferentes.

TÓXICO: una sustancia o agente peligroso que le puede hacer daño a un organismo expuesto.

VOLÁTIL: cualquier sustancia que se evapora fácilmente*.

*EPA; Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Glosario bilingüe de términos, abreviaturas y siglas relativos al medio ambiente. <http://www.epa.gov/superfund/spanish/glosario/> (accessed Noviembre/11, 2014).

RESUMEN

La contaminación atmosférica generada por fuentes móviles y fuentes fijas es un tema de gran interés debido al impacto que genera en el medio ambiente y la salud humana. El municipio de Floridablanca es hoy en día una de las poblaciones con alta tasa de crecimiento, desarrollo industrial e incremento desmedido del parque automotor, lo cual está ocasionando la degradación del medio ambiente y el desequilibrio de los ecosistemas por el manejo ambiental inadecuado en algunos sectores de la zona.

El objetivo del presente trabajo se centró en determinar la concentración de material particulado $-PM_{10}-$ e identificar metales pesados por medio de difracción y/o fluorescencia de Rayos-X en el campus de la Universidad Santo Tomás, mediante la realización de monitoreos en cuatro sitios cercanos a la autopista Floridablanca-Bogotá para evaluar la calidad del aire en el ambiente respirable de la zona.

Para llevar a cabo este análisis, se utilizó un muestreador PQ-200 de material particulado $-PM_{10}-$. Se seleccionaron cuatro puntos de monitoreo escogidos estratégicamente donde se tuvo en cuenta las condiciones meteorológicas del lugar. El monitoreo fue dividido en dos etapas: periodo de invierno y periodo de verano.

Como resultado de la investigación se encontró un amplio porcentaje de no cumplimiento de la norma 610 de 2010 MAVDT de las concentraciones de PM_{10} para el periodo de verano comprendido durante los meses de diciembre de 2014 a febrero y marzo de 2015, al igual que los estándares de calidad del aire recomendados por OMS. Para el periodo de invierno comprendido entre los meses de octubre a noviembre de 2014, el cumplimiento de la norma nacional se logró favorablemente, comportamiento diferente mostró los resultados de las mismas concentraciones de PM_{10} al compararlas con los criterios establecidos por la OMS.

Adicionalmente se encontraron elevadas concentraciones de metales pesados en las muestras capturadas, sobrepasando incluso los valores máximos permisibles por la norma colombiana y los estándares OMS.

PALABRAS CLAVE: contaminación atmosférica, material particulado $-PM_{10}-$, identificación de metales pesados, salud pública.

ABSTRACT

The air pollution from mobile sources and stationary sources is a subject of great interest due to the impact it has on the environment and human health. The municipality of Floridablanca is today one of the populations with the highest rates of growth, industrial development and excessive increase of the automotive fleet, which are causing environmental degradation and the imbalance of ecosystems by environmental mismanagement in some sectors area.

Considering the above, the aim of this paper is to determine the concentration of particulate matter -PM₁₀- and identify heavy metals through diffraction and / or X-ray fluorescence on the campus of St. Thomas University by performing monitoring at four places near the Floridablanca-Bogotá highway to assess air quality in the breathing atmosphere of the area.

To perform this analysis a PQ-200 sampler of particulate matter PM₁₀ was used. Four points of monitoring were strategically chosen taking into account their weather conditions. And the monitoring was divided into two stages: the winter period and the summer period.

As a result of the investigation, a large percentage of non-compliance with the standard 610 2010 MAVDT of the concentrations of PM₁₀ for the summer period, understood from December of 2014 to February and March of 2015, was found; as well as the non-compliance with the air quality standards recommended by WHO. For the winter period between the months of October and November of 2014 the compliance with the national standard was favorably achieved. These results showed different behavior of the same concentrations of PM₁₀ when compared to the criteria established by WHO.

In addition, high concentrations of heavy metals in the taken samples were found. Those even exceeded the maximum permissible values for the Colombian norm and WHO standards.

KEYWORDS: air pollution, particulate matter -PM₁₀-, identification of heavy metals, public health.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las ciudades genera cambios sustanciales en su estructura urbanística y sus respectivas zonas metropolitanas se ven afectadas por factores tales como el incremento poblacional, la presencia de nuevas instalaciones industriales, expansión de la malla vial, aumento del parque automotor liviano y pesado, nuevas obras de infraestructura y modernos edificios, entre otros.

Tales factores de cambio son el resultado de políticas y criterios modernos de planificación urbana, cuyos requerimientos tecnológicos demandan una mayor oferta de recursos energéticos que desencadenan la aparición de un fenómeno de origen antropogénico denominado “contaminación atmosférica urbana”, la cual se evidencia por la presencia de aerosoles y otras especies químicas en el ambiente respirable, cuyas consecuencias derivan en deterioro del ambiente, la salud y pérdida de calidad de vida para la población¹.

A pesar de los esfuerzos que a partir de la década de los años ochenta han venido realizando tanto el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT- como las Corporaciones Autónomas Regionales (autoridades ambientales de nuestro país), en materia de vigilancia y control de la calidad del aire, los grandes centros urbanos – grupos poblacionales por encima de un millón de habitantes - se encuentran expuestos a los potenciales efectos de sustancias tóxicas de alto riesgo para la salud y el bienestar de la comunidad².

El transporte vehicular y en particular los vehículos pesados, emiten grandes volúmenes de aerosoles, óxidos de azufre y de nitrógeno, aldehídos, óxidos de carbono, precursores fotoquímicos, metales pesados e hidrocarburos poli aromáticos derivados de la quema de combustibles. Muchas de estas emisiones son consideradas agentes de enfermedades crónicas tales como dermatitis, retinopatías, afecciones cardiovasculares, afecciones pulmonares, trastornos del sistema nervioso y ciertos tipos de cánceres³.

En América latina ciudades tales como Lima, la zona Metropolitana del Valle de México, Río de Janeiro o Santiago de Chile, presentan alta contaminación ambiental con graves efectos para la salud de las personas y deterioro de las obras de infraestructura, edificios, obras arquitectónicas y bienes culturales³. En Colombia, Bogotá y las zonas Metropolitanas de Medellín, Cali y Bucaramanga, no están exentas de contaminación principalmente por aerosoles y metales pesados⁴.

Dentro de los objetivos planteados en el presente trabajo se realizarán campañas de monitoreo según técnicas y normativa emanada por el Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible –MAVDT- y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia –IDEAM- y avaladas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos –USEPA- y de la Organización Mundial de la Salud –OMS-, para determinar la concentración de material particulado con diámetro aerodinámico inferior o igual a 10 micrómetros -PM₁₀- monitoreando en cuatro sitios cercanos a la autopista Floridablanca-Bogotá, lo cual permitirá medir la calidad del aire en el ambiente respirable del área. Por otro lado, la exploración de metales pesados presentes en el PM₁₀ se realizará mediante análisis de caracterización química empleando técnicas de difracción de Rayos-X de muestras poli-cristalinas y/o fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva, donde los resultados obtenidos se analizarán estadísticamente y se compararán con la normatividad vigente.

El alcance del presente estudio, proporcionará algunas técnicas y lineamientos de monitoreo aplicables para diversos sitios de interés, a fin de vigilar la calidad del aire en zonas urbanas o industriales. De igual manera, generará guías para el tratamiento, análisis e interpretación de los datos de campo, útiles para diseñar estrategias de mitigación de la contaminación atmosférica urbana.

1. DETERMINACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO Y ESPECIES QUÍMICAS DE INTERÉS EN SALUD PÚBLICA. CASO AUTOPISTA FLORIDABLANCA-BOGOTÁ. SECTOR UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación atmosférica es tema de preocupación a nivel global. En América Latina y el Caribe, por ejemplo, más de cien millones de personas⁵ se exponen a las altas concentraciones de contaminantes, los cuales sobrepasan los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud –OMS-. A causa del interés por lograr su industrialización, los países en desarrollo como los nuestros, han incrementado potencialmente su crecimiento urbano, el parque automotor y las industrias en general, reflejándose con ello el deterioro del medio ambiente a niveles sin precedentes.

Según el documento Conpes 3344 de 2005 la causa principal de la contaminación del aire en Colombia es el uso de combustibles fósiles que generan emisiones principalmente de material particulado, siendo este una mezcla de aerosoles que ocasionan efectos perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente. Se estima que el resultado de estas emisiones genera pérdidas anuales de 1.5 billones de pesos representados en afectaciones por asma, dificultades respiratorias, bronquitis y muertes prematuras⁶.

De modo que, en el Área Metropolitana de Bucaramanga -AMB –que incluye los municipios de Bucaramanga, Girón, Piedecuesta y Floridablanca- y con población de 1.038.662 habitantes⁷, el problema de la contaminación atmosférica es de especial atención por parte de la autoridad ambiental regional, ya que por ella circulan aproximadamente 525.498 vehículos⁸ (datos acumulados a 28 de febrero de 2014), donde gran parte de ellos emplean combustible a gasolina y diésel. Por esto, el crecimiento del parque automotor tiene gran incidencia ambiental por el aumento de emisiones contaminantes, problemática alarmante ya que son pocos los mecanismos de control, de ahí que, este sector es el que más contribuye al deterioro de la calidad del aire.

La presente investigación tiene como finalidad el análisis del área de la autopista Floridablanca-Bogotá que actualmente presenta una problemática ambiental en calidad del aire, puesto que a sus alrededores se desarrollan procesos productivos que generan material particulado, entre ellas una empresa mezcladora de concreto y por los alrededores, actividades relacionadas con la construcción, obras civiles y granjas avícolas. Además, por esta autopista circula gran cantidad de transporte en especial vehículos pesados como camiones, volquetas, buses

que generan alta contaminación exponiendo a los habitantes del municipio a cargas de contaminantes perjudiciales tanto para ellos como para el medio ambiente⁹. Según el DANE Floridablanca cuenta con 263.095 habitantes (proyección 2012), cifra que merece ser atendida para evitar generaciones y agravamientos de enfermedades¹⁰. Datos aportados por la autoridad ambiental CDMB en 2012 revelaron que aerosoles como PM₁₀ y el Ozono, son contaminantes que impactan negativamente en el medio ambiente y la población circunscrita en la zona.

Aquí, es importante evidenciar el riesgo de la proximidad de carreteras muy transitadas cerca al ambiente urbano y observar el comportamiento, la composición y la transformación química de las emisiones del parque automotor y relacionarlas con la meteorología de la zona, ya que existen estudios que confirman la asociación de la proximidad de carreteras transitadas a enfermedades que impactan la salud.

Las consecuencias en la salud de la población residente cerca de autopistas o vías arterias, puede observarse en niños a muy temprana edad, causando nacimientos prematuros, desarrollo de autismo, asma en infantes y afectaciones a personas con problemas respiratorios. Bajo una perspectiva similar y en adultos, se asocian enfermedades coronarias y accidentes cerebrovasculares. Se atribuye, además, un mayor riesgo de mortalidad por enfermedades del corazón en aquellas personas que habitan o laboran cerca de las autopistas y cuya exposición es prolongada. Existen muchos estudios referentes a las emisiones generadas por fuentes estacionarias, por el contrario, son pocos los estudios recientes relacionados a la contaminación atmosférica generadas por fuentes móviles¹¹.

Por tales motivos se hace necesario realizar actividades de monitoreo y vigilancia de la calidad del aire para la zona comprendida dentro del estudio: caso Autopista Floridablanca –Bogotá alrededores de la Universidad Santo Tomás con el fin de dar respuesta a preguntas tales como: ¿Qué nivel de impacto en la calidad del aire ocasiona la influencia del tráfico automotor pesado, industrias y sus emisiones atmosféricas cercanas a la autopista Floridablanca-Bogotá?; así mismo, ¿Los niveles de aerosoles y especies químicas emitidas por el tránsito vehicular pesado cumplen con la normativa vigente en términos de calidad de aire? No obstante, lo más importante es conocer que calidad de vida manifiesta el ciudadano vecino al sector en estudio, con respecto al ambiente de su entorno inmediato.

2. JUSTIFICACIÓN

Al igual que muchos países del mundo, en Colombia la contaminación atmosférica es considerada actualmente como un problema de salud pública, afectando la calidad de vida en zonas metropolitanas como la de Bucaramanga –ZMB- la cual se ha venido deteriorando. Las altas tasas de crecimiento poblacional, generan problemas de insalubridad, al igual que los asentamientos de talleres industriales, procesos de fabricación incontrolados, parque automotor antiguo, poca movilidad vial por las obras de infraestructura, incremento desmedido de nuevas unidades vehiculares y la ubicación geográfica del casco urbano como punto de referencia para el paso obligado del transporte automotor pesado a nivel interdepartamental, los convierte en factores generadores de alta contaminación atmosférica para algunos sectores de la zona y de los municipios vecinos a la ZMB⁶.

En el costado izquierdo de la autopista hacia Bogotá y en el municipio de Floridablanca, se encuentran diversas instituciones educativas cuyas actividades agrupan poblaciones jóvenes y adultas que permanecen mucho tiempo del día en sus labores y podrían estar recibiendo las emisiones vehiculares provenientes principalmente de la autopista y la vía arterial de la zona; por consiguiente, es necesario conocer los niveles de contaminación en la zona de estudio a fin de determinar su impacto y de esta manera, identificar las especies químicas de mayor toxicidad presentes en el ambiente respirable como línea base para adelantar investigaciones futuras que den respuesta al potencial efecto en salud que tales contaminantes podrían generar en los grupos poblacionales cercanos a las autopistas. De igual manera, investigaciones a nivel piloto como estas, podrían replicarse en otras ciudades del país que adolecen de las mismas o peores condiciones que la ZMB.

Es evidente que esta zona necesita regulación ambiental ya que el resultado de una investigación realizada por La Corporación de la Defensa de la Meseta de Bucaramanga -CDMB- en su informe anual de 2013, sobre la estación ubicada en la terraza del edificio de Telebucaramanga sobre la autopista Bucaramanga-Floridablanca que desde 2011-2012 reportó niveles altos de contaminación debido a las obras de construcción del “Parque Caracol”, pero en 2013 una vez terminado la construcción los niveles de contaminación disminuyeron ya que ningún mes presentó “Nivel peligroso”. Los meses de abril y junio registraron “Nivel malo”, pero el resto de meses presentaron un “Nivel Regular”, según el índice IBUCA siendo el tráfico vehicular sobre la autopista la principal fuente de contaminación. Por otra parte, la concentración de PM₁₀ registrada no sobrepasó la norma (Resolución 610 de 2010 de MAVDT), aunque algunos datos estuvieron cerca de ella¹².

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la concentración de material particulado –PM₁₀– e identificar metales pesados por medio de difracción y/o fluorescencia de Rayos-X en el campus de la Universidad Santo Tomás, mediante monitoreos en cuatro sitios cercanos a la autopista Floridablanca-Bogotá para evaluar la calidad del aire en el ambiente respirable de la zona.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las variables topográficas y meteorológicas que influyen en la dispersión de los aerosoles en el entorno de la autopista Floridablanca-Bogotá.
- Realizar campañas de monitoreo para material particulado -PM₁₀- en el área de estudio aplicando normas MADS-IDEAM, avaladas por USEPA y OMS.
- Determinar la presencia de metales pesados en el material particulado monitoreado, mediante técnicas de difracción y fluorescencia de Rayos-X.
- Analizar estadísticamente las muestras de material particulado monitoreadas y determinar el nivel de contaminación atmosférica de la zona, considerando los estándares de calidad del aire establecidos en la Resolución No. 610 del 2010 MAVDT.
- Proponer estrategias de mitigación y de Vigilancia de la Calidad del Aire para la zona.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

La degradación del medio ambiente debido a ciertas actividades antropogénicas adoptadas durante los dos últimos siglos, ha dado lugar a la contaminación de los recursos naturales, donde la contaminación del aire se considera como la de más reciente aparición, siendo esta uno de los problemas socio-ambientales más importantes que afectan a nuestro planeta¹³. Las complejas mezclas de especies contaminantes emitidas al ambiente atmosférico a través de diversas fuentes de emisión, causan impactos sobre los ecosistemas y graves problemas en la salud afectando especialmente a la población residente en los grandes núcleos urbanos y en áreas fuertemente industrializadas, con denso tráfico de vehículo¹⁴.

Entre los contaminantes atmosféricos causantes del deterioro de la atmósfera se encuentran gran diversidad de gases, vapores y partículas, siendo los más comunes los gases inorgánicos como óxidos de nitrógeno -NO_x-, óxidos de azufre -SO_x y óxidos de carbono -CO-, vapores orgánicos y material particulado¹⁵.

Tales especies contaminantes son originadas por *fuentes fijas*, que son instalaciones situadas en lugares que hacen parte de plantas o procesos industriales, comerciales o actividades que generan emisiones contaminantes a la atmósfera, como las cementeras, refinerías o industrias de procesos químicos o procesadoras de alimentos¹⁶. De igual forma, estas especies contaminantes atmosféricas también son originadas por *fuentes móviles*, las cuales son maquinarias o equipos no fijos que generan emisiones debido fundamentalmente a procesos de combustión completa o incompleta, como vehículos utilizados en el transporte terrestre, aéreo y marino¹⁷. Se tienen también las emisiones de *fuentes naturales* que son procesos derivados de actividades en ecosistemas como consecuencia de procesos geológicos y meteorológicos¹⁸.

4.1.1 Material Particulado

El material particulado hace referencia a una mezcla de aerosoles o partículas sólidas y/o líquidas suspendidas en el aire¹⁹. La mayoría de estas partículas se forman por condensación de los vapores ácidos y compuestos orgánicos semivolátiles y/o por transformaciones en la atmósfera a partir de estructuras moleculares como el SO₂ y el NO_x, formando nitritos y/o sulfatos. Tales estructuras acídicas son emitidas directamente por procesos industriales y los

vehículos o por combustión incompleta de combustibles sólidos (madera-carbón)* dando lugar a partículas finas respirables e inhalables²⁰.

A partir del diámetro de las partículas el material particulado tiene una clasificación que se puede apreciar en la Tabla 1, siendo ellos indicadores criterio para la medición de la calidad del aire²¹. Según su proceso de formación, las partículas pueden ser *primarias* cuando son emitidas directamente de una fuente o *secundarias* cuando se forman a partir de condensación, precipitación y reacción química con otras sustancias de la atmósfera¹⁴.

Tabla 1. Clasificación del material particulado según su diámetro

Partículas	Diámetro (µm)	Denominación
Finas	< 0 = a 2.5	PM _{2.5}
Gruesas	< 0 = a 10	PM ₁₀
Suspendidas totales	Hasta 50	PST

Fuente: 22

Específicamente se ha determinado que el material particulado está compuesto por material geológico, sulfatos de amonio, nitratos de amonio, material orgánico, carbón elemental y elementos trazas²³. En particular, estas partículas se mezclan con algunas sustancias del aire formando compuestos orgánicos e inorgánicos, siendo el sulfato el más común de ellos. Las partículas más finas están compuestas de aerosoles secundarios, vapores y partículas de combustión. De la combustión incompleta se obtienen partículas compuestas por carbón elemental (grafito y hollín) y compuestos orgánicos no volátiles. Los nitratos de las partículas se forman de los vapores de ácido nítrico que generan las reacciones de los óxidos de nitrógeno en la atmósfera¹⁴. Dada la presencia de estos compuestos nitrogenados de alta toxicidad, la composición de las partículas se asocia a daños en la salud humana²⁴.

4.1.2 Riesgos del material particulado para la salud

El estudio de la presencia de compuestos contaminantes que son emitidos a la atmósfera resulta ser fundamental, ya que las concentraciones a las que están expuestas los grupos poblacionales revelan los graves efectos que puedan tener sobre la salud de estos. Disminuyendo los niveles de contaminación del aire se minimiza la carga de morbilidad por accidentes cerebrovasculares, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas y/o agudas²⁵

La contaminación del aire provoca uno de los mayores riesgos sanitarios mundiales, comparados con los riesgos vinculados al consumo del tabaco, solo superado por los riesgos de hipertensión y la mala nutrición. Según la Organización Mundial de la Salud –OMS- “La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud, bien sea en los países desarrollados o en los países en desarrollo”. Estudios recientes confirman que anualmente la contaminación del aire es la causa de morbilidad y muertes prematuras de aproximadamente siete millones de personas, donde el 80% de estas se atribuyen a cardiopatía isquémica y accidentes cerebrovasculares, el 14% a infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores y el 6% a cáncer de pulmón, donde el PM₁₀ es el contribuyente a la muerte de 3.7 millones de personas anualmente²⁵.

4.1.3 Metales pesados

La población humana está expuesta constantemente a altos niveles de contaminación del aire por acción de partículas finas y así mismo por metales pesados. Siendo estos últimos, elementos con altas densidades, inorgánicos, no degradables que resultan ser contaminantes tóxicos para el ser humano, ya que al acumularse en el ambiente respirable se introducen a través de las vías respiratorias o se depositan en la piel alterando los tejidos y afectando la salud²⁶. Estos materiales son generados por procesos industriales, antropogénicos y naturales, quema de basuras, combustión de combustibles fósiles, transporte vehicular pesado, minería, erosión de rocas, entre otras²⁷.

Determinar la concentración de aerosoles metálicos en el aire es de gran importancia actualmente, ya que su presencia se asocia con proceso de adsorción, inhalación y absorción por el organismo o los tejidos en forma de micropartículas²⁶. Su acumulación en el cuerpo por inhalación puede producir diversos tipos de cáncer, neurotoxicidad, cardiotoxicidad, entre otras afecciones crónicas. Los metales pesados y los óxidos de estos metales, se consideran tóxicos para los sistemas ambientales²⁸.

4.1.4 Riesgos de los metales pesados para la salud

La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de EE.UU (ATSDR), informa acerca de sustancias peligrosas y los efectos sobre la salud pública en relación con la exposición de ellas al inhalarlas²⁹. De otro lado, y bajo efecto silencioso los metales causan efectos irreparables al suelo, afectando la alcalinidad de este y con ello su productividad³⁰. A continuación, en la Tabla 2 se

registran los metales pesados de mayor importancia presentes en el PM₁₀ y sus efectos a la salud humana.

Tabla 2. Metales pesados de mayor importancia presentes en el PM₁₀

Metal	Entrada ambiente atmosférico	Efectos a la salud humana
Arsénico (Ar)	Erupciones volcánicas, minería, plantas de carbón, incineradores, plantas de energía, procesos de combustión.	Reducción de producción de glóbulos rojos y blancos, fatiga, ritmo cardíaco anormal, daño de vasos los vasos sanguíneos, alteración nerviosa, desarrollo de cáncer, dolor de garganta e irritación de pulmones, oscurecimiento de la piel.
Bario (Ba)	Emisiones de sitios de desechos peligrosos, minería, industria de gas y petróleo para fabricación e lodos de perforación, sustancias que se adicionan a aceites y combustibles, producción de lubricantes de bario, refinación de aceite animal y vegetal.	Daño a pulmones, hipertensión.
Manganeso (Mn)	Emisiones a base de manganeso en manufacturas, emisiones de soldadura donde se manufactura acero	Daño al sistema nervioso: alteraciones del comportamientos y en movimientos lentos y son coordinación, manganismo, lentitud de movimientos de las manos, irritación de los pulmones y efectos sobre la reproducción.
Plomo (Pb)	Minería, emisiones industriales, quema de carbón o petróleo, gases emanados de gasolina con plomo, manufacturas de baterías de plomo, fundición de materiales como bronce y latón, incineración de residuos sólidos, volcanes, y humo de cigarrillos.	Afección al sistema nervioso, debilidad en dedos, tobillos o muñecas, anemia, cerebro, daño a huesos, riñones, abortos, alteración producción de espermatozoides, probablemente carcinogénico (Según EPA, IARC, DHHS)
Vanadio (V)	Emisiones volcánicas, emisiones de refinerías de petróleo y plantas de energía que utilizan combustible de petróleo, carbón rico en vanadio y humo de cigarrillo.	Daños a pulmones, garganta y nariz. Posiblemente carcinógeno en seres humanos según el IARC.

Fuente: 29

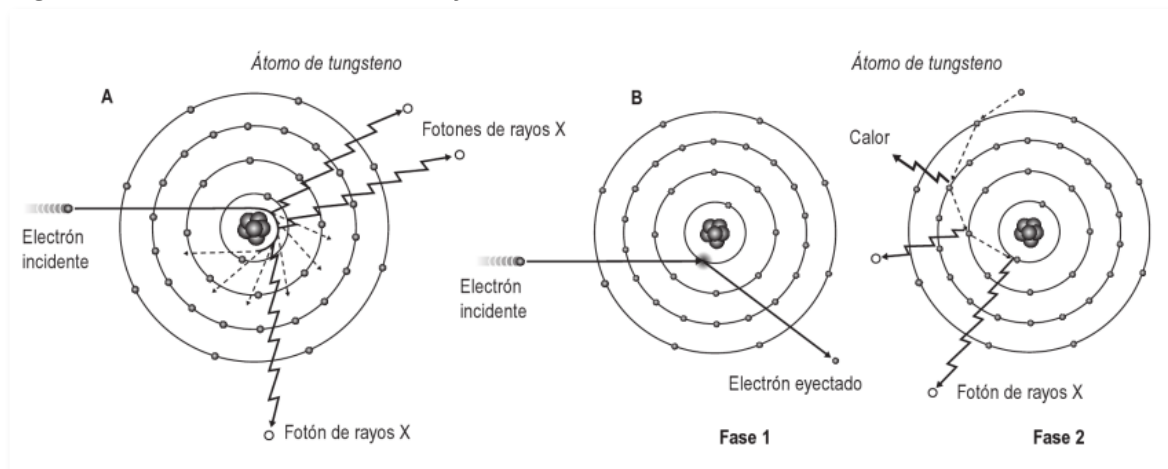
4.1.5 Técnicas de Especiación Química.

Existen diversas técnicas que permiten al análisis cualitativo y cuantitativo de muestras de elementos traza presentes en muestras biológicas, médicas o ambientales, como espectroscopia de absorción atómica –AAS–, espectroscopia de masas ICP-AES, MS, las cuales requieren que las muestras sean líquidas. Las técnicas que permiten trabajar con muestras sólidas son las de difracción de Rayos-X de muestras policristalinas y Fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva ³¹, siendo estas últimas, las técnicas especiación química utilizadas en la presente investigación.

Los Rayos-X según González Arias Arnaldo son “radiaciones electromagnéticas de frecuencia superior al ultravioleta, formados por paquetes de onda de energía. Su longitud de onda va desde unos 10 nm hasta 0.001 nm; mientras menor es la longitud de onda, mayores son su energía y poder de penetración”³².

Los Rayos-X resultan del bombardeo de un haz de electrones de alta velocidad (alta energía) a un elemento tomado como objetivo, dentro de un tubo de Rayos-X³³. El electrón incidente se infiltra por medio de las capas externas del átomo de tungsteno hasta llegar cerca al núcleo donde es desviado por fuerzas repulsivas generando fotones de Rayos-X (ver Figura 1A), o bien, colisiona con un electrón interno trasladándolo a una capa más externa o lo ioniza, es decir, lo arranca del átomo, lo que genera una gran pérdida de energía y emisión de Rayos-X (ver Figura 1B), obteniendo de esta forma un espectro continuo y un espectro de líneas característico del elemento objetivo. La muestra expuesta a Rayos-X se transforma en fuente de emisión secundaria distinguiéndose tanto los Rayos-X de fluorescencia como los Rayos-X dispersos³⁴.

Figura 1. Generación de los Rayos-X



Fuente: 34

4.1.5.1 Difracción de Rayos-X de muestras policristalinas

La difracción de Rayos-X por el método de polvo constituye una gran herramienta de trabajo en diversas disciplinas científicas y tecnológicas, permitiendo abordar el estudio cristalográfico de las especies orgánicas, inorgánicas y/o minerales presentes en el espécimen de interés³⁵.

Esta técnica es la más empleada en la identificación de fases cristalinas, tanto en su aspecto cuantitativo como cualitativo, debido a la confiabilidad de los resultados, tiempos cortos de medición y a los métodos sencillos de preparación

de las muestras³⁶. El método consta en irradiar la muestra policristalina con Rayos-X, que atraviesan los sólidos o cristales, dispersando la radiación que al interaccionar con los electrones de los átomos reflejará parte del haz de Rayos-X³⁷.

4.1.5.2 Fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva (EDXRF)

Actualmente, la aplicación de la técnica EDXRF está siendo implementada en el análisis de partículas suspendidas en el aire, en especial para análisis elemental de metales. El uso de esta técnica ofrece ventajas por ser una técnica no destructiva, rápida y precisa, que reconoce gran cantidad de elementos químicos. Cuenta además, con un límite de detección de hasta 0.002% (20 ppm) y la preparación de la muestra requiere menor tiempo y esfuerzo frente a otras³⁸.

La técnica EDXRF según el autor Héctor Mora Chamorro: “utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X que se genera al excitar una muestra con una fuente emisora de Rayos-X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo, donde electrones de las capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético se disipa en forma de fotones (radiación fluorescente), radiación característica para cada elemento químico”, identificando de esta manera el elemento en el espectro de la muestra conociendo la longitud de onda; es decir un análisis cualitativo y un análisis cuantitativo, detectando la concentración de los elementos midiendo la intensidad de la energía de cada pico³⁹.

4.1.6 Monitoreo ambiental

Un sistema de monitoreo ambiental según el autor Mercado García Alfonso “supone un sistema integral de seguimiento continuo y de mediciones de diferentes características del ambiente natural, para su posterior evaluación y pronóstico de los cambios experimentados bajo la influencia antrópica y de los factores naturales”⁴⁰. El desarrollo de un monitoreo ambiental es importante debido a que se comprueba la implementación de medidas de mitigación de los impactos ambientales; además, se definen medidas correctivas detectando con anticipo cambios nocivos, si así se requiere; permitiendo detectar impactos que son causados por procesos antrópicos, para evaluar los resultados obtenidos y comparar los con las metas trazadas⁴¹.

El monitoreo de los contaminantes atmosféricos es el lineamiento preciso para diagnosticar la calidad del aire. A través de estos se obtienen las concentraciones de los contaminantes a nivel troposférico, logrando una aproximación de la contaminación que se presenta en una zona de estudio y poder así determinar qué calidad de aire respiran los habitantes del área⁴². En Colombia, se ha implementado el documento denominado “Protocolo para Monitoreo y

Seguimiento de la Calidad del Aire”, como una referencia fundamental para establecer los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire –SVCA-² en las ciudades del país que lo requieran.

4.1.6.1 Campañas de monitoreo

Las campañas de monitoreo se realizan para definir niveles probables de contaminantes de interés específico en una zona determinada; su duración debe ser mínimo de dos meses y deberá incluir una temporada seca y otra húmeda. El fin de estas campañas es evaluar la distribución espacial y temporal de las concentraciones de los contaminantes que establecen las normas nacionales de la calidad del aire, valiéndose del análisis e interpretación de los datos obtenidos en campo. Con la información obtenida se busca fijar valores probables que permitan diseñar un Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire –SVCA- para un área urbana determinada. Las campañas de monitoreo para la evaluación de la calidad del aire debe contener al menos:

- La distribución espacial y temporal de los contaminantes
- Variables meteorológicas que se presentan durante el estudio.
- Comparación entre los niveles de concentración de los contaminantes y las normas nacionales de la calidad del aire².

4.1.6.2 Equipos utilizados durante la campaña de monitoreo

Para obtener cada una de las muestras de material particulado en los puntos de monitoreo, se utilizó el muestreador de aire autónomo PQ200. Para obtener los parámetros meteorológicos con el fin de construir la Rosa de los Vientos, se instaló la estación meteorológica automática marca Davis, ambos equipos adquiridos a través del proyecto de investigación: “Determinación de material particulado y especies químicas de interés en salud pública. Caso autopista Floridablanca-Bogotá. Sector Universidad Santo Tomás”, y se describen a continuación.

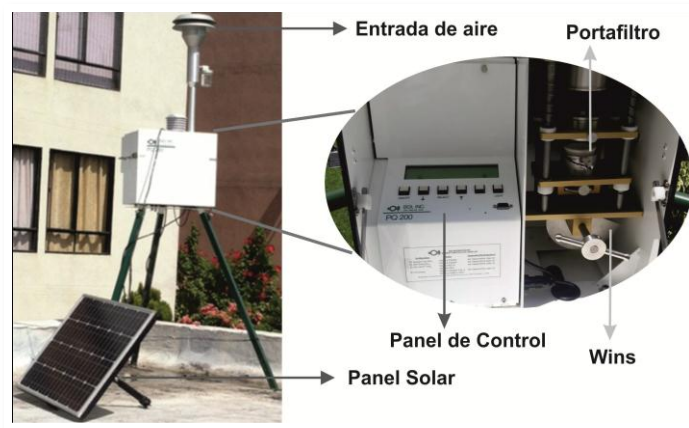
4.1.6.3 Muestreador de aire BGI modelo PQ-200 - PM₁₀

El muestreador de aire BGI Low-Vol PQ-200, con el Registro Federal No. RFPS-1298-125 que opera bajo normatividad EPA EQPM-0202-142, es un microprocesador controlado que permite obtener una muestra válida de PM₁₀ (removiendo el impactador WINS y cambiándolo por un tubo recto) o de PM_{2.5}, mediante la obtención del caudal volumétrico del aire, este es instrumento fabricado bajo normas de certificación ISO 9001 en Estados Unidos⁴³.

El muestreador PQ-200 posee como característica principal el controlador PID que garantiza un flujo constante de aire de 16.71 lpm. Opera con una batería interna, fuente de DC de 12 voltios, además, utiliza un panel solar SP32 como fuente

auxiliar proporcionando periodos extensos de funcionamiento dependiendo de la radiación solar (ver Figura 2). Finalizado el monitoreo, la información se descarga de la memoria del PQ200 mediante el software “Job Controller” versión 2.3, el cual realiza el ordenamiento de la información, así como el manejo de datos, el cálculo de la concentración y la validación de las muestras⁴³.

Figura 2. Equipo muestreador PQ-200



Fuente: Autoras

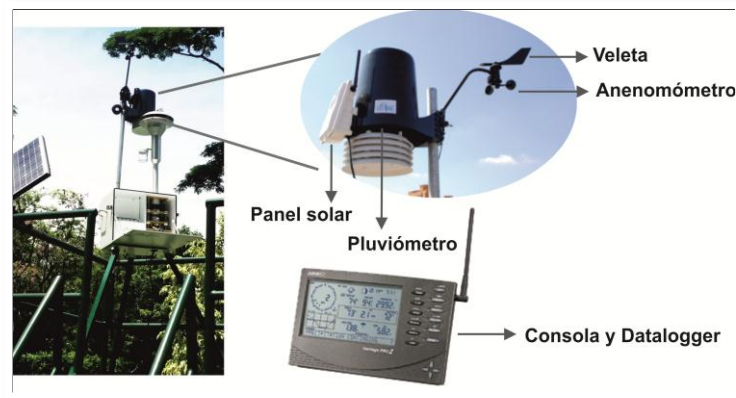
4.1.6.4 Estación meteorológica DAVIS

La estación meteorológica Vantage PRO PLUS 2 de DAVIS Instruments ofrece tecnología de gama alta que permite registrar los datos meteorológicos y proporcionar gráficos, versión inalámbrica, que transmite los datos a los sensores exteriores del ISS a la consola utilizando un sistema de radiofrecuencia de baja potencia (ver Figura 3). Esta estación se conecta a la computadora utilizando el Software WeatherLink. La consola entrega alimentación al conjunto integrado de sensores (Integrated Sensor Suite –ISS) por medio del cable de la consola⁴⁴.

Esta estación meteorológica, utiliza un adaptador de corriente AC a un cable. Dentro de las variables meteorológicas que proporciona el equipo se registran:

- Dirección del viento
- Velocidad del viento
- Temperatura
- Evotranspiración
- Humedad relativa
- Presión barométrica
- Radiación solar / Radiación UV

Figura 3. Estación Meteorológica Davis



Fuente: Autoras

4.1.7 Rosa de Los Vientos

Las condiciones meteorológicas permiten la reducción de las descargas de contaminantes hacia la atmósfera, en donde las dispersiones de tales descargas son transportadas por la velocidad y la dirección del viento. Los cambios que presentan estas dos variables meteorológicas a lo largo del tiempo y en un sitio determinado, se representan en forma de diagramas denominados *Rosa de los vientos*, los cuales muestran estadísticamente las condiciones meteorológicas en un tiempo determinado⁴⁵.

Tabla 3. Escala Beaufort de velocidades del viento

Fuerza	Descripción	Velocidad (m/s)
0	Calmado	0
1	Ligero	0,45 – 1,34
2	Ligero	1,8 – 3,1
3	Ligero	3,6 – 5,4
4	Moderado	5,8 – 8,0
5	Fresco	9,5 – 10,7
6	Fuerte	11 – 14
7	Fuerte	14 – 17
8	Vendaval fresco	17 – 21
9	Vendaval fuerte	21 – 24
10	Vendaval total	25 – 28
11	Vendaval tempestuoso	29 – 32
12	Huracán	33 – 37

Fuente: 45

Para elaborar una Rosa de Viento, se toman los datos de estaciones meteorológicas obteniendo una serie de líneas que van desde el centro de un círculo y se dirigen en la dirección que el viento sopla, donde la longitud de cada

una de ellas representa la frecuencia del viento en esa dirección. La escala Beaufort indica las velocidades de los vientos en diferentes direcciones. En la Tabla 3 se presentan las diferentes velocidades del viento para cada numeración de la escala de Beaufort⁴⁵.

4.1.7.1 Software para crear Rosas de Viento

El software WRPLOT View -Wind Rose Plot View- está diseñado para análisis de los datos del viento. Calcula las estadísticas de frecuencia de viento de 16 direcciones (22,5 arco-grado) proporcionando una gráfica del levante del viento en cada sector eólico. Este programa se vale de datos meteorológicos como entrada⁴⁶.

WRPLOT View es un programa para Rosas de los Vientos completamente operativo para datos meteorológicos, que ofrece análisis de frecuencia y parcelas para varios formatos de datos meteorológicos. La Rosa de los Vientos representa la frecuencia de aparición de estos en cada uno de los sectores de dirección y velocidad del mismo para un lugar y periodo dado⁴⁷.

La Rosa de Vientos se caracteriza por visualizar:

- Datos meteorológicos.
- Análisis de datos meteorológicos mostrando parcelas.
- Tablas y gráficos de distribución de frecuencia de los vientos.
- Compatibilidad con todos los formatos de archivo más comunes. Aquellos que no lo son, se pueden importar de Excel.

Adicional a las características anteriores, se puede visualizar la Rosa de los Vientos en Google Earth, donde se tiene el control de colores, opacidad, radio máximo y altura. Este software está relacionado con Microsoft Windows permitiendo instalarlo en los sistemas operativos Windows: 32-bit y 64-bit sistemas operativos, Microsoft Windows 8, 7, Vista y XP Professional⁴⁷.

4.1.8 Índice de Calidad del Aire

El Índice de la Calidad del Aire reporta diariamente el nivel de contaminación del aire y los potenciales efectos en la salud de la población relacionada. La EPA calcula este índice considerando los cinco contaminantes criterio regulados por la Ley de Aire Limpio: ozono a nivel de superficie, material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, donde para cada uno de estos contaminantes se establecen normas de calidad del aire para proteger la salud pública y la capa de ozono⁴⁸.

A nivel regional, La Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga-CDMB- define el Índice de la calidad del Aire para el Área Metropolitana de Bucaramanga –IBUCA- como un registro en la escala de 0 a 10

dependiendo del nivel de contaminación de la zona. A continuación en la Tabla 4 se observan los intervalos respectivos⁴⁹. Para la presente investigación se ha definido un Índice de Calidad del Aire para Floridablanca en meses -ICAF_M-, el cual representa la Calidad del Aire en el ambiente respirable para una zona en particular del municipio de Floridablanca. Como se trata de establecer un comparativo del grado de deterioro de la zona en estudio con respecto al material particulado y la posible presencia de metales de interés sanitario para la población residente en dicha zona, este índice se ha preferido representarlo bajo periodicidad mensual.

Tabla 4. Intervalos IBUCA

ICA	COLOR	CLASIFICACIÓN
0 – 1,25	Verde	Buena
1,26 – 2,50	Amarillo	Moderada
2,51 – 7,50	Naranja	Regular
7,51 – 10	Rojo	Malo
>10	Púrpura	Peligroso

- 0 – 1.25: La calidad del aire es considerada como satisfactoria y la afectación en la contaminación del aire es pequeña y no evidencia ningún efecto en la salud humana.
- 1.26 – 2.50: La calidad del aire es aceptable y no tienen ningún efecto sobre la población en general.
- 2.51 – 7.50: Aumento de molestias en personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares; aparición de ligeras molestias en la población en general.
- 7.51 – 10: Agravamiento significativo de la salud en las personas con enfermedades cardíacas o respiratorias. Afectación de la población sana.
- >10: Alto riesgo para la salud de la población. Aparición de efectos al nivel de daño.

Fuente: 49

4.1.9 El Municipio de Floridablanca

El municipio de Floridablanca objeto de esta investigación, se encuentra comprendido dentro del Área Metropolitana de Bucaramanga –AMB- conformada además por los municipios de Bucaramanga, Girón y Piedecuesta.

Floridablanca se encuentra a 1 Km del municipio de Bucaramanga con una extensión de 97 Km², ubicado a 925 msnm. La cabecera municipal está localizada a los 07° 03' 53" de latitud norte y 73° 05' 23" de longitud meridiano Oeste del meridiano de Greenwich⁵⁰. El municipio de Floridablanca pertenece al Departamento de Santander, en la provincia de Soto. Limita al Norte con el municipio de Bucaramanga, al Sur con el municipio de Piedecuesta, al Oriente con los municipios de Tona y Piedecuesta y al Occidente con el municipio de Girón y Bucaramanga⁵¹.

De acuerdo con el DANE, Floridablanca cuenta con 263.095 habitantes (proyección 2012)⁵². El clima del municipio es catalogado como cálido moderado, con una temperatura promedio de 23°C, con dos períodos lluviosos y dos secos: el lluvioso comprende los meses de marzo, abril y mayo, para la primera época, y septiembre, octubre y noviembre para la segunda. Las épocas secas están determinadas por los meses de diciembre, enero y febrero y los meses de junio, julio y agosto⁹.

Algunas industrias ubicadas en este municipio descargan contaminantes por el desarrollo de sus procesos productivos, hecho que deteriora la calidad del aire, haciendo que estos agentes contaminantes vulneren los derechos fundamentales a la vida, la salud y el ambiente sano. Entre las actividades económicas que desarrolla este municipio se encuentran las avícolas, planta de agua potable, porcícolas, piscícolas, industrias metalmecánicas, cementeras, lavanderías industriales, producción de diferentes tipos de pisos, enchapes y pinturas y agricultura con agro tóxicos⁹.

El desarrollo industrial de Floridablanca incluye actividades industriales como cementeras que emiten concentraciones de agentes tóxicos al medio ambiente como es el material particulado. Así mismo, dentro del área del municipio se encuentran conjuntos residenciales e instituciones educativas como el Colegio Agustiniano, SENA, Universidad Santo Tomás, Colegio Santa Teresita, entre otros.

4.2 MARCO DE ANTECEDENTES

Yunjie, H y colaboradores (2015) en Beijing capital de la república de China, realizaron un muestreo de aire en el verano del 2012 para determinar el comportamiento de partículas mezcladas con metales y aerosoles atmosféricos. El estudio de campo consistió en recoger muestras de aerosoles de forma consecutiva durante el periodo de 23 mayo a 24 de junio 2012, en el instituto de física atmosférica. Las muestras fueron analizadas con el microscopio electrónico de transmisión de alta resolución (TEM JEOL-2010F) de emisión de campo (FE-HRTEM) acoplado con una energía dispersiva del espectro de Rayos-X Oxford (EDS) y recogido en el TEM rejillas de cobre. Como resultado de este análisis se obtuvo principalmente: Fe (48,5%), Zn (34,9%) y Pb (15,6%) acompañados de trazas en menor cantidad⁵³.

Atar Sing H, P.P y Gursumeeran, S. (2015) investigaron en Pune India en el 2013 durante el periodo de mayo a octubre el material particulado (PM_{2,5} y PM₁₀) el cual fue recolectado con la ayuda del muestreador de aire de volumen (Mini Vol TAS) durante 24 h. Las muestras de material particulado se recogieron dos veces por semana en filtros de fibra de cuarzo de diámetro 47 mm (QFF). Los filtros se desecaron a 20-30 °C y después de ser recolectados se mantuvieron en bolsas de

polietileno y se almacenaron en el desecador para evitar la degradación de compuestos orgánicos debido a la foto-oxidación. Las muestras se analizaron mediante un microscopio de barrido de emisión de electrones de campo controlado por ordenador (SEM), junto con la energía del espectrómetro dispersivo. Las concentraciones promedio de masa obtenidas fueron para $PM_{2,5}$ y PM_{10} de $104,57 \pm 25,70 \text{ mg m}^{-3}$ y $169,91 \pm 60,75 \text{ mg m}^{-3}$. Estos valores son considerablemente superiores a la norma anual estipulado por *Indian National Ambient Air Quality Standard (NAAQS)*⁵⁴.

Fátima, A.M y colaboradores realizaron un estudio en Brasil sobre la quema de combustible como la principal fuente de contaminación, se estudió en seis de sus capitales estatales, (São Paulo, Río de Janeiro, Belo Horizonte, Curitiba, Porto Alegre, Recife) con el fin de evaluar el impacto de la contaminación atmosférica sobre la salud humana. Desde el invierno de 2007 a invierno de 2008, se recogieron muestras de $PM_{2,5}$ cada 24h empleando gravimetría para determinar concentraciones de masa $PM_{2,5}$; reflectancia para cuantificar las concentraciones de carbono negro; Fluorescencia de Rayos-X para caracterizar la composición elemental; y cromatografía de iones para determinar la composición y las concentraciones de aniones y cationes. Las concentraciones obtenidas 28, 17.2, 14.7, 14.4, 13.4 y 7.3 mg/m^3 , respectivamente. En las seis ciudades, las emisiones de vehículos explican al menos el 40% de la $PM_{2,5}$ en masa⁵⁵.

Reportes entregados por el Grupo de Información e Investigación ambiental a través de la Red de Monitoreo de la calidad del aire de la CDMB, presentaron un "Reporte de calidad del aire Área Metropolitana de Bucaramanga mayo-junio 2013" donde informaron acerca de la concentración de los principales contaminantes que afectan la salud humana en el área estudiada. El estudio incluyó ocho estaciones automáticas, estaciones manuales con equipos muestreadores de material particulado los cuales proporcionan información de 24 horas de monitoreo continua cada tercer día. Las estaciones fueron ubicadas en Bucaramanga (Norte, Centro, Joya, Cabecera, La Concordia, San Miguel, Ciudadela) y Floridablanca, para monitorear los cinco contaminantes criterio que exige la Norma Colombiana: CO, CO₂, NO_x, Ozono troposférico, SO_x y material particulado. Los resultados indicaron para PM una calidad del aire regular el 88% de tiempo y moderado el tiempo restante. Los otros contaminantes monitoreados no sobrepasaron los valores de la norma establecida⁵⁶.

Zafra Mejía, C.A y colaboradores (2012) realizaron un estudio de partículas atmosférica y sedimentadas de superficies viales. El área de estudio comprendió dos zonas: el centro urbano de Soacha y la zona del corredor vial de la Autopista Sur de Bogotá D.C. Soacha. Se recolectaron 44 muestras de PM_{10} y PST en cada zona en un periodo comprendido de enero a mayo del año 2010. Para esto, se utilizaron dos estaciones manuales, con equipos de alto volumen, durante 24 horas. Para lo cual se determinó Fe, aplicando la técnica de espectrometría de

absorción atómica de llama y para Pb un equipo de plasma inductivamente acoplado con espectrometría de masas; registrando el Pb como el metal con mayor concentración, seguido del Fe. Se obtuvo mayor concentración para el PM₁₀ que para el PST⁵⁷.

Tony .B, Mary .S, y Ambrose .F trabajaron en una serie de estudios (2010) sobre materia particulado (PM₁₀) llevado a cabo en el condado de Cork, Irlanda donde fueron seleccionados entre 2005 y 2006. Los sitios de monitoreo fueron seleccionados de acuerdo a diferentes condiciones climáticas y geográficas, así como las influencias antropogénicas, que van desde fondo rural a zonas industriales. Las mediciones se llevaron a cabo con muestreado de alto volumen gravimétrico, junto con análisis elementales validados utilizando plasma de acoplamiento inductivo-espectroscopia de emisión óptica, la cromatografía de iones y el flujo de análisis por inyección. En general durante todo el período de seguimiento, los valores de material particulado aumentaron con la velocidad del viento. Los componentes Principio (PCA) muestra los grupos más afines: (Ca²⁺, K⁺, Al⁺, Fe²⁺), (Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻), (Zn²⁺, SO⁴⁻), (N³⁺, Mn⁺) y (Cu⁺, Pb²⁺)⁵⁸.

Velasco García M (2005) en la ciudad de Manizales-Colombia realizó un estudio para determinar la calidad del aire asociado con metales pesados. Utilizó tres estaciones de monitoreo (Centro, Milán y Maltería). El estudio se realizó con un muestreador de alto volumen (High Vol) para medir la concentración de partículas suspendidas totales (PST) en el aire, durante 24 horas, por diez días distribuidos durante dos meses. Se determinó la presencia de metales pesados tales como mercurio, plomo, cadmio, níquel, berilio y antimonio por medio de la técnica de absorción atómica. Los resultados de PM₁₀ en la estación del centro de la ciudad registro 57 µg/m³ excediendo la norma actual vigente de la EPA (50 µg/m³)⁵⁹.

4.3 MARCO NORMATIVO

4.3.1 Normatividad para contaminantes criterio (PM₁₀ y PM_{2.5})

Según la Resolución 610 de 2010: “la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión es el nivel de concentración legalmente permisible de sustancias o fenómenos contaminantes presentes en el aire, establecido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, con el fin de preservar la buena calidad del medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana”. Esta resolución contiene los conceptos básicos relacionados con el ambiente atmosférico, además, en el Artículo 2 se estipulan los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio (ver Tabla 5), que se calculan con el promedio geométrico para PST y promedio aritmético para los demás contaminantes⁶⁰.

Tabla 5. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio PM₁₀ y PM_{2.5} según Resolución 610/2010

Contaminante	Nivel máximo permisible (µg/m ³)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	50	24 horas

Fuente: 60

De igual forma, en la Tabla 6 se presentan los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio PM₁₀ y PM_{2.5} según la Organización Mundial de la Salud.

Tabla 6. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio PM₁₀ y PM_{2.5} según OMS

Contaminante	Nivel máximo permisible (µg/m ³)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	20	Anual
	50	24 horas
PM _{2.5}	10	Anual
	25	24 horas

Fuente: 61

4.3.2 Normatividad para metales pesados

El Artículo 3 de la Resolución 610 de 2010 de Colombia determina los niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos, para el elemento plomo y vanadio. Por otro lado para el elemento manganeso de efecto no cancerígeno la OMS fija un valor máximo permisible (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales

Contaminante No Convencional	Nivel máximo permisible (µg/m ³)		Tiempo de exposición
	Res. 610 de 2010	OMS	
Plomo	0,5	-	Anual
	1,5	-	24 horas
Vanadio	1	-	24 horas
Arsénico	-	1,5*10 ⁻³	-
Manganeso	-	0,15	Anual

Fuente: 60, 62

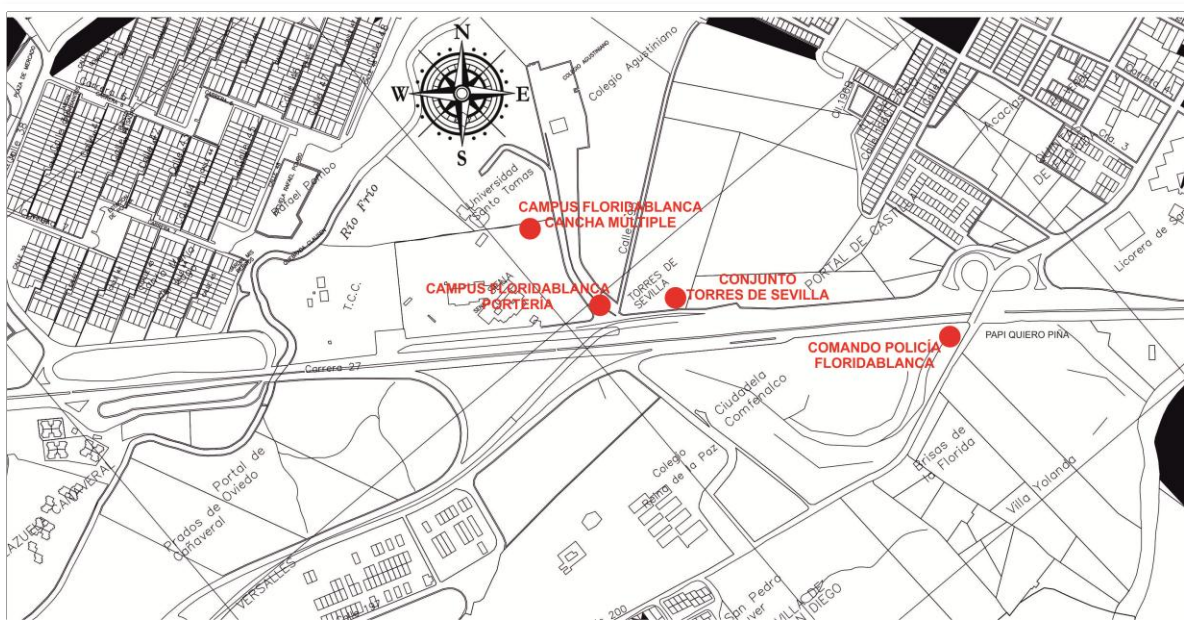
5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES PARA LA ZONA DE ESTUDIO

5.1.1 Variables topográficas y meteorológicas.

Para determinar las variables que influyen en los patrones de dispersión del PM_{10} y demás especies químicas, fue necesario disponer en un plano topográfico georeferenciado, los accidentes y demás elementos del sistema en estudio tales como autopistas, edificios y demás receptores. (ver Figura 4).

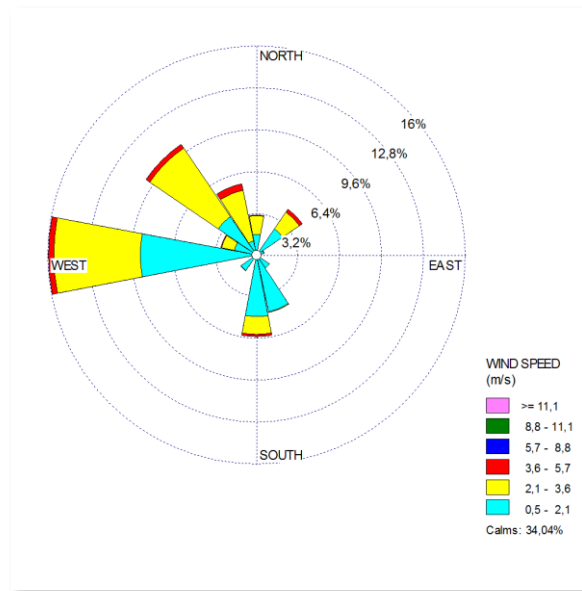
Figura 4. Plano urbanístico georeferenciado de la zona en estudio



Fuente: Facultad de Arquitectura USTA

Para identificar las condiciones meteorológicas históricas del municipio de Floridablanca se realizó una Rosa de los Vientos comprendida entre los años 2013 a 2015, cuya influencia en la dispersión de los contaminantes y en la calidad del aire es altamente significativa. Se puede observar en la Figura 5, que la dirección prevalente de los vientos corresponde al oeste (16%) con ligeras fluctuaciones del noroccidente (9.6%) y sur (6.4%), indicándose con esto que la dispersión puede darse en diversas direcciones. Los valores históricos de velocidades del viento oscilan entre calma ($< 0,5$ m/s) con presencia de 34,04% indicándose con esto una baja dispersión de los contaminantes. Por otro lado, en mayor proporción se registran velocidades comprendidas entre 0,5 a 3,6 m/s en su mayoría y en menor proporción vientos entre 3,6 a 5,7 m/s, reflejando una amplia dispersión de los contaminantes.

Figura 5. Rosa de Los Vientos Histórica / Periodos 2013-2015



Fuente: CDMB

5.2 CAMPAÑA DE MONITOREO PARA MATERIAL PARTICULADO –PM₁₀–

Inicialmente se realizó la recolección de los filtros expuestos en diversos sectores cercanos a la autopista Floridablanca – Bogotá a la altura de la USTA. Para esto se aplicó la metodología mostrada a continuación y soportada en el Anexo A, basado en el Protocolo para el Monitoreo y la Calidad del Aire². Para tal fin, se utilizó un equipo muestreador PQ200 adquirido por la Universidad Santo Tomás – USTA- específicamente para este proyecto de investigación, esto con el propósito de determinar la concentración de material particulado PM₁₀ en los filtros y a su vez la identificación y ensayos preliminares de la cuantificación del contenido de metales pesados en las muestras.

5.2.1 Sitios de monitoreo

Para llevar a cabo este análisis, se seleccionaron cuatro puntos de monitoreo escogidos estratégicamente donde se tuvo en cuenta las condiciones meteorológicas de la zona es decir la condición de vientos (estaciones vientos abajo y arriba en puntos de influencia de vías de alto tránsito), congestión vehicular (autopistas) y complejos industriales (ver Figura 4). Los sitios de interés fueron:

- *Campus Floridablanca Cancha múltiple de la USTA –CFCM-* (ubicada a 150 m de la autopista): ubicado en zona vientos abajo del sector en estudio, en punto de influencia de vías de alto tránsito y zona de aglomeración poblacional (estudiantes).
- *Campus Floridablanca Portería de la USTA –CFP-* (ubicada a 100 m de la autopista): ubicado zona vientos abajo del sector en estudio, en punto de influencia de vías de alto tránsito y zona de aglomeración poblacional (estudiantes).
- *Conjunto Torres de Sevilla* (ubicada a 30 m de la autopista): ubicado en zona vientos arriba del sector en estudio y en punto de influencia de vías de alto tránsito.
- *Comando Policía Floridablanca –CPF-* (ubicada a 50 m de la autopista): ubicado en zona cercana a complejos industriales (cementera y avícola) del sector en estudio.

Esta selección se realizó debido a la importancia de conocer la calidad del aire de la comunidad de la USTA en la seccional Floridablanca y para evaluar la incidencia de las industrias cercanas al sector.

5.2.2 Periodos seleccionados para monitoreos

El monitoreo se dividió en dos etapas: periodo de invierno y periodo de verano. El monitoreo atmosférico en el periodo de invierno se ejecutó en el período comprendido entre el día 1 del mes de octubre hasta el día 28 del mes de noviembre de 2014, mientras que en el periodo de verano el monitoreo se realizó entre el día 3 del mes de diciembre de 2014 hasta el día 26 de marzo de 2015. Cada monitoreo se realizó en un periodo de 24 horas.

Para el monitoreo se utilizó un muestreador ambiental PQ200 para material particulado PM₁₀ que integra la tecnología patentada para monitoreos de partículas bajo la regulación de la agencia de protección ambiental estadounidense US EPA. Para esto se cumplió con las especificaciones recomendadas por el proveedor para su correcta utilización.

5.2.3 Medio de recolección de las muestras

Para recolectar cada una de las muestras se utilizaron filtros de fibra de cuarzo suministrados por el proveedor del equipo. Este filtro se puede utilizar en condiciones extremas de temperatura o químicos que otras membranas no pueden soportar (hasta 260°C). Las características del filtro se describen a continuación en la Tabla 8.

Tabla 8. Características del filtro para recolección de muestras

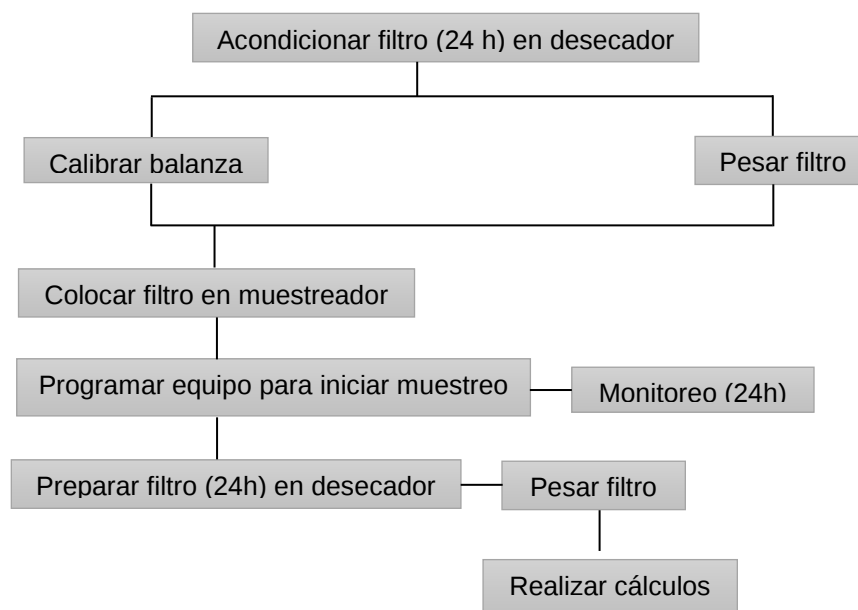
Características del filtro	
Marca	PALL Life S
Forma	Circular
Diámetro	47 mm
Color	Blanco
Tamaño de poro (micras)	5,0
Material	Hidrófoba de politetrafluoroetileno (Teflón PTFE)/anillo de soporte integral.
Filtro de superficie	Simple
Espesor del filtro	170 μm
Captación máxima de humedad	Incremento de peso no mayor a 10 μg después de 24 horas de exposición al aire.

Fuente: 63

5.2.4 Procedimiento de monitoreo para captación de PM_{10}

El procedimiento que se llevó a cabo durante la campaña de monitoreo se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Procedimiento de monitoreo para captación de concentración de PM_{10}



Fuente: Autoras

5.2.5 Determinación de la concentración de material particulado

Para registrar los datos de cada uno de los puntos de monitoreo se utilizó un formato de campo que permitiera llevar un control de la información (ver Anexo B). Los filtros limpios se acondicionaron en un desecador por espacio de 24 horas (ver Figura 7) y se pesaron en una balanza electrónica marca Ohaus (Sensibilidad 0,0001 g) para registrar su peso inicial (ver Figura 8). Las muestras de PM_{10} se recogieron cuatro veces por semana en cada punto de monitoreo y se documentó cada resultado durante todo el período de estudio.

Figura 7. Acondicionamiento de filtros limpios en el desecador



Fuente: Autoras

Para evitar la contaminación de los filtros durante el traslado del equipo al laboratorio, se guardaron en bolsas de polietileno debidamente marcadas con el código de cada punto y número de filtro, además, fueron manipulados con pinzas para reducir la posibilidad de contaminación.

Figura 8. Acondicionamiento del pesaje inicial del filtro



Fuente: Autoras

Posteriormente de recogidos los filtros expuestos en el equipo muestreador, se llevaron al desecador por 24 horas y se pesaron nuevamente para registrar su peso final (ver Figura 9), esto para determinar la concentración por el método gravimétrico, utilizando la Ecuación 1.

Figura 9. Pesaje final del filtro expuesto y almacenamiento para análisis



Fuente: Autoras

$$M = P_f - P_i \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: M= masa de PM₁₀
P_f= Peso final PM₁₀
P_i= Peso inicial PM₁₀

El volumen da cada una de las muestras se adquirió de los datos del equipo PQ200, donde fue necesario realizar una corrección (ver Ecuación 2) utilizando la presión atmosférica del sitio de estudio, en este caso del municipio de Floridablanca. Esta corrección se realizó, debido a que la Resolución 610 de 2010 establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión para todo el territorio nacional en condiciones de referencia⁶⁰.

$$\frac{V_1 \cdot P_1}{P_2} = V_2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: V₁= volumen que registra el equipo para cada muestra
V₂= volumen corregido de la muestra
P₁= presión atmosférica promedio que registra el equipo
P₂= presión atmosférica de Floridablanca (760mmHg)

Para la determinación de la Concentración de cada muestra se tomaron los resultados anteriores y se remplazaron en la Ecuación 3. Ver datos en los Anexos C, D, E y F.

$$C = \frac{M}{V} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde: C= concentración PM₁₀
M= masa PM₁₀
V= volumen PM₁₀

5.2.6 Determinación del Índice de Calidad del Aire

Para calcular el Índice de Calidad del Aire de la zona estudiada se utilizó la Ecuación 4 con similitud al índice de calidad del aire aplicado a nivel nacional que para la zona metropolitana de Bucaramanga se ha definido como IBUCA. Como se mencionó anteriormente este índice representa un registro en la escala de 0 a 10 dependiendo del nivel de contaminación de la zona. Para el caso de esta investigación el Índice de Calidad del Aire de Floridablanca en meses –ICAFM- el contaminante criterio predefinido es el material particulado PM₁₀.

$$ICAF = [(CEV)_i / Norma_i] * 10 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde: ICAF_M: Índice de Calidad del Aire del municipio de Floridablanca en meses
(CEV)_i: Concentración medida del contaminante a evaluar
Norma: Norma para cada uno de los contaminantes
I: contaminante a evaluar

El ICAF_M es el máximo de los valores calculados, según la Ecuación 4, en este caso para el PM₁₀ durante 24 horas. La norma para calcular el ICAF_M es la propuesta por el Departamento Técnico Administrativo del medio Ambiente de Bogotá-DAMA-(ver Tabla 9)

Tabla 9. Norma de Calidad del Aire para Bogotá utilizadas en el Cálculo ICAF_M

Contaminante	Periodo (horas)	Norma	Unidad
Partículas suspendidas PM ₁₀	24	170	µg/m ³
Óxidos de azufre, SO _x	24	141	ppb
Óxidos de nitrógeno, NO _x	1	168	ppb
Monóxido de carbono, CO	1	39	ppm
Oxidante fotoquímico O ₃	1	83	ppb

Fuente: 64

5.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO PRESENTE EN LOS FILTROS DE ESTUDIO

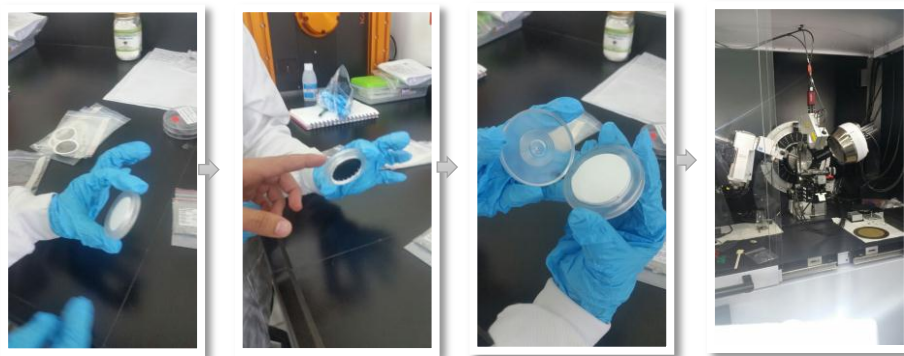
5.3.1 Difracción de Rayos-X de muestras policristalinas

La identificación de las fases cristalinas presentes en los materiales en estudio (filtros) se realizó por DRX de muestras policristalinas, empleando un difractómetro marca BRUKER modelo D8 Advance ubicado en el Laboratorio de Rayos-X PTG de la UIS. Para eso se utilizó el proceso descrito a continuación.

5.3.1.1 Preparación de las muestras

Una de las virtudes de la técnica es la facilidad de preparación de la muestra, en la cual se hace referencia que el proceso es no destructivo, es decir, los filtros se mantienen inalterados durante todo el proceso de preparación, toma de datos y análisis. En la Figura 10 se aprecia el tratamiento de la preparación de la muestra empleando portamuestras de arcillas especiales para este tipo de muestras.

Figura 10. Preparación de la muestra para análisis de difracción de Rayos-X



Fuente: Autoras

5.3.1.2 Toma de datos por DRX

La toma de datos de las muestras se realizó utilizando un difractómetro de polvo BRUKER D8 Advance equipado con un detector lineal LynexEye, filtro de níquel (Ni) en un rango de medición de 2 a 70° en ángulos de 2 theta (2θ) y con una razón de muestreo de 1 s/paso.

5.3.1.3 Determinación de fases cristalinas

El análisis cualitativo (identificación de fases cristalinas) de cada muestra analizada se realizó mediante la comparación de los patrones de difracción obtenidos experimentalmente con la base de datos PDF-2 de patrones de polvo. Esta actividad se llevó a cabo con el programa especializado Crystallographica Search-Match (CSM)⁶⁵.

5.3.2 Fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva

La identificación elemental de metales con interés ambiental tales como plomo, arsénico y bario, entre otros, se realizó mediante la técnica de fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva. El equipo utilizado para este fin es un espectrómetro de fluorescencia de Rayos-X marca Shimadzu, modelo 700XS ubicado en el Laboratorio de fluorescencia de Rayos-X del Centro de Desarrollo Tecnológico y Productivo de Joyería (CDTPJ).

La ventaja de la identificación de metales pesados mediante esta técnica analítica es que no se requiere preparación de la muestra. La toma de datos se realiza directamente sobre el filtro obtenido. La metodología empleada para el análisis se describe a continuación.

5.3.2.2 Preparación de las muestras

El proceso de manipulación de las muestras para análisis por fluorescencia de Rayos-X de muestra en la Figura 11.

Figura 11. Preparación de la muestra para análisis de fluorescencia de Rayos-X



Fuente: Autoras

5.3.2.3 Toma de datos por FRX

La toma de datos del material en estudio se realizó en un espectrómetro de fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva marca Shimadzu modelo EDX-700HS equipado con un detector de estado sólido de Silicio – Litio utilizando como fuente de radiación un tubo de rodio (Rh) y colimador de 5 mm.

5.3.2.4 Identificación elemental del material en estudio

La estimación de la composición elemental de los filtros se realizó con base en el método de Parámetros Fundamentales⁶⁶, utilizando el software DXP-700E Versión 1.00 Rel. 014.

Para caracterizar el material particulado se esperaba identificar como constituyentes de los aerosoles finos y gruesos los metales pesados: hierro (Fe), vanadio (V), cromo (Cr), cobalto (Co), níquel (Ni), manganeso (Mn), cobre (Cu), selenio (Se), bario (Ba), galio (Ga), cesio (Cs), europio (Eu), tungsteno (W) y oro (Au). Donde en la fracción gruesa se deberían encontrar: calcio (Ca), aluminio (Al), titanio (Ti), magnesio (Mg), escandio (Sc), lantano (La) hafnio (Hf) y torio (Th) y en la fracción fina: arsénico (As), cadmio (Cd), galio (Ga), molibdeno (Mo), plomo (Pb), antimonio (Sb), selenio (Se), tungsteno (W) y zinc (Zn)⁶⁷.

5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO SPSS (STATISTICAL PACKAGE FOR THE SOCIAL SCIENCES)

El programa *Statistical Product and Service Solutions* (SPSS) fue aplicado para el manejo, tratamiento de datos estadísticos y posterior análisis del comportamiento de las concentraciones del material particulado durante los periodos analizados. Este programa fue instalado en el laboratorio de Química Atmosférica.

El análisis estadístico de los datos obtenidos en los monitoreos con el sistema SPSS el cual según el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria: “es un software estadístico con grandes propiedades gráficas integradas dentro de un mismo sistema, que facilita tanto el análisis estadístico de los datos, como su ilustración gráfica”. Los procedimientos de este software permiten desarrollar y analizar bases de datos para complementar la investigación y de esta manera realizar proyecciones y análisis de tendencias a largo plazo⁶⁸.

5.5 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN Y VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA LA ZONA

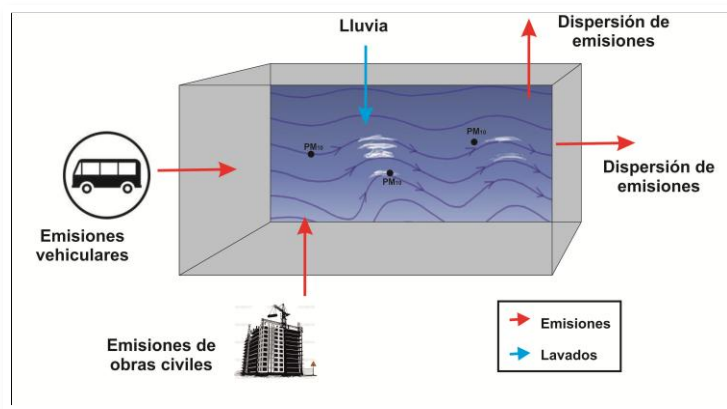
Con el propósito de definir y proponer estrategias tendientes a minimizar la presencia del material particulado -PM₁₀- en el ambiente atmosférico de la zona, es necesario considerar el fenómeno de la contaminación atmosférica urbana como un sistema alterado por las diferentes fuentes de emisión y no como una parcela volumétrica aislada del entorno.

El sistema definido para el caso particular Autopista Floridablanca-Bogotá, sector Universidad Santo Tomás, comprende una parcela volumétrica de 1300 m (largo) X 700m (ancho) X 100 m (altura) como escenario para desarrollar el programa de monitoreo de calidad del aire, su micro-meteorología local y determinar, en consecuencia el nivel de contaminación atmosférica por material particulado PM₁₀.

De lo anterior, se deben establecer entonces las posibles medidas o acciones de control para las fuentes de emisión correspondientes a la zona en consideración. Para nuestro caso específico, las más significativas son: el flujo vehicular pesado por la autopista y vías arterias, las obras civiles en construcción, los edificios y pequeñas actividades industriales.

En la Figura 12 se muestra un cuadro esquemático de la parcela volumétrica tomada como referencia. En ella se indican también los patrones típicos de emisión, cuyo impacto han afectado la calidad del aire en la zona. Así mismo, se representa la acción de los factores que favorecerían tanto la dispersión del contaminante de acuerdo con los vientos, como también la precipitación del material particulado al suelo por lavado dependiendo de la frecuencia de las lluvias.

Figura 12. Emisiones de fuentes hacia la Parcela Volumétrica



Fuente: Autoras

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES TOPOGRÁFICAS y METEOROLÓGICAS

Respecto a las variables topográficas del municipio de Floridablanca, se resalta la cadena montañosa ubicada en el costado oriental del casco urbano de Floridablanca cuya influencia en el clima y las prevalencias de vientos es notoria⁹. La topografía de Floridablanca es plana y se destaca en el área rural el Cerro de la Judía, punto de recarga hídrica de nacimientos de quebradas y el Riofrío⁵¹.

En consideración a lo anterior y con el fin de establecer la procedencia del material particulado y su dispersión en la baja atmósfera de la zona, se elaboró la Rosa de los Vientos para seis meses de observación meteorológica y durante los dos periodos estacionales típicos. La del periodo de invierno, entre el primero de octubre de 2014 al 26 de noviembre del mismo año y la del verano, comprendida entre el 3 diciembre de 2014 y el 26 de marzo de 2015. La información meteorológica de invierno se obtuvo con el equipo marca DAVIS instalado en la estación temporal USTA, cuya operatividad generó un total de 974 datos. Por otro lado, se utilizaron los datos meteorológicos de la estación de Floridablanca propiedad de la CDMB, ubicada en la terraza de Telebucaramanga, con una totalidad de 2736 datos, para el periodo de verano.

Como resultado de la elaboración de las Rosas de los Vientos, en la Figura 13 del plano geográfico de la zona se puede observar que durante el invierno, la dirección prevalente de los vientos corresponde al noreste en un 6%, la cual incide sobre sectores donde funcionan centros educativos tales como la Universidad Santo Tomás, el Colegio Agustiniiano, zonas residenciales cercanas como Quintas de Florida, Centro de Instrucción Bucaramanga sede Inpec, antigua Licorera de Santander hoy en día instalaciones de TRO y en un futuro La Universidad Pública de Floridablanca, entre otros.

Se observan además, fluctuaciones de alta prevalencia hacia el noroccidente en un 4.2% que incide sobre La Universidad Santo Tomás, el SENA y zona urbana del municipio como Portal de Castilla, Torres de Sevilla, entre otros. Estas direcciones tienen velocidades de viento muy bajas (0,5–2,1 m/s) con fuerzas de 1 y 2, catalogados como vientos ligeros según la Escala Beaufort (ver Tabla 3) los cuales apenas se sienten en el rostro, o que imprimen leve movimiento en las hojas de los árboles⁶⁹.

Sin embargo, el aspecto más importante observado en la Rosa de los Vientos del invierno, es la presencia de calmas durante largos períodos de tiempo (73.4%), significativas de ausencia de vientos (0–0.3 m/s escala Beaufort) revelando una condición ambientalmente crítica, puesto que el grado de contaminación atmosférica en estos cortos periodos resulta ser de riesgo para la salud, debido a

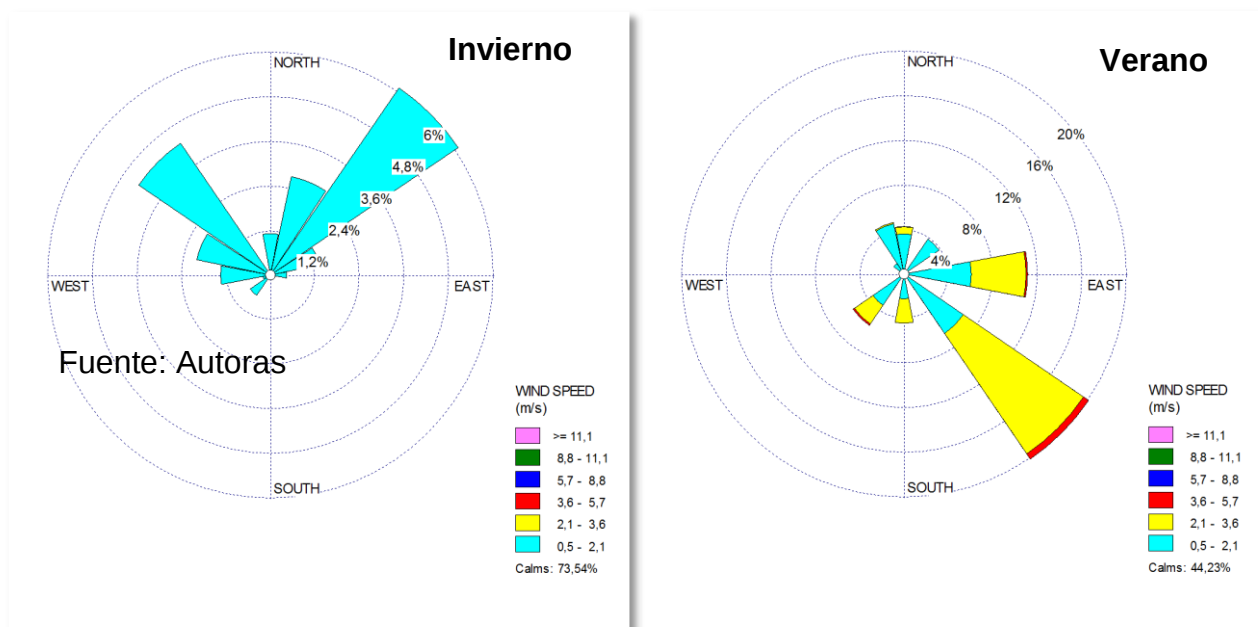
la baja dispersión del material particulado y demás contaminantes atmosféricos presentes en la baja atmósfera.

Similar a lo anterior, los datos que reportan la estación de Floridablanca para el periodo de verano muestran una tendencia predominante de dirección sureste (6 - 20%), siendo el rango de vientos ligeros con velocidades entre 2,1 a 3,6 m/s con fuerza 2 y 3. A estas velocidades la dispersión es lenta incidiendo sobre la calidad del aire de los sectores de Ciudadela Comfenalco, el Colegio Reina de La Paz y el conjunto residencial Torres de Sevilla, entre otros.

Además, muestra pequeñas fluctuaciones con velocidades de 0,5-2,1 m/s con fuerza 1 y 2 al noreste (6%), noroeste (3,5%) y sur oeste ((3%) siendo vientos ligeros. Es importante destacar la presencia de vientos de 3,6 – 5,7 m/s en dirección sur este y sur oeste donde se consideran vientos ligeros y moderados, donde estos últimos levantan polvo y papeles sueltos y las ramas pequeñas se mueven⁶⁹.

Los vientos en calma son reportados con un porcentaje de 44,23%, manifestando una situación ambiental preocupante, pues como se mencionó anteriormente la contaminación atmosférica en estos lapsos resulta ser de peligro para la salud, por la baja dispersión de contaminantes atmosféricos.

Figura 13. Rosa de Los Vientos – periodos invierno 2014 /verano 2014-2015



Fuente: Autoras

6.2 CAMPAÑA DE MONITOREO

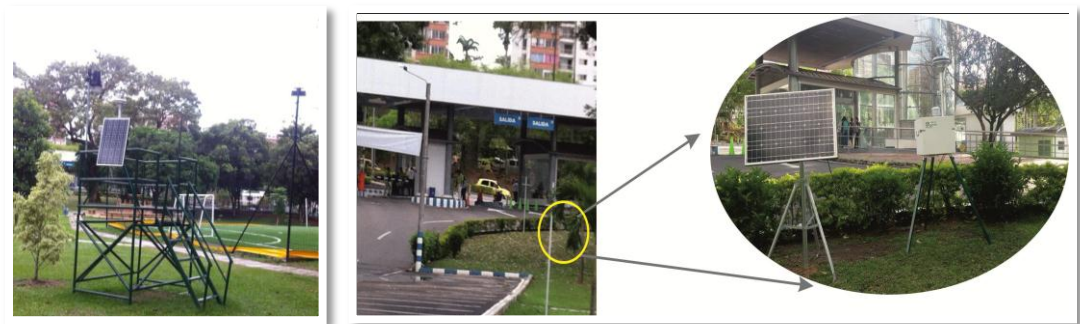
De acuerdo con la campaña de monitoreo realizada por los alrededores de la Autopista Floridablanca-Bogotá, sector de la Universidad Santo Tomás los principales factores que afectan la calidad del aire están relacionados con su crecimiento poblacional, el desarrollo de ciertas actividades económicas tales como la realización de obras civiles, de construcción y académicas. Sin embargo, el de mayor impacto es el aumento del tránsito automotor pesado por las diferentes vías de la zona.

Una calidad del aire deteriorada podría afectar la salud de los grupos poblacionales transitorios o que habitan por sus alrededores de las vías principales, como es el caso de instituciones educativas de las cuales se mencionan El Colegio Agustiniano, el SENA y la Universidad Santo Tomás- sede Floridablanca en donde sus estudiantes permanecen por ocho horas o más en sus respectivos campus, dependiendo de su horario académico.

Los cuatro puntos de la zona en donde se realizaron los respectivos monitoreos tal y como se mencionó en la metodología para realizar la campaña, se indican a continuación:

En la Figura 14, se observan los puntos de monitoreo No.1 y No. 2 ubicados en la Universidad Santo Tomás Km 6 Autopista Floridablanca con los equipos de monitoreo instalados, siendo el punto No. 1 la Cancha Múltiple de la universidad y el punto No. 2 la portería de la institución.

Figura 14. Punto 1 y 2 internos Campus Floridablanca USTA/Cancha Múltiple y Portería



Fuente: Autoras

Así mismo, en la Figura 15 se muestra el punto No. 3 de monitoreo, siendo este el Conjunto Residencial Torres de Sevilla, ubicado en la carrera 27 195-125 en

Floridablanca. En este punto el equipo quedó ubicado en la terraza de la portería del conjunto.

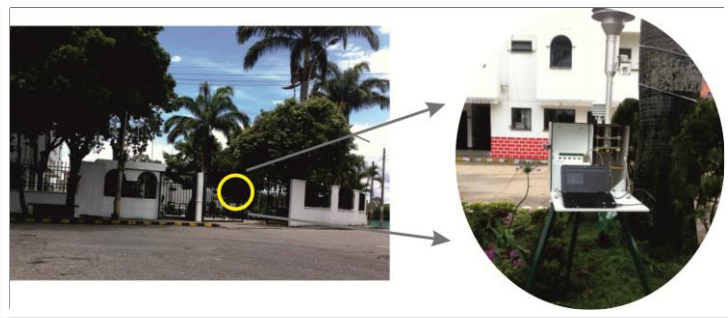
Figura 15. Punto 3 de monitoreo – Conjunto Torres de Sevilla



Fuente Autoras

Finalmente, Al Comando de la Policía de Floridablanca se le asignó el punto No. 4, este lugar queda ubicado en la Calle 200 #26-80 (ver Figura 16). El equipo muestreador se ubicó en la zona del centro de la entrada del comando.

Figura 16. Punto 4 de monitoreo – Comando Policía Floridablanca



Fuente: Autoras

6.2.1 Concentraciones de PM₁₀ obtenidas en filtros.

Para la captación del PM₁₀ se realizó la recolección de datos (filtros) utilizando el equipo muestreador PQ200 por espacio de 24 horas para cada una de las muestras. Algunas de los filtros monitoreados no cumplieron con el tiempo de muestreo continuo (24 horas) establecidas por la deficiente captación de energía solar a través del panel. Por consiguiente, tales muestras fueron consideradas como no válidas para la determinación de concentración y por tanto, no se

incluyeron dentro del análisis, pero se anexan la totalidad de muestras en el Anexos C, D, E y F.

Durante el período de invierno de la campaña se tomaron 14 muestras válidas entre los cuatro puntos y 14 para verano. A continuación en la Tabla 10 se relacionan los resultados válidos obtenidos para estos períodos. Los cálculos para los datos se obtuvieron utilizando las Ecuaciones 1, 2 y 3 ya relacionadas en la metodología.

Tabla 10. Resultados válidos concentración PM₁₀ –invierno (color celeste) y verano (color amarillo) / Valores Máximos Permisibles según Resolución 610/210 y OMS

Nombre Filtro	Δ Peso PM ₁₀ (µg)	Volumen manejado (m ³)	Concentración (µg/ m ³)	Res. 610/2010 Anual VMP* 50 (µg/ m ³)	OMS Annual VMP* 20 (µg/ m ³)
				Cumple	Cumple
CFCM-F1	700,0	21,6360	32,3	SI	NO
CFCM-F2	266,7	21,6180	12,3	SI	SI
CFP-F1	1066,7	21,6360	49,3	SI	NO
CFP-F2	600,0	21,6378	27,7	SI	NO
CFP-F3	433,3	21,6640	20,0	SI	SI
CFP-F4	633,3	21,6703	29,2	SI	NO
CFP-F5	433,3	30,6204	14,1	SI	SI
CTS-F1	500,0	21,6378	23,1	SI	NO
CTS-F2	1066,7	21,5727	49,5	SI	NO
CTS-F4	1033,4	22,3575	46,2	SI	NO
CPF-F3	1400,0	21,6071	64,8	NO	NO
CPF-F4	966,6	21,5763	44,8	SI	NO
CPF-F5	733,3	21,5772	34,0	SI	NO
CPF-F6	1233,4	28,9040	42,7	SI	NO
CFCM-F4	1266,6	21,5801	58,7	NO	NO
CFCM-F5	866,6	21,6044	40,1	SI	NO
CFCM-F6	1100,0	21,6080	50,9	NO	NO
CFP-F6	1266,6	21,5745	58,7	NO	NO
CFP-F7	1566,6	21,6026	72,5	NO	NO
CFP-F8	800,0	21,6080	37,0	SI	NO
CFP-F9	1200,0	21,5133	55,8	NO	NO
CTS-F7	1233,3	21,6451	57,0	NO	NO
CTS-F8	1466,7	21,6378	67,8	NO	NO
CTS-F9	1633,3	21,6378	75,4	NO	NO
CPF-F7	233,4	21,5447	10,8	SI	SI
CPF-F8	633,4	21,5095	29,5	SI	NO
CPF-F9	766,7	21,5727	35,5	SI	NO
CPF-F10	1033,3	21,5763	47,9	SI	NO

*Valor Máximo Permissible

Fuente: Autoras

De las 28 muestras de PM₁₀ analizadas y con referencia a la Tabla 10 arriba indicada, se observa un amplio cumplimiento de la norma de calidad del aire en el período de invierno para la zona de estudio al compararlas con el valor anual máximo permisible de 50 (µg/m³) según la Resolución 610 de 2010 MAVDT. Comportamiento diferente nos muestran los resultados de las mismas concentraciones de PM₁₀, al ser comparadas con los criterios establecidos por la Organización Mundial de la Salud – OMS, cuyo valor anual máximo permisible es de 20 (µg/m³).

Respecto al período de verano, los resultados de las concentraciones de las muestras de PM₁₀ fueron muy diferentes comparadas con las de invierno para la campaña de monitoreo. Efectivamente, se observó un alto porcentaje de no cumplimiento tanto para la norma 610 de 2010 MAVDT como para el estándar de calidad del aire recomendado por OMS.

A continuación se presentan los porcentajes de no cumplimiento de la norma nacional para PM₁₀ durante los respectivos períodos estacionales arriba registrados. En verano, por ejemplo, dicho porcentaje acumuló un 57,1% de no cumplimiento, mientras que en invierno, el grado de cumplimiento fue ambientalmente menos crítico, equivalente a un 7,1% de disconformidad con la norma.

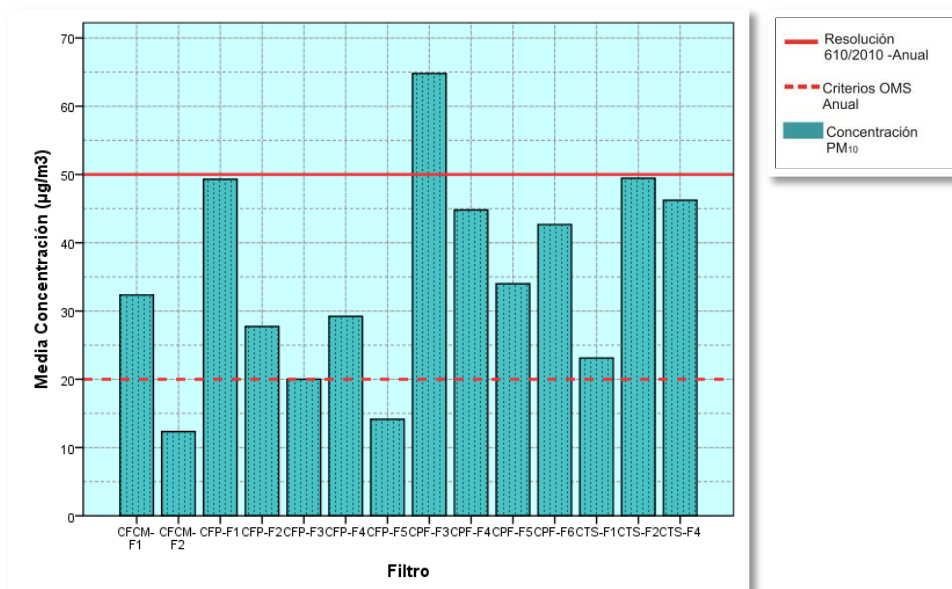
En síntesis, el no cumplimiento de los estándares OMS para PM₁₀ fue altamente significativo para ambos períodos, correspondiendo a un 92,8% para la temporada de verano y un 78,5% para el invierno. Ambos resultados son considerados como críticos y por consiguiente, podrían estar deteriorando la calidad del aire con potenciales riesgos para la población residente o que labora y/o estudia en la zona contemplada dentro del estudio.

Las Figuras 17, 18 y 19 son representaciones gráficas de barras en donde se observan más claramente los resultados de las concentraciones de PM₁₀ de la Tabla 9 y los respectivos valores máximos permisibles para la norma nacional y los criterios OMS.

Los resultados de las concentraciones de PM₁₀ del periodo de invierno año 2014 se grafican en la Figura 17, donde se confirma que dichas concentraciones no exceden mayormente las normas nacionales, aunque los criterios de la OMS son ampliamente sobrepasados.

De igual manera en la Figura 18 se encuentran graficadas las concentraciones de PM₁₀ de verano año 2014-2015 que, contrario a los resultados de invierno, los valores sobrepasan en gran proporción las normas nacionales y los estándares de la OMS.

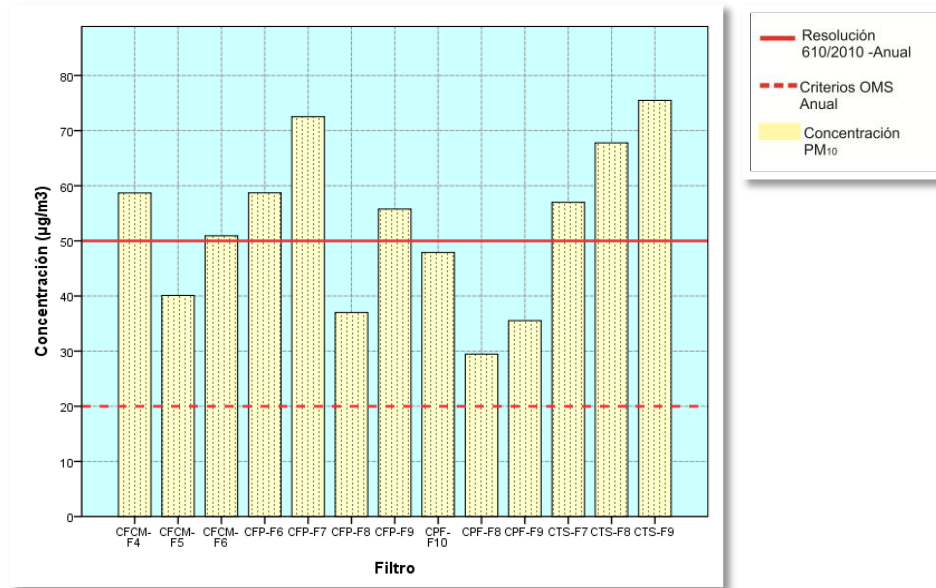
Figura 17. Resultados Válidos Concentración PM₁₀ – invierno año 2014



Fuente: Autoras

Los resultados de las concentraciones de PM₁₀ del periodo de invierno año 2014/2015 se grafican en la Figura 18, donde se confirma que dichas concentraciones no exceden mayormente las normas nacionales, aunque los criterios de la OMS son sobrepasados en gran cantidad.

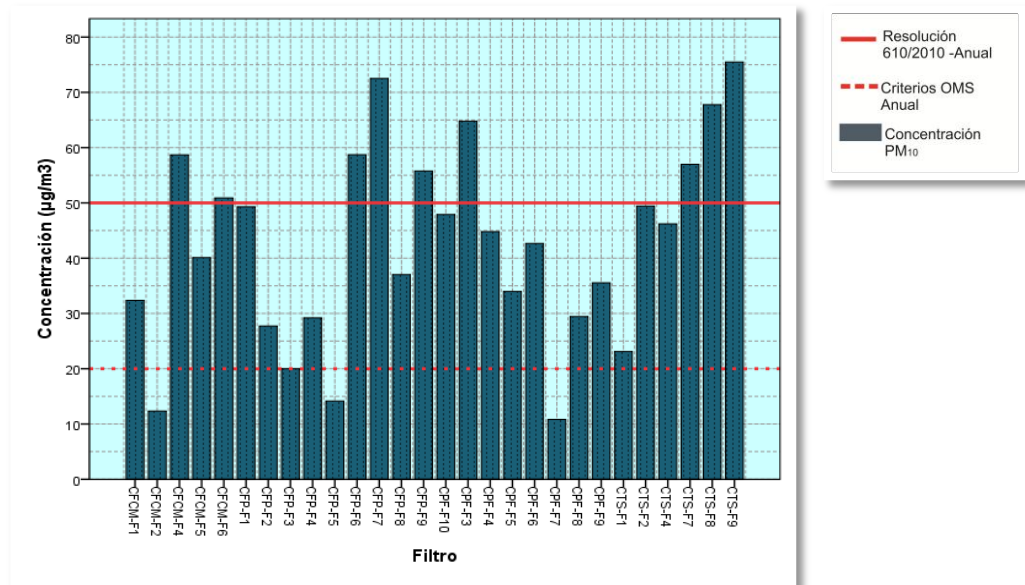
Figura 18. Resultados válidos Concentración PM₁₀ –verano año 2014/2015



Fuente: Autoras

Con el objeto de observar más ampliamente el comportamiento del material particulado PM_{10} durante la campaña de monitoreo, es decir, durante los dos periodos estacionales, se elaboró la Figura 19 que corresponde a la representación gráfica general de las concentraciones con los datos de invierno y verano.

Figura 19. Resultados válidos Concentración PM_{10} –verano e invierno

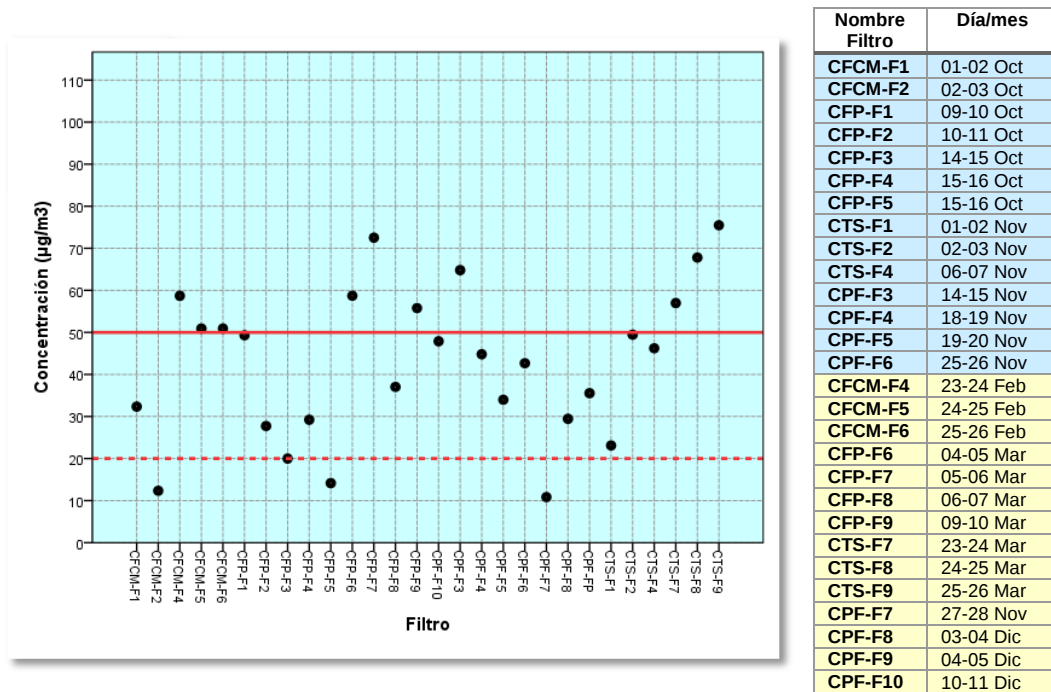


Fuente: Autoras

A continuación en la Figura 20, se presenta un cuadro de dispersión con la totalidad de las muestras monitoreadas del periodo de invierno y verano, dando a entender que las concentraciones de PM_{10} no guardan relación alguna entre ellas, es decir, se encuentran muy dispersas unas a otras, indicando una posible afectación de los factores meteorológicos que dominaron durante el periodo analizado, además, se percibe que el comportamiento se debe al tráfico automotor que transita por la zona estudiada.

Para mayor claridad se anexó junto a la Figura 20, un cuadro con los nombres de los filtros analizados durante los periodos estacionales descritos. El sombreado celeste corresponde al periodo de invierno y el amarillo al verano. Así mismo, para cada una de las muestras se presenta la fecha del monitoreo correspondiente.

Figura 20. Registros válidos obtenidos de PM₁₀ de las cuatro estaciones monitoreadas – invierno/verano 2014-2015



FUENTE: Autoras

6.2.2 Índice de la Calidad del Aire

El Índice de la Calidad del Aire para Floridablanca –ICAF_M– establece el grado de afectación en la calidad del aire para la zona estudiada, tomando como base las concentraciones de PM₁₀ registradas durante los dos periodos estacionales de monitoreo (invierno/verano) evaluados para los cuatro puntos o sitios seleccionados (ver Figura 21).

Cabe anotar que tales concentraciones también fueron comparadas con la norma nacional, estableciéndose en qué condiciones de calidad se encuentra el ambiente respirable de dicha zona para cada periodo en donde el índice es representativo.

En la Figura 21 se puede observar que, de los dos periodos estacionales monitoreados el índice ICAF_M para los meses de verano evaluados, es el más alto comparado con el periodo de invierno. En efecto, el índice registrado para el mes de marzo y febrero de 2015 alcanza la categoría de “regular” al compararlo con la escala correspondiente al Índice IBUCA (ver Tabla 4). Tal categoría es un indicativo de la presencia de molestias en personas con afecciones respiratorias tales como infecciones respiratorias agudas –IRA– o enfermedades pulmonares

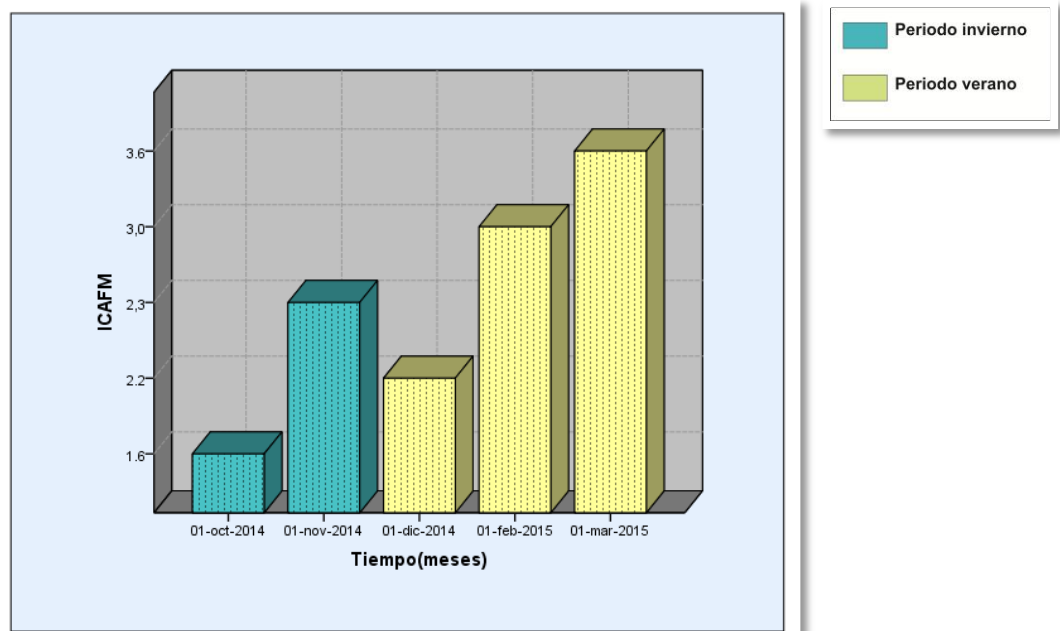
obstructivas crónicas –EPOC- y alteraciones cardiovasculares crónicas. Es indicativo además, de la aparición de ligeras molestias en población sana.

En menor proporción para el mes de diciembre de 2014 los valores reportados revelan niveles “moderados”, significando de esta forma que la calidad del aire no tiene efecto sobre la población en general, es decir, se considera aceptable.

La clasificación de los efectos en Salud Pública se basa en la gama de colores establecida por La Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (ver Tabla 4).

En cuanto al periodo de invierno, los niveles reportados del ICAF_M correspondiente a los meses de octubre y noviembre de 2014 no tienen efecto sobre la población en general, es decir, se considera un nivel “moderado”.

Figura 21. Índice de la calidad del aire



Fuente: Autoras

En síntesis, es importante reconocer que aunque las concentraciones de PM₁₀ en el área de estudio no superen el índice o la norma nacional, no se tienen estudios concluyentes sobre la calidad del aire que se respira, dado que solamente se ha analizado el material particulado y como es bien conocido, en el ambiente respirable de la baja atmósfera se encuentran otras sustancias en forma de gas o

de micro-partículas tales como los óxidos de nitrógeno y de azufre, ozono, o compuestos orgánicos volátiles o hidrocarburos poli-aromáticos, denominadas especies traza, cuya influencia en el aire que se está respirando podría generar perjuicios para la salud.

6.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO PRESENTE EN LOS FILTROS DE ESTUDIO

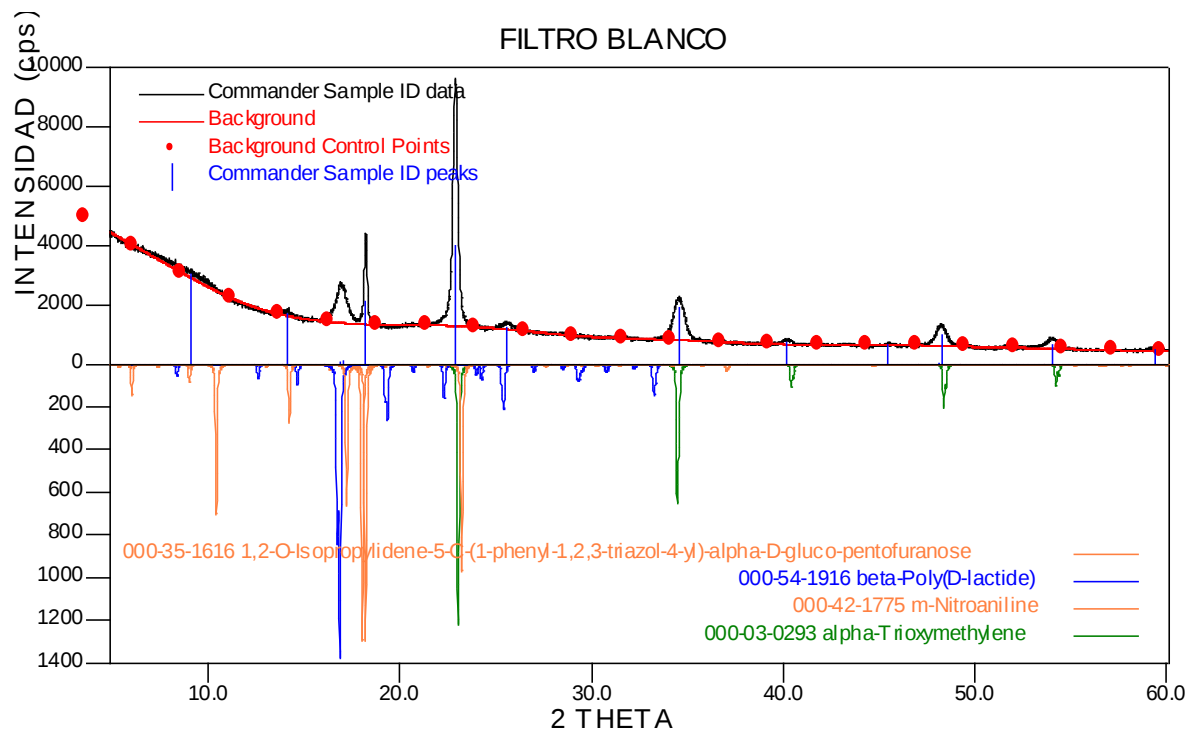
6.3.1 Difracción de Rayos-X de muestras policristalinas

Recolectadas cada una de las muestras de material particulado, se llevaron al Laboratorio de Rayos-X PTG de la UIS con el fin de identificar las fases cristalinas presentes en cada uno de los filtros mediante la difracción de Rayos-X de muestras policristalinas. Para este fin, inicialmente se realizó la toma de datos de un filtro sin muestra (blanco de medida) con el fin de compararlo con los filtros expuestos en el estudio.

La identificación de las fases cristalinas realizada con el programa especializado Crystallographic Search-Match para el filtro blanco se aprecia en la Figura 22. Se obtuvo que principalmente está compuesto por las fases cristalinas de 000-35-1616 1,2-O-isopropileno-5-C-(1-fenil-1, 2, 3-triazol-4-yl)-alfa-D-glucopentofurano, 000-54-1916 beta Poli (D-lactido), 000-42-1775 m-Nitroanilina, 000-03-0293 alfa-Trioximetileno.

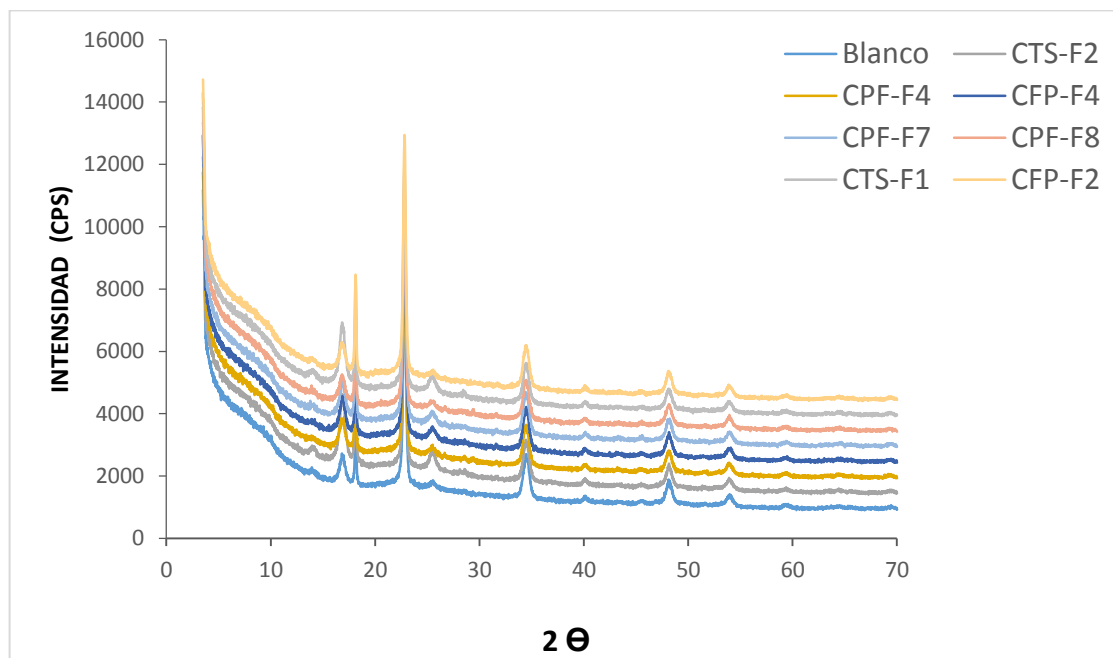
Los filtros expuestos en el proceso de monitoreo de calidad del aire, presentan los mismos componentes que el filtro blanco. La superposición de los perfiles de difracción del blanco con los filtros expuestos (ver Figura 23) mostró que no se aprecian diferencias considerables entre los componentes presentes en la muestra y en el blanco. Esto se debe principalmente a que la presencia de los metales presentes en la muestra está en concentraciones por debajo del límite de detección del difractómetro. Por esta razón se procedió a identificar los metales presentes por la técnica de FRX de energía dispersiva.

Figura 22. Espectro DRX /Identificación de fases cristalinas del filtro blanco



Fuente: Autoras

Figura 23. Superposición perfiles por DRX



Fuente: Autoras

6.3.2 Fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva

Para la estimación del análisis elemental de cada uno de los filtros, especialmente el contenido de metales pesados, se empleó la técnica de FRX, técnica especializada en identificar elementos en concentraciones desde porcentaje en peso hasta ppm, e incluso en ciertos casos ppb.

Se analizó un filtro no expuesto (blanco) y dos muestras por cada punto monitoreado para cada estación, es decir, 8 muestras de estación invierno y 8 muestras estación verano, donde los perfiles de algunos filtros se observan en el Anexo G.

En el filtro blanco, se observó la presencia de trazas de metales con afectación ambiental y/o humana confirmada. Los resultados estimados de su concentración se registran en la Tabla 11 mostrada a continuación.

Tabla 11. Registros Filtro Blanco

Oxido	%	Elemento	% Elemento
SiO ₂	65,947	Si	30.8
Al ₂ O ₃	15,882	Al	8.4
CaO	10,811	Ca	7.7
MgO	4,142	Mg	2.5
K ₂ O	1,468	K	1.2
TiO ₂	1,009	Ti	0.6
ZnO	0,541	Zn	0.4
Fe ₂ O ₃	0,100	Fe	0.1
SO ₃	0,093	S	0.03
SrO	0,007	Sr	0.006

Fuente: Autoras

Los resultados emitidos por la técnica de FRX se presentan en forma de óxidos, debido a que el equipo identifica elementos en su máximo estado de oxidación, por tal razón, para determinar la cantidad de compuestos de interés ambiental hallados en el aire, alrededores de la autopista Floridablanca-Bogotá, se debe acudir a un cálculo del Factor Estequiométrico para estimar su concentración elemental (ver ecuación 5). La conversión elemental del óxido se aprecia en la Ecuación 6 mostrada a continuación:

$$\text{Factor Estequiométrico} = \frac{\text{Peso Molecular compuesto}}{\text{Peso molecular elemento}} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\% \text{ elemento} = \frac{\% \text{ concentración experimental}}{\text{Factor estequiométrico}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Con el Factor Estequiométrico se estimaron las concentraciones de cada uno de los metales, Para tal fin, se debe hacer énfasis en que los datos obtenidos en el análisis elemental tienen relación porcentual peso/peso. Por tal motivo, para la conversión de unidades que maneja la Resolución 610/2010 y las normas de la OMS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) se tomó como base de cálculo el valor de 100 μg . El volumen utilizado para el cálculo de concentración se adquirió según datos obtenidos con el muestreador PQ200 para cada una de las muestras, aplicando el cálculo de corrección de volumen. Los resultados de esta estimación se registran en las Tablas 12 y 13 mostradas a continuación.

Tabla 12. Registros Datos Fluorescencia – Filtros de invierno

Filtro	Compuestos de interés							
	Óxido	%	Elemento	%	Δ Peso PM ₁₀ (μg)	Peso muestra (μg)	Vol (m^3)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
CFCM F1	BaO	0,621	Ba	0,6	700	395,15	21,6360	18,3
	PbO	0,383	Pb	0,3		243,67		11,3
	CuO	0,272	Cu	0,2		146,44		6,8
	MnO	0,010	Mn	0,01		5,39		0,2
	Cr ₂ O ₃	0,004	Cr	0,002		1,89		0,9
CFCM F2	BaO	3,982	Ba	3,6	266,7	951,44	21,6180	44,0
	PbO	0,546	Pb	0,5		135,23		6,3
	CuO	0,288	Cu	0,2		61,38		2,8
	MnO	0,005	Mn	0,003		1,04		0,04
CFP F2	BaO	5,148	Ba	4,6	600	2766,48	21,6378	127,9
	PbO	0,039	Pb	0,04		21,72		1,0
	As ₂ O ₃	0,006	As ₂	0,004		2,70		0,1
	MnO	0,006	Mn	0,005		2,76		0,1
	CuO	0,006	Cu	0,005		2,88		0,1
	ZrO ₂	0,004	Zr	0,003		1,80		0,1
	Co ₂ O ₃	0,002	Co	0,001		0,84		0,04
CPF F4	BaO	4,876	Ba	4,4	633,3	2765,7	21,6703	127,6
	PbO	0,096	Pb	0,1		56,427		2,6
	As ₂ O ₃	0,016	As	0,01		7,663		0,4
	MnO	0,006	Mn	0,005		2,9132		0,1
	CuO	0,005	Cu	0,004		2,5332		0,1
	ZrO ₂	0,004	Zr	0,003		1,8999		0,1
	Co ₂ O ₃	0,002	Co	0,0014		0,8866		0,04

Tabla 12. (Continuación)

Filtro	Compuestos de interés							
	Óxido	%	Elemento	%	Δ Peso PM ₁₀ (μg)	Peso muestra (μg)	Vol (m ³)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
CTS F1	BaO	4,804	Ba	4,3	500	2151,4	21,6378	99,4
	MnO	0,013	MnO	0,01		5,0500		0,2
	CuO	0,004	Cuo	0,003		1,6000		0,1
	PbO	0,002	PbO	0,002		0,9500		0,04
	Co ₂ O ₃	0,001	Co	0,0007		0,3500		0,02
CTS F2	BaO	0,827	Ba	0,7	1066,7	790,10	21,5727	36,6
	PbO	0,514	Pb	0,5		509,03		23,6
	CuO	0,301	Cu	0,2		256,54		11,9
	MnO	0,010	Mn	0,008		8,21		0,4
CPF F4	BaO	4,854	Ba	4,3	966,6	4202,29	21,5763	194,8
	PbO	0,060	Pb	0,06		53,84		2,5
	As ₂ O ₃	0,023	As	0,02		16,82		0,8
	CuO	0,005	Cu	0,004		3,87		0,2
	MnO	0,005	Mn	0,004		3,77		0,2
	ZrO ₂	0,004	Zr	0,003		2,90		0,1
	Co ₂ O ₃	0,003	Co ₂	0,002		2,03		0,1
CPF F5	BaO	5,231	Ba	4,7	733,3	3435,58	21,5772	159,2
	PbO	0,050	Pb	0,05		34,03		1,6
	MnO	0,043	Mn	0,03		24,42		1,1
	I ₂ O ₃	0,019	I	0,02		11,73		0,5
	As ₂ O ₃	0,017	As	0,01		9,46		0,4
	ZrO ₂	0,009	Zr	0,007		4,91		0,2
	CuO	0,005	Cu	0,004		2,93		0,1
	Co ₂ O ₃	0,002	Co	0,001		1,03		0,02

Fuente: Autoras

Tabla 13. Registros Datos Fluorescencia – verano

Filtro	Compuestos de interés							
	Óxido	%	Elemento	%	Δ Peso PM ₁₀ (μ g)	Peso muestra(μ g)	Volumen (m ³)	Concentración (μ g/m ³)
CFCM F5	BaO	5,0740	Ba	4,5	866,6	3938,26	21,6044	182,3
	V ₂ O ₅	0,29	V	0,2		140,82		6,5
	PbO	0,057	Pb	0,05		45,84		2,1
	As ₂ O ₃	0,013	As	0,01		8,49		0,4
	ZrO ₂	0,004	Zr	0,003		2,60		0,1
CFCM F6	BaO	4,303	Ba	3,9	1100	4239,40	21,6080	196,2
	PbO	0,075	Pb	0,07		76,56		3,5
	As ₂ O ₃	0,022	As	0,02		18,37		0,9
	MnO	0,010	Mn	0,008		8,47		0,4
	CuO	0,005	Cu	0,004		4,40		0,2
CFP F7	BaO	5,159	Ba	4,6	1566,6	7238,79	21,6026	335,1
	PbO	0,033	Pb	0,03		47,94		2,2
	As ₂ O ₃	0,011	As ₂	0,008		13,00		0,6
	ZrO ₂	0,005	Zr	0,004		5,80		0,3
CFP F8	BaO	4,949	Ba	4,4	800	3546,08	21,6080	164,1
	PbO	0,007	Pb	0,007		5,20		0,2
	As ₂ O ₃	0,003	As	0,002		1,84		0,1
CTS F7	BaO	4,799	Ba	4,3	1233,3	5300,97	21,6451	244,9
	PbO	0,090	Pb	0,08		103,10		4,8
	As ₂ O ₃	0,020	As	0,02		18,62		0,9
	CuO	0,008	Cu	0,006		7,89		0,4
	ZrO ₂	0,004	Zr	0,003		3,70		0,2
CTS F8	BaO	4,999	Ba	4,5	1466,7	6567,00	21,6378	303,5
	PbO	0,010	Pb	0,009		13,64		0,6
	As ₂ O ₃	0,004	As	0,003		4,40		0,2
	ZrO ₂	0,004	Zr	0,003		4,40		0,2
CPF F7	BaO	4,782	Ba	4,2830	233,4	999,7	21,5447	46,4
	PbO	0,440	Pb	0,4000		93,4		4,3
	CuO	0,189	Cu	0,1510		35,2		1,6
	MnO	0,070	Mn	0,0542		12,7		0,6

Tabla 13. (Continuación)

Filtro	Compuestos de interés							
	Óxido	%	Elemento	%	Δ Peso PM ₁₀ (μg)	Peso muestra(μg)	Volumen (m ³)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
CPF F8	BaO	4,198	Ba	3,8	633,4	2381,52	21,5095	110,7
	PbO	0,397	Pb	0,4		233,47		10,9
	CuO	0,179	Cu	0,1		90,58		4,2
	MnO	0,010	Mn	0,008		4,88		0,2

Fuente: Autoras

6.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DE LA ZONA EN ESTUDIO

Una vez considerados los valores estimados de concentración de metales presentes en el material particulado –PM₁₀–se prosiguió a compararlos con la normatividad vigente. Cabe resaltar, que en Colombia aún no existen normas que regulen los valores máximos permisibles para un gran número de metales pesados, entre los cuales se encuentra el bario, cobre, cobalto, entre otros. El plomo, el arsénico, el manganeso registran valores normativos nacionales y el vanadio se comparó con valores guía estipulados por la OMS (Ver Tabla 13).

Se registran de las 14 muestras con concentraciones de metales analizadas el no cumplimiento de la mayoría de las concentraciones de metales (plomo) de la norma nacional para el periodo de invierno al ser comparadas con el valor anual máximo permisible de 0,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) acorde con la resolución 610/2010 MAVDT. De forma algo similar, para este mismo periodo, se muestran los resultados de las concentraciones de metales (arsénico y manganeso) al ser comparados con los valores guía estipulados por la OMS. Con relación al periodo de verano, los resultados de las concentraciones de metales fueron similares al periodo de invierno, observándose un porcentaje alto de no cumplimiento según la norma nacional y los estándares recomendados por la OMS (ver Tabla 14).

Tabla 14. Cumplimiento de la normatividad – invierno (color celeste) y verano (color amarillo)

Filtro	Elementos de interés							
	Elem.	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Res. 610/2010 24h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cumple	Res. 610/2010 Anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cumple	OMS	Cumple
CFCM F1	Pb	11,3	-	-	0,5	NO	-	-
	Mn	0,2	-	-	-	-	0,15	NO
CFCM F2	Pb	6,3	-	-	0,5	NO	-	-
	Mn	0,04	-	-	-	-	0,15	SI
CFP F2	Pb	1,00	-	-	0,5	NO	-	-
	As ₂	0,1	-	-	-	-	0,0015	NO
	Mn	0,1	-	-	-	-	0,15	SI
CFP F4	Pb	2,6	-	-	0,5	NO	-	-
	As ₂	0,4	-	-	-	-	0,0015	NO
	Mn	0,1	-	-	-	-	0,15	SI
CTS F1	Mn	0,2	-	-	-	-	0,15	NO
	Pb	0,04	-	-	0,5	SI	-	-
CTS F2	Pb	23,6	-	-	0,5	NO	-	-
	Mn	0,4	-	-	-	-	0,15	NO
CPF F4	Pb	2,5	-	-	0,5	NO	-	-
	As ₂	0,8	-	-	-	-	0,0015	NO
	Mn	0,2	-	-	-	-	0,15	NO
CPF F5	Pb	1,6	-	-	0,5	NO	-	-
	Mn	1,1	-	-	-	-	0,15	NO
	As ₂	0,4	-	-	-	-	0,0015	NO
CFCM F5	V ₂	6,5	1	NO	-	-	-	-
	Pb	2,1	-	-	0,5	NO	-	-
	As ₂	0,4	-	-	-	-	0,0015	NO
CFCM F6	Pb	3,5	-	-	0,5	NO	-	-
	As ₂	0,9	-	-	-	-	0,0015	NO
	Mn	0,4	-	-	-	-	0,15	NO
CFP F7	Pb	2,2	-	-	0,5	NO	-	-
	As ₂	0,6	-	-	-	-	0,0015	NO
CFP F8	Pb	0,2	-	-	0,5	SI	-	-
	As ₂	0,1	-	-	-	-	0,0015	NO
CTS F7	Pb	4,8	-	-	0,5	NO	-	-
	As ₂	0,9	-	-	-	-	0,0015	NO
CTS F8	Pb	0,6	-	-	0,5	NO	-	-
	As ₂	0,2	-	-	-	-	0,0015	NO
CPF F7	Pb	4,3	-	-	0,5	NO	-	-
	Mn	0,6	-	-	-	-	0,15	NO
CPF F8	Pb	10,9	-	-	0,5	NO	-	-
	Mn	0,2	-	-	-	-	0,15	NO

Fuente: Autoras

En el periodo de invierno el cumplimiento de la norma anual colombiana para la concentración del plomo, confirma el no cumplimiento en un 87,5% y de igual forma para el periodo de verano con 87,5% (ver Tabla 13). Este metal resulta ser un agente tóxico que deteriora el medio ambiente exponiendo a la población a graves efectos a la salud, entre ellos: posibles efectos tóxicos en el sistema nervioso central y periférico, en la sangre, en el sistema cardiovascular, endocrino e inmunológico, el tracto gastrointestinal y el sistema reproductor. Además, causa efectos leves en el desarrollo mental de bebés y niños y aumenta la presión arterial, considerándose carcinogénico en humanos. Los compuestos de plomo se absorben a través de la piel y por inhalación causando encefalopatía aguda⁷⁰.

De la misma manera, las concentraciones de las muestras de arsénico para el periodo de invierno presentaron inconformidad con los valores guía estipulados por la OMS en un 100% y 100% para verano. El arsénico inorgánico después de ser inhalado produce alto grado de absorción, distribuyéndose en el cuerpo, ya que después de ser inhalado es depositado y retenido en el tejido pulmonar durante periodos largos y las exposiciones a la piel producen dermatosis desarrollando cáncer de piel y la enfermedad de Bowen. Además, exposiciones crónicas a este metal produce afectaciones nerviosas, alteraciones vasculares periféricas en el sistema circulatorio con gangrena en las extremidades, cardiopatía isquémica, infarto cerebral y disfunción eréctil. La anemia y la leucopenia son cambios hematológicos que se presentan por la exposición a este metal⁷¹.

Por otro lado, el manganeso hallado en algunas muestras de PM₁₀ registró un porcentaje de no cumplimiento con los estándares de la OMS de 62,5% para el periodo de invierno y 100% para verano. La exposición ambiental al manganeso afecta principalmente el sistema nervioso central donde los efectos tóxicos recaen en el deterioro motor y la función cognitiva. Al inhalar este metal por largos periodos de tiempo en ambiente laboral produce un trastorno neurológico conocido como manganismo, caracterizado por cambios de humor y un síndrome parecido a la enfermedad de parkinson. Por el contrario, la exposición a dosis bajas puede producir efectos en el sistema reproductivo, respiratorio, cardiovascular, hematológico, endocrinos, entre otros⁷².

En el periodo de verano se registró la presencia de vanadio en una de las muestras monitoreadas y según la resolución 610/2010 que estipula un valor máximo permisible para este metal (1 µg/m³) determina el no cumplimiento de la norma colombiana para esta muestra. Los compuestos de vanadio al ser inhalados se distribuyen por todo el cuerpo y se concentra en el pulmón. Estudios en animales, comprueban fijaciones de altas concentraciones en huesos, riñones e hígado y bajas concentraciones se fijan en la placenta, cerebro y testículos. Los efectos que se observan mayormente apuntan al hígado, riñón, sistema nervioso y cardiovascular. Dentro de los efectos metabólicos se nombran la depresión y la estimulación de la síntesis de fosfolípidos y a mayores concentraciones la

inhibición de la oxidación de la serotonina. La exposición prolongada en lugares de trabajo produce tos prolongada, mucosidad excesiva, broncoespasmo y diarrea, irritación ocular y conjuntivitis. La Agencia Internacional para la Investigación sobre el cáncer lo ha catalogado como un posible carcinógeno⁷³.

Además del plomo, arsénico, manganeso y vanadio mencionados anteriormente y encontrados en muestras de PM₁₀, se obtuvieron concentraciones de otros metales que no registran valores máximos permisibles para guía según una norma, pero que perjudican la salud pública. Entre ellos se encuentran el bario, que registró para todas las muestras un valor alto de concentración. La exposición aguda o crónica de bario ha dado como resultado en animales de experimentación una serie de trastornos, incluyendo intoxicación renal, hipertensión, mal funcionamiento cardíaco, y la pérdida de audición. La inhalación del bario provoca una neumoconiosis benigna (baritosis), con manifestaciones radiográficas conspicuas pero sin deterioro de la función pulmonar⁷⁴.

Con menores valores se registraron concentraciones de cobalto, cobre, itrio, cromo y zirconio, donde la exposición a concentraciones de cobalto pueden causar enfermedades agudas y crónicas respiratorias, como la congestión, sibilancias, asma, neumonía y fibrosis, además, alergias, enfermedades cardíacas y congestión del hígado y los riñones⁷⁵. Así mismo, concentraciones de cobre pueden ser tóxicas si se inhala o se ingiere en grandes cantidades produciendo sequedad e irritación de la garganta, opresión en el pecho y tos, fiebre, malestar general, dolor de cabeza, dolores musculares, náuseas y vómitos⁷⁶. Por otro lado, el itrio que resulta ser peligroso en el ambiente de trabajo, aumenta las posibilidades de cáncer de pulmón cuando es inhalado; además puede ser una amenaza para el hígado cuando se acumula en el cuerpo humano⁷⁷. El cromo, que existe en forma de cobre (III) y cobre (VI)⁷⁸, donde la absorción en la forma hexavalente es más rápido que en Cr (III). La exposición por inhalación a largo plazo de estos compuestos de Cr (VI) produce alto riesgo de carcinomas de los órganos respiratorios, resultando ser uno de los carcinógenos humanos más potentes⁷⁹. Finalmente, el zirconio produce elevados riesgos de cáncer a futuro, pues no existen estudios que constaten su incidencia en el cáncer.

6.5 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN

A continuación se presentan algunas estrategias orientadas hacia el control y la vigilancia de la contaminación atmosférica para las fuentes móviles y las instituciones de gestión, las cuales podrían estructurarse según el sector en donde se apliquen. De acuerdo con sugerencias de OMS estos podrían ser: Sector Institucional, Sector transporte y el Sector educativo.

A pesar del impulso que durante las dos últimas décadas la CDMB como Ente regional encargado de la gestión ambiental ha venido dándole, esta se ha visto afectada por limitaciones de recursos presupuestales para la compra de equipos y por la falta de expertos sobre el tema, particularmente en lo referente a la gestión de la contaminación atmosférica. En consecuencia, esta estrategia de fortalecimiento institucional deberá centrarse en la vigilancia y el control de las emisiones de fuentes móviles por la autopista Bucaramanga – Bogotá a la altura del municipio de Floridablanca y, de otro lado, mejorar la capacidad de las autoridades ambientales para optimizar los procesos de diseño, montaje y operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire y Ruido para la zona, en concordancia con la normativa nacional.

En este orden de ideas, conocer el nivel de contaminación atmosférica de la zona en estudio mediante el diseño de un sistema de monitoreo y vigilancia, será un paso importante que permitirá evaluar tendencias, comportamientos y tomar decisiones y acciones de control.

Otra estrategia efectiva a aplicar en el sector automotor sería mejorar el servicio de transporte público, ya sea modernizándolo paulatinamente o controlar su crecimiento desmedido. Un buen ejemplo de lo que actualmente se realiza en el Área Metropolitana de Bucaramanga –AMB- es el desarrollo del transporte masivo *Metrolínea* conjuntamente con el mejoramiento de vías a fin de facilitar la movilidad vehicular. Se propone entonces ampliar la cobertura del mismo y continuar con los programas de mejoramiento vial en el sector, entrada y salida de Floridablanca.

La anterior estrategia deberá complementarse con el cambio progresivo del combustible y la aplicación de nuevas tecnologías de optimización de la combustión en el motor de los vehículos. Se debe ofrecer para la región un combustible más limpio con menor contenido de azufre y de metales pesados como el vanadio, hierro y cromo, al igual que el uso de combustibles limpios como el gas natural vehicular –GNV- donde pueda ser aplicado.

Las fuentes móviles deben trabajarse en paralelo con la integración de varios modos de transporte enfatizando en aquellos que generen menos contaminación, por ejemplo: las bicicletas y ciclo-rutas⁸⁰.

7. CONCLUSIONES

Se realizó la campaña de monitoreo para material particulado –PM₁₀– avaladas por la EPA y la OMS para los periodos estacionales de invierno y verano en el sector de la autopista de Floridablanca-Bogotá, esto con el fin de determinar posibles factores que afecten la salud de la población.

A partir de la campaña de monitoreo realizada, se determinaron las variables topográficas y meteorológicas que influyen en la dispersión del PM₁₀ para el sector de la autopista Floridablanca-Bogotá.

La obtención de las Rosas de los Vientos para los dos periodos estacionales mostró que la dispersión de los contaminantes se desplazaba principalmente en dirección noreste (invierno) y sureste (verano) afectando la población residente en algunas instituciones educativas y zonas residenciales del área.

Respecto a la calidad del aire en la zona estudiada, se encontró que un 57.1% de las 28 muestras evaluadas no cumple con la norma anual para material particulado PM₁₀ durante el período de verano; mucho menos con los estándares recomendados por la OMS por ser estos más estrictos, dado que durante este mismo período y con base en la misma cantidad de muestras evaluadas (28), su porcentaje de no cumplimiento se incrementó a 92.8% reflejando en consecuencia, muy regular calidad del aire en la zona estudiada.

Por otra parte, para el periodo de invierno el grado de no cumplimiento según criterios de la OMS para las 28 muestras evaluadas, registró un 78,5%. Resultados diferentes fueron encontrados al compararlas con la norma anual nacional, mostrando un alto porcentaje de cumplimiento equivalente al 92.9%. Es de aclarar que las lluvias ejercen un poder lavador de la baja atmósfera, lo cual pudo influir en la calidad del aire de esta temporada.

Con los resultados obtenidos durante la campaña de monitoreo en cuatro sitios seleccionados cercanos a la autopista Floridablanca-Bogotá se logró realizar un seguimiento de la calidad del aire para esta zona, donde se evidencia la necesidad de fortalecimiento de la campaña y el compromiso por parte de entidades que establezcan programas que permitan disminuir el impacto ambiental de las emisiones de contaminantes al ambiente respirable.

De acuerdo con los datos reportados por el Índice de Calidad del Aire ICAF_M se verificó con los intervalos del IBUCA el nivel de contaminación de la población en estudio, para el periodo de verano los meses de marzo y febrero de 2015 reportan un nivel regular causando pequeñas molestias a personas sanas y con afecciones respiratorias como el IRA y el EPOC y alteraciones cardiovasculares crónicas. Para el mes de diciembre de 2014 el nivel resultó ser moderado, significando que

no tiene efecto sobre la población en general. Por otra parte, el nivel de calidad del aire se calificó como aceptable para los dos meses del periodo de invierno (octubre y noviembre de 2014) donde su nivel se consideró moderado.

El desarrollo de la campaña de monitoreo de la calidad del aire realizada para la zona de la autopista Floridablanca-Bogotá permitió identificar las fuentes que ocasionan la emisión de contaminantes como el material particulado –PM₁₀–, resultando ser el tráfico vehicular pesado el que mayormente aporta a esta deterioro ambiental.

La presencia de metales pesados presentes en el material particulado –PM₁₀– por medio de la técnica de difracción de Rayos-X no se logró efectuar debido a similitud de los resultados frente al blanco tomado como referencia (no expuesto) en su composición química.

Debido a los altos costos de las muestras y a las limitaciones de turno en laboratorio, se tomaron 16 muestras que fueron analizadas por medio de la técnica de fluorescencia de Rayos-X. En estas se determinó la presencia de metales pesados presentes en el material particulado monitoreado para los elementos de bario y plomo.

Se comparó la concentración de metales pesados (plomo, arsénico, manganeso y vanadio) presentes en el material particulado según la técnica de fluorescencia de Rayos-X con la resolución 610 de 2010 y con criterios de la OMS, donde se resalta la no existencia de normas para un amplio número de metales.

Se verificó el cumplimiento de la norma anual colombiana con la concentración de plomo encontrada en las muestras analizadas, resultando así que para los dos periodos estacionales reflejaron un no cumplimiento en un 87,5%. Resultado preocupante ya que el plomo resulta ser un agente que deteriora la salud de la población, produciendo efectos tóxicos en los sistemas nervioso, cardiovascular, endocrino, inmunológico, reproductor, entre otros.

El no cumplimiento de los valores guía estipulados por la OMS para el arsénico fue de un 100% para los periodo de invierno y verano, causando afectaciones nerviosas, alteraciones vasculares periféricas en el sistema circulatorio, cardiopatía isquémica, infarto cerebral, entre otros.

El manganeso mostró el no cumplimiento para los estándares de la OMS donde el porcentaje para el periodo de verano fue del 100% y para invierno de 62,5%, produciendo de esta forma manganismo que es un trastorno neurológico y en pequeñas concentraciones causa problemas en el sistema reproductivo, respiratorio, cardiovascular, entre otros.

Se verificó el no cumplimiento de la norma colombiana para el periodo de verano de la única muestra que presentó concentraciones de vanadio, donde esas cantidad se concentran en el pulmón y produce efectos metabólicos como la

depresión y la estimulación de la síntesis de fosfolípidos y a mayores concentraciones la inhibición de la oxidación de la serotonina. Además se ha catalogado como un posible carcinógeno.

8. RECOMENDACIONES

En concordancia con la normatividad colombiana de calidad del aire referente a material particulado y debido a las altas concentraciones de PM_{10} que fueron encontrados, se recomienda establecer planes y programas continuos de monitoreo y vigilancia de la calidad del aire para este contaminante atmosférico. Adicionalmente, se recomienda iniciar monitoreos para material particulado $PM_{2.5}$ de acuerdo con la norma (Resolución 610/2010).

Como a través de la presente investigación se encontró que la calidad del aire en la zona de estudio es muy regular, se recomienda dar continuidad al programa realizando estudios epidemiológicos basados en los resultados registrados. De esta manera, se pueden establecer vínculos entre las causas de la enfermedad y el posible impacto generado por el contaminante.

Se recomienda realizar mantenimientos periódicos a los equipos utilizados en el monitoreo de la calidad del aire y hacer una validación del método de análisis elemental cuantitativo de los metales en matrices de los filtros con el fin de verificar las concentraciones determinadas mediante la técnica de fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva.

Incentivar a la universidad a desarrollar investigaciones que aporten información actual para futuros estudios relacionados con la calidad del aire y realizar análisis de resultados de concentración de material particulado se recomienda anexar análisis meteorológicos de la zona en estudio ya que estos factores influyen en la presencia de material particulado en el ambiente respirable.

Crear un modelo de dispersión del material particulado monitoreado por medio de un Software especializado que muestre una dispersión de los contaminantes, debido a que un Software de modelación evalúa la calidad de aire de una zona en particular en forma rápida, considerándose un recurso valioso para tener un mejor control del impacto ambiental

BIBLIOGRAFÍA

1. OMS, Organización Mundial de la Salud. Información Básica sobre la Contaminación Urbana.
http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/background_information/es/ (accessed Septiembre/10, 2014).
2. MAVDT; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. **2010**, 8-17,21.
3. Tóbon, D.; Sánchez, A.; Cárdenas, M. Regulación Ambiental sobre La Contaminación Vehicular en Colombia: ¿hacia dónde vamos? **2006**, 1-3.
4. El Tiempo. Las 15 Ciudades Latinoamericanas con la peor Calidad del Aire.
<http://www.eltiempo.com/multimedia/fotos/internacional/las-15-ciudades-latinoamericanas-con-la-peor-calidad-del-aire/13950397> (accessed Noviembre/13, 2014).
5. Clean Air Institute. La Calidad del Aire en América Latina: Una visión Panorámica. <http://www.cleanairinstitute.org/calidaddelaireamericalatina/cai-report-spanish.pdf> (accessed Enero/30, 2015).
6. MAVDT, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire. **2010**, 5-7,11-23.
7. Municipio de Bucaramanga. Plan de Desarrollo 2012-2015. Bucaramanga Sostenible. **2012**, 1.
8. Observatorio metropolitano del Área Metropolitana de Bucaramanga Crecimiento del parque automotor.
http://www.amb.gov.co/observatorio2/indicadores/sector_movilidad/paginas/1.CrecParqAut.php (accessed Septiembre/16, 2014).
9. Contraloría Municipal de Floridablanca. Informe Ambiental del Municipio de Floridablanca Vigencia 2011 "Sobre el estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente". **2011**, 3, 6, 67-74.
10. Alcaldía Municipal de Floridablanca Indicadores.
<http://www.floridablanca.gov.co/indicadores/> (accessed Septiembre/16, 2014).

11. Pattinson, W.; Longley, I.; Kingham, S. Proximity to busy highways and local resident perceptions of air quality. *Health Place* **2015**, *31*, 154-162.
12. CDMB, Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire del Área Metropolitana de Bucaramanga. **2013**, 77-89.
13. Vallero, D. Chapter 3 - The Science of Air Pollution. In *Fundamentals of Air Pollution (Fifth Edition)*; Vallero, D., Ed.; Academic Press: Boston, 2014; pp 43-81.
14. García Lozada, H. M. *Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión. Estudio de caso: Bogotá*; Universidad Nacional de Colombia: Colombia, 2006; pp 4,7-15,.
15. Manahan, S. E. *Introducción a la Química Ambiental*; Reverté: México, 2007; , pp 401.
16. Rico Méndez, F. G.; Castañares, R. L.; Figueroa, E. J. *Daños a la Salud por Contaminación Atmosférica*; IMSS: México, 2001; pp 125.
17. Walsh, M. P. Mobile Source Related Air Pollution: Effects on Health and the Environment. In *Encyclopedia of Environmental Health*; Nicaragua, J. O., Ed.; Elsevier: Burlington, 2011; pp 803-809.
18. Amaya Martínez, M. I.; Gómez Ordoñez, N.; Rey Estupiñan, I. C. Recopilación y Análisis de la Información de Calidad del Aire del Área Metropolitana de Bucaramanga. **2009**.
19. Hewitt, C. N.; Jackson, A. V. *Handbook of Atmospheric Science: Principles and Applications*; John Wiley & Sons: USA, 2008;, pp 145.
20. EPA; Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos Material Particulado PM₁₀. <http://www.epa.gov/airtrends/aqtrnd95/pm10.html> (accessed Junio/30, 2014).
21. Requena Rodríguez, A.; Tomás Balibrea, L. M. *Tríadas. Nuevas Lecturas en Ciencia y Tecnología*; Netbiblo: España, 2008; pp 238.
22. Sbarato, D.; Sbarato, V.; Ortega, J. E. *Predicción y Evaluación de Impactos Ambientales sobre la Atmósfera*; Brujas: Argentina, 2007; pp 32.
23. Rodríguez, M. A.; Quintero, N. M.; Castro, R. T. G.; Cuento, G. R. O. Las Partículas Respirables PM₁₀ y su Composición Química en la Zona Urbana y Rural de Mexicali , Baja California en México. **2014**.

24. Préndez, M.; Corvalán, R. M.; Cisternas, M. Estudio Preliminar del Material Particulado de Fuentes Estacionarias: Aplicación al Sistema de Compensación de Emisiones en la Región Metropolitana, Chile. **2007**, 18, 94.
25. OMS, Organización Mundial de la Salud. **Calidad del Aire (exterior) y Salud**. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/> (accessed Octubre/15, 2014).
26. Baird, C. *Química Ambiental*; Reverté: España, 2001; pp 391.
27. García, P. J.; Olmo, L. R.; Teijón, R. J.; García, A., Eds.; In *Química. Teoría y Problemas*; Tebar: México, 1996; pp 16.
28. Ferrer, A. Intoxicación por Metales. *Pamplona* **2003**, 26, 1.
29. Agencia para sustancias toxicas y el registro de enfermedades-ATSDR **Contenido del espacio informativo de la ATSDR en Internet**. http://www.atsdr.cdc.gov/es/es_contents3.html (accessed Octubre/12, 2014).
30. Eróstegui Revilla, C. P. Contaminación por metales pesados. **2009**, 12, 45.
31. Uo, M.; Wada, T.; Sugiyama, T. Applications of X-ray fluorescence analysis (XRF) to dental and medical specimens. *Japanese Dental Science Review* .
32. González Arias, A. *¿Qué es el magnetismo?* Universidad de Salamanca: España, 2001; Vol. 77, pp 83.
33. Allen Tipler, P.; Mosca, G. *Física para la ciencia y la tecnología*; Reverté: España, 2005; Vol. 2, pp 1113.
34. E. Whaites *Fundamentos de radiología dental*; Elsevier Masson: España, 2008; pp 19.
35. Turizo Donado, A. R. Caracterización Cristalográfica por Difracción de rayos X de muestras policristalinas de un nuevo fosfato de bario y vanadio (IV). **2005**, 10-12.
36. Carretero León, M. I.; Pozo Rodríguez, M. *Mineralogía aplicada: salud y medio ambiente*; Editorial Paraninfo: España, 2007; pp 87.
37. Atkins, P. W.; Jones, L. *Principios de química: los caminos del descubrimiento*; Ed. Médica Panamericana: España, 2006; pp 196-197.

38. Al-Eshaikh, M. A.; Kadachi, A. Elemental analysis of steel products using X-ray fluorescence (XRF) technique. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* **2011**, 23, 75-79.
39. Mora Chamorro, H. *Manual de Radioscopia*; Editorial Club Universitario: España, 2008; pp 14-15.
40. Mercado, G. A.; López, C. R. *La Estadística Ambiental en México*; El Colegio de México: México, 2014; pp 32.
41. CEPPI. Centro de Programas y Proyectos de Inversión. *Evaluación y Seguimiento del Impacto Ambiental en Proyectos de Inversión para el Desarrollo Agrícola y Rural*; IICA: Costa Rica, 1996; pp 140.
42. UNAD, Universidad Nacional Abierta y a Distancia Monitoreo de Calidad del Aire.
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358008/Contenido_en_linea_Control/leccin_6_monitoreo_de_calidad_del_aire.html (accessed 04/16, 2015).
43. BGI Incorporated. PQ200 y PQ200A, Muestreador de Aire. Instrucción manual. In BGI: USA, 2010; pp III, IV.
44. Davis Instruments Manual de la Consola Vantage PRO2.
http://www.davisnet.com/product_documents/weather/manuals/07395-240_IM_06312.pdf (accessed 17/11, 2014).
45. Parker, A. *Contaminación del Aire por la Industria*; Reverté: Barcelona, 2001; pp 131-133.
46. EPA-Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos Procesadores Meteorológicos y Programas de Accesorios.
http://www.epa.gov/scram001/metobsdata_procaccprogs.htm#wrplot (accessed 01/25, 2015).
47. Lakes Enviromental WRPLOT-Vista-Freeware.
<http://www.weblakes.com/products/wrplot/features.html> (accessed 4/03, 2015).
48. AirNow Índice de Calidad del Aire (AQI) Conceptos Básicos.
<http://cfpub.epa.gov/airnow/index.cfm?action=aqibasics.aqi> (accessed Julio/14, 2015).
49. CDMB, Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga Índice de Calidad del Aire para el Área Metropolitana de

Bucaramanga-IBUCA.
(accessed 07/20, 2015).

<http://caracoli.cdm.gov.co/cai/cai2/icaibu.php>

50. Varios, A. *Somos patrimonio*; Convenio Andrés Bello: Colombia, 2006; Vol. 5, pp 186-187.
51. Área Metropolitana de Bucaramanga Floridablanca. http://www.amb.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=84&Itemid=485 (accessed Febrero/13, 2015).
52. Bueno González, M. M. Informe Ambiental del Municipio de Floridablanca. **2012**, 15.
53. Hu, Y.; Lin, J.; Zhang, S.; Kong, L.; Fu, H.; Chen, J. Identification of the typical metal particles among haze, fog, and clear episodes in the Beijing atmosphere. *Sci. Total Environ.* **2015**, *511*, 369-380.
54. Pipal, A. S.; Gursumeeran Satsangi, P. Study of Carbonaceous Species, Morphology and Sources of fine (PM_{2.5}) and coarse (PM₁₀) particles along with their climatic nature in India. *Atmos. Res.* **2015**, *154*, 103-115.
55. Andrade, M. d. F.; Miranda, R. M.; Fornaro, A.; Kerr, A.; Oyama, B.; Andre, P. A.; Saldiva, P. Vehicle emissions and PM_{2.5} mass concentrations in six Brazilian cities. **2010**, 79-87.
56. CDMB-Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. Reporte Calidad del Aire Área Metropolitana de Bucaramanga. **2013**, 2-14.
57. Zafra Mejía, C. A.; Rodríguez Citiva, L. G.; Torres Cabrera, Y. A. Metales pesados asociados con las partículas atmosféricas y sedimentadas de superficies viales: Soacha (Colombia). **2012**, 114-122.
58. Eeftens, M.; Phuleria, H. C.; Meier, R.; Aguilera, I.; Corradi, E.; Davey, M.; Ducret-Stich, R.; Fierz, M.; Gehrig, R.; Ineichen, A.; Keidel, D.; Probst-Hensch, N.; Ragettli, M. S.; Schindler, C.; Künzli, N.; Tsai, M. Spatial and temporal variability of ultrafine particles, NO₂, PM_{2.5}, PM_{2.5} absorbance, PM₁₀ and PMcoarse in Swiss study areas. *Atmos. Environ.* **2015**, *111*, 60-70.
59. Velasco García, M. La calidad del aire asociado con metales pesados en la ciudad de Manizales. **2005**, 40.
60. MAVDT, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Resolución 0610 de 2010. **2010**.

61. OMS, Organización Mundial de la Salud Guías de la calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. **2005**, 5-7.
62. OPS-CEPIS Guías y normas de calidad del aire en exteriores para contaminantes no tradicionales. , 35.
63. Merck Millipore Mitex Membrane Filter, PTFE, hydrophobic, 5.0 micras, 47 mm, white plain. https://www.merckmillipore.com/GT/en/product/Mitex-Membrane-Filter%2C-PTFE%2C-hydrophobic%2C-5.0%2CA0%2CB5m%2C-47%2CA0mm%2C-white%2C-plain,MM_NF-LSWP04700?bd=1# (accessed Julio 13, 2015).
64. IDEAM- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Protocolo para la Vigilancia y Seguimiento del Módulo aire del sistema de Información Ambiental. **2005**, 32-33.
65. Uso privado del Software Search-Match Software Search-Match.
66. Beckhoff, B.; Kanngießer, B.; Langhoff, N.; Wedell, R.; Wolff, H. Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis. **2006**, 419-421.
67. Morales, R. G. E. *Contaminación Atmosférica Urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago*. Universitaria S.A.: Santiago de Chile, 2006; pp 126.
68. INTA-Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria *Sistema de Análisis Estadístico con SPSS*; Nicaragua, 2007; pp 33.
69. ETESA, Empresa de Transmisión Eléctrica S.A. Dirección y Velocidad del Tiempo Actual. <http://www.hidromet.com.pa/viento.php> (accessed Agosto/19, 2015).
70. Skerfving, S.; Bergdahl, I. A. Chapter 43 - Lead. In *Handbook on the Toxicology of Metals (Fourth Edition)*; Nordberg, G. F. N. A. F., Ed.; Academic Press: San Diego, 2015; pp 911-967.
71. Fowler, B. A.; Selene, C. -, Chou, R., J.; Jones, D., L.; Sullivan Jr, W.; Chen, C. -. Chapter 28 - Arsenic. In *Handbook on the Toxicology of Metals (Fourth Edition)*; Nordberg, G. F. N. A. F., Ed.; Academic Press: San Diego, 2015; pp 581-624.

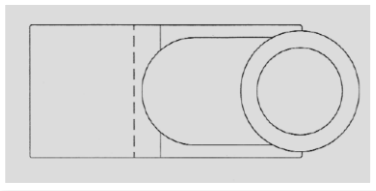
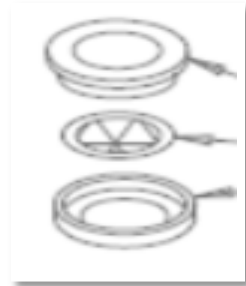
72. Lucchini, R. G.; Aschner, M.; Yangho kim; Šarić, M. Chapter 45 - Manganese. In *Handbook on the Toxicology of Metals (Fourth Edition)*; Nordberg, G. F. N. A. F., Ed.; Academic Press: San Diego, 2015; pp 975-1011.
73. Assem, F. L.; Oskarsson, A. Chapter 60 - Vanadium. In *Handbook on the Toxicology of Metals (Fourth Edition)*; Nordberg, G. F. N. A. F., Ed.; Academic Press: San Diego, 2015; pp 1347-1367.
74. Oskarsson, A. Chapter 29 - Barium. In *Handbook on the Toxicology of Metals (Fourth Edition)*; Nordberg, G. F. N. A. F., Ed.; Academic Press: San Diego, 2015; pp 625-634.
75. Gherasim, C.; Hancková, K.; Palarčík, J.; Mikulášek, P. Investigation of cobalt(II) retention from aqueous solutions by a polyamide nanofiltration membrane. *J. Membr. Sci.* **2015**, 490, 46-56.
76. Gibson, A.; Faucher, L.; Schurr, M. Molten copper inhalation. *Burns* **2011**, 37, e50-e53.
77. Lenntech Itrio. <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/y.htm> (accessed Agosto/28, 2015).
78. Keshavarzi, B.; Tazarvi, Z.; Rajabzadeh, M. A.; Najmeddin, A. Chemical speciation, human health risk assessment and pollution level of selected heavy metals in urban street dust of Shiraz, Iran. *Atmos. Environ.* **2015**, 119, 1-10.
79. Langård, S.; Costa, M. Chapter 33 - Chromium. In *Handbook on the Toxicology of Metals (Fourth Edition)*; Nordberg, G. F. N. A. F., Ed.; Academic Press: San Diego, 2015; pp 717-742.
80. OMS, Organización Mundial de la Salud Normas de Salud Pública para combatir la Contaminación Atmosférica. http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/public_health_policy/es/ (accessed Septiembre/1, 2015).

ANEXOS

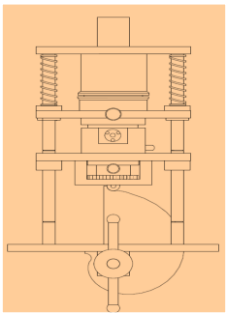
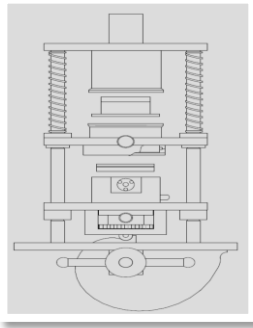
Anexo A. Carta de Operaciones

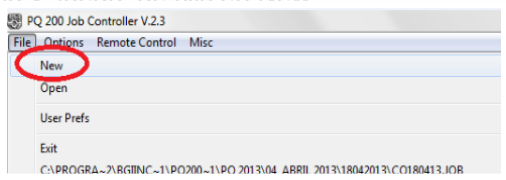
 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA	
PROYECTO CALIDAD DEL AIRE EN RECEPTORES ALREDEDOR DE U. SANTO TOMÁS CARTA DE OPERACIONES	
ETAPA	I.- Monitoreo de Calidad del Aire
REFERENCIA	Determinación de PM ₁₀ y Especiación Química
RESULTADOS ESPERADOS	Concentraciones medias de PM ₁₀ y presencia de especies traza en el material captado.
RESPONSABLES	Amílcar Rizzo, A.MSc. Nelson Castellanos, PhD. Hernando Camargo, PhD.
MATERIALES, EQUIPOS Y/O HERRAMIENTAS REQUERIDAS	
HERRAMIENTAS/EQUIPOS	INSUMOS
Muestreador PQ 200/Panel Solar	Filtros desecados
Portafiltros / Recipientes	Formato de campo
Pinzas	
Computador portátil / Software BGI	
Desecador	
Balanza	
ELEMENTOS DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN PERSONAL	
ACTIVIDAD DE CAMPO	PARA EL LABORATORIO
Elementos de protección personal	Guantes
Sombrero/protección solar	Bata
Zapatos cerrados	
Celular	
TAREAS A REALIZAR	
1. Seleccionar e Identificar filtros nuevos. 2. Pesar filtros nuevos y diligenciar información. 3. Preparar material de apoyo y colocar el filtro en el cartucho. 4. Traslado de filtros al sitio de monitoreo. 5. Registrar datos de monitoreos de campo. 6. Descargar los datos de monitoreo (filtro usado). 7. Programar el equipo PQ-200 para el muestreo. Controlar con el PC. 8. Verificar datos de campo. Nuevo monitoreo. 9. Transportar los filtros al laboratorio y desecarlos. 10. Pesaje de los filtros “usados” (retirados). 11. Procesar la información y reportar los resultados. 12. Enviar muestras para especiación química en laboratorio. 13. Procedimiento de Especiación Química. 14. Prueba de fugas del equipo PQ-200.	

PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR MATERIAL PARTICULADO Y ESPECIACIÓN QUÍMICA		
TAREA	PROCEDIMIENTO	RIESGOS/ACCION PREVENTIVA
1.- Seleccionar e identificar filtros nuevos.	a) Identifique el tipo de material particulado a monitorear. El proyecto actual requiere monitorear PM₁₀. Observe las instrucciones de muestreo en el Manual BGI. b) Inspeccione en laboratorio el estado de los filtros y detecte posibles imperfectos que puedan alterar el pesaje y/o los resultados del muestreo. c) Coloque los filtros en el desecador bajo un ambiente estable durante 24 horas. Nota: Los equipos PQ200 están diseñados para monitorear PM_{2.5} y PM₁₀ (retirando el Impactador WINS).	R: Prueba de fugas mal ejecutada. R: Rasgadura de filtros AP: Conocer Procedimiento para realizar pruebas de fuga. AP: Verificar estado de la sílica.
2.- Pesar los filtros nuevos y diligenciar información.	a) Defina un código para el filtro, regístrelo en el Formato de Campo de Monitoreo y en el porta-filtro o cassette. Indique el tipo de monitoreo a realizar. Para nuestro caso será PM₁₀. b) Observe y cerciórese del buen funcionamiento de la balanza analítica (ver certificado de calibración). c) Tome el filtro con una pinza sujetadora y colóquelo en la balanza analítica. Si usa un soporte, tare y proceda a pesar los filtros, uno por uno. d) Registre el peso inicial de cada filtro con el respectivo código de identificación en el Formato de Campo que usted deberá elaborar. Asigne un nombre para el Receptor, consígnelo y coloque la fecha de muestreo en el Formato de Campo. e) Llene los demás campos del formato con los siguientes datos: nombre del Estudiante o Tesista, fecha de muestreo, Título de la Investigación o del Proyecto de Grado, nombre de la estación de monitoreo, hora de inicio del monitoreo y demás datos según Tarea 6. Asigne un espacio para observaciones. f) Introduzca los filtros en los cartuchos y estos	R: Balanza descalibrada. R: Filtro Roto. R: Mala identificación de los filtros. AP: Calibración Balanza analítica. AP: Manipulación cuidadosa de los filtros AP: Verificación correcta de datos. AP: Sitio adecuado para pesaje bajo humedad y T controlados. AP: Evitar tocar los filtros con las manos

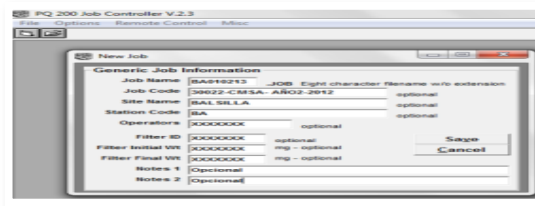
	últimos en sus correspondientes Cassettes.	
3.- Preparar material de apoyo y colocar filtro en el cartucho.	a) Identifique de forma visible todos los cartuchos o portafiltros y los cassette metálicos (porta cartuchos) con el nombre del Receptor correspondiente. b) Tome un cartucho de filtro identificado con el nombre del Receptor. Ejemplo: Campus Florida Cancha Múltiple (CFCM). c) Abra el cartucho de filtro tomando el abridor de cartuchos limpio, y colóquelo entre las dos mitades: superior e inferior, como muestra la figura. Manteniendo el cartucho y el abridor de cartucho en forma plana u horizontal, presionar suavemente hasta que se abra el cartucho. NO GIRE las mitades del cartucho.  Pinza para abrir cartucho d) Coloque la mitad superior del cartucho a un lado e Introduzca suavemente el filtro nuevo en la parte interna (inferior) del cartucho (portafiltro) previamente pesado e identificado. El filtro debe quedar con el número de identificación hacia arriba. e) Para cerrar el cartucho, coloque las mitades superior e inferior una sobre otra y presiónelas suavemente, sin girarlas. Una vez cerradas, ajustarlas perfectamente entre ellas.  Preparación del Cartucho (Sup -Filtro- Inf). f) Abra el porta-cartucho (Cassette metálico)	R: Filtros mal ubicados en portafiltros. R: Perder la secuencia llevada en el proceso R: Rompimiento de filtro AP: Descartar filtro en caso de ser roto o rasgado. AP: Realizar colocación del filtro en lugar limpio y seco.

	respectivo e introduzca el portafiltros correspondiente. Para retirar filtros lleve los portacartuchos vacíos y rotulados. Uno para cada equipo, cuando hay varios. Nota: Manipule los filtros únicamente con pinzas e instálelos. Las partes superior e inferior del cartucho han sido diseñadas con un ajuste especial para prevenir que el cartucho se desprenda fácilmente. Por consiguiente, se deberá tener especial cuidado para abrir o cerrar el cartucho, sobre todo cuando contiene el filtro en su interior.	
4.- Traslado de filtros al sitio de monitoreo.	a) Ubique en un vehículo todo lo necesario para instalar los filtros: Cartuchos con filtros, Computador portátil con Software BGI instalado, Formatos de campo, llaves, herramientas, etc y diríjase a la estación de monitoreo, según lo programado. b) Lleve un morral para facilitar el traslado de los materiales y/o herramientas. Mantenga los cartuchos en posición horizontal. La imagen siguiente muestra la posición correcta. c) Traslade todo lo necesario para instalar el filtro o retiro e instalación, si ya inició algún muestreo. No olvidar la llave de acceso a las estaciones de monitoreo. Para monitoreo de PM₁₀ el equipo no debe tener el Impactador WINS ("Well Impactor Ninety-Six") (usado para PM_{2.5}). Cassette con su respectiva identificación.	

5.- Registrar los datos de monitoreo de campo.	a) Abra la compuerta frontal del Equipo PQ200 liberando las dos agarraderas laterales (una de cada lado), de tal forma que la puerta quede horizontal. b) Coloque el computador y el cartucho correspondiente a la Estación, sobre la parte interna de la puerta que ahora está horizontalmente. c) Abra el ensamble del WINS. Rote cuidadosamente la palanca de giro en sentido contrario de las manecillas del reloj, usando ambas manos. Esto pondrá al descubierto el impactador WINS y el cartucho del filtro.   Acople WINS Cerrado Acople WINS Abierto Si hay un filtro instalado: d) Destape el respectivo porta cartucho vacío y deje la tapa sobre la puerta del Equipo. e) Tome suavemente el cartucho del filtro usado que está en el acople del WINS. Colóquelo en el interior del porta cartucho. Tápele y guárdelo. f) Destape el portacartucho que contiene el filtro nuevo. Inmediatamente tome el cartucho nuevo e introdúzcalo en el acople de WINS, de tal forma que la superficie del filtro debe estar hacia arriba y sin daño alguno. NO tocar el filtro, ni deje que le caiga líquido, vapor o material que pueda dañarlo. g) Finalmente, tape el portacartucho y guárdelo de tal forma que el filtro quede horizontal. Transfiera el cartucho “nuevo” a la tapa del portacartucho. h) Cierre el ensamble del WINS rotando lentamente en sentido a las manecillas del reloj 3/4 de vuelta. Observe que el cartucho para filtro y el impactador WINS se asienten correctamente.	R: Maltrato o machucón de dedos. R: Contacto con el filtro expuesto al retirarlo del equipo. AP. Instalar filtros en los cartuchos únicamente en el laboratorio. AP: Seguir procedimiento para realizar la tarea. AP: Si llueve no cambie el filtro, realice esta tarea solo cuando esta termine.
6.- Descargar los datos de monitoreo (filtro usado).	a) Si el equipo está funcionando correctamente, permanecerá encendido. Para visualizar los datos del monitoreo anterior, oprima la tecla LIGHT y copie los datos al Formato de Campo de Monitoreo. En caso contrario, oprima la tecla	AP: Inspeccione el área. AP: Verifique que el

	ON/OFF del equipo y este encenderá, si estaba apagado (o viceversa).   Nota: Los botones tienen las siguientes funciones: ON/OFF: enciende y apaga el PQ200. Flechas: para cambiar de un concepto al otro de arriba hacia abajo o en las opciones de ciclo. SELECT: para escoger la selección actual. Espacio (Menú/Exit)/Next: Varias opciones. LIGHT: ilumina la pantalla. b) Haga clic en Menú. Luego, en la tecla que indica moverse hacia abajo, presione Select. Aparecerán los datos del monitoreo del filtro anterior. c) Registre los datos en el Formato de Campo: tiempo de monitoreo, volumen registrado, presión atmosférica, Temperatura, flujo promedio (l/s), etc.	formato sea diligenciado en forma correcta.
7.- Descargar datos del monitoreo.	a) Encienda el computador portátil de campo. Conecte la computadora al equipo PQ200 mediante un cable serial RS232. Adicional, se necesita un convertidor USB a RS232. b) Haga doble clic en el icono BGI que se encuentra en el escritorio del computador. El programa controlador del PQ200 se abrirá.  c) Haga un clic en "File" en la barra superior del menú y luego de clic en New 	R: Inadecuada programación del equipo. R: Hora incorrecta del reloj. AP: Verificar programación del equipo. AP: Verificar que la hora del reloj. AP: Confirmar instrucciones de operación del equipo.

Se abrirá la siguiente pantalla:



d) Digite la información de los campos de la siguiente forma:

Job Name: Escriba las iniciales o el código de la ECA, seguido de la fecha del muestreo: dd-mm-aa.
Ejemplo: BA010613

Job Code: CMSA

Site Name: Redacte el nombre de la ECA. Ej: Campus Florida.....

StationCode: Código de ECA (iniciales).

Operators: Iniciales nombre + Apellido del Operador de campo.

Filter ID: Opcional (si es necesario)

Filter Initial Wt: Opcional

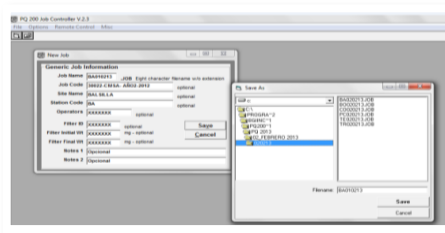
Filter Final Wt: Opcional

Note 1: Opcional; Redacte alguna observación, si es necesario.

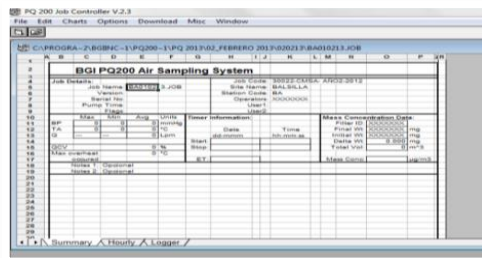
Note 2: Opcional. Idem a la anterior.

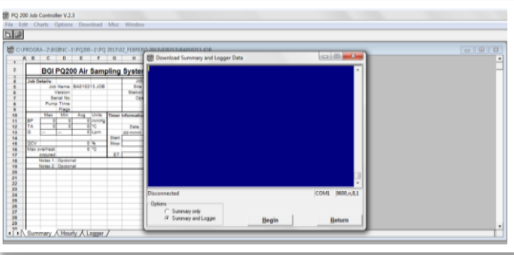
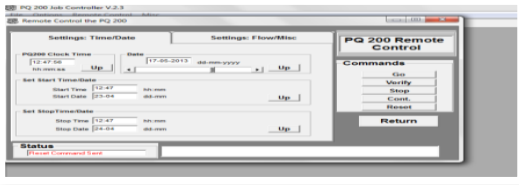
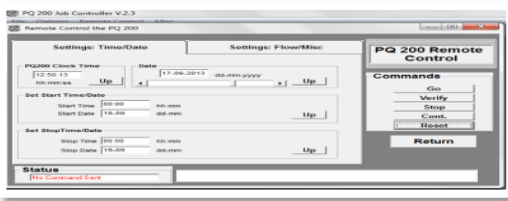
e) Haga clic en **Save**. Seleccione en la carpeta donde va a guardar el archivo.

f) Si ya tiene carpetas con el nombre de las ECA, guarde el archivo en la respectiva carpeta dando nuevamente clic en Save.

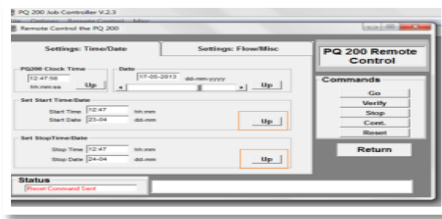


Se desplegará la siguiente pantalla:



	g) Clic en Download y se mostrará la siguiente pantalla:  h) Haga clic en Begin, esperar a que los datos se descarguen. Esto tardará alrededor de 1 minuto. Cuando la descarga termina, el equipo emitirá un sonido agudo de corta duración. i) Hacer un clic en Return. j) Hacer Clic en File y Clic en Guardar (Ctrl+ G). Los datos ya se habrán descargado. k)Haga click en Exportar, para que los datos queden guardados en formato xls	
8.- Programación de equipo. Nuevo monitoreo.	Opciones para programar el equipo: Opción 1: mediante control PC Nota: Asegúrese que la información del muestreo anterior se descargó antes de empezar la nueva programación. Luego de descargados los datos: Entre al programa BGI (dando doble clic en el icono BGI del escritorio, como en la tarea anterior). Clic en Remote Control. Aparecerá la siguiente pantalla:  Clic en Reset:  Verifique que PQ200 Clock Time y Date correspondan a la hora fecha actual (sino llame al ing. de mantenimiento). Ingrese o modifique lo siguiente: Start Time (hora inicio): 00:00 Start Date (fecha Inicio)	

Stop Time (hora finaliza monitoreo) 00:01
 Stop Date (fecha final de monitoreo): Día siguiente al día de inicio del monitoreo.



Dar clic en los “Ups” indicados en la figura anterior
 Clic en “Go” para que el equipo acepte la programación (debe apagarse automáticamente)
 Cierre el programa, desconecte el Computador y Apague el PQ200; tecla ON/OFF

Nota: El monitoreo legalmente debe iniciar al dar la media noche (00:00) y se detendrá a la 00:01 del día siguiente

Opción 2: Programar Muestreador por 24 horas directamente en el PQ200

Nota: El equipo emitirá una alerta al operador si la información no ha sido descargada.
 Para muestrear 24 horas del día dar clic en Espacio (Menú Principal), use teclas de flecha hasta que parpadee leyenda “Muestrear desde las 00:01-24:00”

Oprima **SELECT**. Si la información ya ha sido descargada, aparecerá el mensaje: “Borrando Memoria, por favor espere, después; “información guardada” y finalmente “PQ-200 sin electricidad”. El PQ-200 está ahora programado para encenderse a media noche y empezar a realizar el muestreo.

Encendido del Muestreador con inicio retardado

Si desea modificar el ciclo deseado de muestreo, se puede programar cualquier fecha siguiendo las instrucciones abajo mencionadas. Como se indicó anteriormente, debe descargarse la información antes de iniciar el siguiente muestreo, sin embargo, el instrumento emitirá una alerta al operador en caso que la información no haya sido descargada previamente.

Luego de encendido el equipo, oprima la tecla Espacio (**menú principal**), use las teclas de flecha hasta que “Configurar y bajar Info” parpadee. Oprima **SELECT**.
 Seleccionar la opción “Muestrear c/ Usuario-

	Arancar/Parar". Oprima SELECT. El equipo le indicara que puede modificar la fecha y hora de inicio del Muestreo (mes, día, hora y minutos). La selección actual aparecerá parpadeante. Oprima SELECT (NEXT). El primer valor que dejará de parpadear (Día del Mes), indica que puede ser editado. Use los botones de flecha (EDIT) para incrementar o disminuir el valor seleccionado. Al hacerlo oprima SELECT (NEXT). Continúe oprimiendo el botón SELECT (NEXT) y los botones de flecha (EDIT) para introducir la fecha y la hora deseadas. Al terminar de programar la fecha y hora, oprima el botón de Espacio (EXIT) para continuar. Si la unidad ha sido descargada previamente aparecerá el siguiente mensaje "<i>Borrando memoria. Por favor espere</i>" El equipo mostrará un mensaje indicando que debe ingresar la fecha y hora de finalización del monitoreo. La selección actual aparecerá parpadeando. Oprima SELECT (NEXT). Y siga los pasos anteriores para modificar la fecha y hora de finalización según lo requerido. Nota: El sistema de muestreo de aire PQ200 no debe ser operado (o dejarlo sin operar por largos periodos de tiempo) sin filtro.	
9.- Transporte de filtros al laboratorio y desecado.	a) Introduzca el porta cassette en el recipiente de transporte, de tal manera que los filtros queden con la identificación hacia arriba. b) Diríjase al laboratorio considerando que los filtros deben viajar en posición horizontal. c) Al llegar al laboratorio, saque todos los Cassettes con sus respectivos portafiltros y ábralos. d) Abra el cartucho del filtro. Para ello, tome el abridor de cartuchos, el cual debe estar limpio, y colóquelo entre las dos mitades (superior e inferior) como se indicó antes. e) Manteniendo el cartucho y el abridor de cartuchos en forma plana u horizontal, presionar suavemente hasta que se abra el cartucho. NUNCA GIRE las mitades del cartucho. f) Tome la parte superior del portafiltro. Utilizando en lo posible una espátula y una pinza lisa, tome el filtro e introdúzcalo en el secador, verifique que tenga sílica en buen estado. g) Deje el filtro usado (con material particulado) durante aproximadamente 24 horas en el desecador. Nota: Ordene los filtros siguiendo el orden	R: Daños del filtro AP: Mantener la sílica gel en buen estado

	consecutivo que fue asignado previamente.	
10.- Pesaje de los filtros “usados” (retirados).	a) Transcurridas 24 horas de estabilización de los filtros, tome con una pinza sujetadora y colóquelo en la balanza analítica. Si utiliza un soporte, tare y proceda a pesar los filtros uno por uno. b) Registrar el peso final de cada filtro en el Formato de Campo previamente elaborado. c) Verificar el código de identificación, fecha y demás datos de cada filtro.	AP: Manipulación correcta de filtros AP: Uso adecuado de la balanza AP: Mantener filtro posición vertical
11.- Procesar información y reportar resultados.	a) Elabore archivo en EXCEL y crea una carpeta en el computador de uso corriente para el equipo PQ-200. b) Procese la información en el archivo y obtenga la concentración de material particulado en ug/m.³ Nota: Se requiere inducción haber en conceptos de Operación y Calculo de Material Particulado a partir de equipos BGI PQ-200.	R: Errores en cálculos
12.- Enviar muestras para especiación química en laboratorio.	a) De los filtros retirados en la semana, tomar los más adecuados de acuerdo con las fechas en que los muestreos hayan sido exitosos y que cumplan con los criterios para especiación. b) Introduzca cada filtro (muestra) en una bolsa plástica rotulada con el número del filtro, fecha y sitio de muestreo. c) Introduzca todas las muestras en un sobre bien marcado y envíelas al laboratorio para especiación química.	R: Rotulación errónea de los filtros
13.- Procedimiento de Especiación Química.	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO PRESENTE EN LOS FILTROS DE ESTUDIO Difracción de Rayos-X de muestras policristalinas La identificación de las fases cristalinas presentes en los materiales en estudio (filtros) se realizó por DRX de muestras policristalinas, empleando un difractómetro marca BRUKER modelo D8 Advance ubicado en el Laboratorio de Rayos-X PTG de la UIS. Para eso se utilizó el proceso descrito a continuación. Preparación de las muestras Una de las virtudes de la técnica es la facilidad de preparación de la muestra, en la cual se hace referencia que el proceso es no destructivo, es	R: Manipulación errónea de filtros AP: Uso de guantes y materiales adecuados para el tratamiento de la muestra

	decir, los filtros se mantienen inalterados durante todo el proceso de preparación, toma de datos y análisis. En la Figura 10 se aprecia el tratamiento de la preparación de la muestra empleando portamuestras de arcillas especiales para este tipo de muestras. Toma de datos por DRX La toma de datos de las muestras se realizó utilizando un difractómetro de polvo BRUKER D8 Advance equipado con un detector lineal LynexEye, filtro de níquel (Ni) en un rango de medición de 2 a 70° en ángulos de 2 theta (2θ) y con una razón de muestreo de 1 s/paso. Determinación de fases cristalinas El análisis cualitativo (identificación de fases cristalinas) de cada muestra analizada se realizó mediante la comparación de los patrones de difracción obtenidos experimentalmente con la base de datos PDF-2 de patrones de polvo. Esta actividad se llevó a cabo con el programa especializado Crystallographica Search-Match (CSM)⁶⁵. Fluorescencia de Rayos X de energía dispersiva La identificación elemental de metales con interés ambiental tales como plomo, arsénico y bario, entre otros, se realizó mediante la técnica de fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva. El equipo utilizado para este fin es un espectrómetro de fluorescencia de Rayos-X marca Shimadzu, modelo 700XS ubicado en el Laboratorio de fluorescencia de Rayos-X del Centro de Desarrollo Tecnológico y Productivo de Joyería (CDTPJ). La ventaja de la identificación de metales pesados mediante esta técnica analítica es que no se requiere preparación de la muestra. La toma de datos se realiza directamente sobre el filtro obtenido. La metodología empleada para el análisis se describe a continuación. Toma de datos por FRX La toma de datos del material en estudio se realizó en un espectrómetro de fluorescencia de Rayos-X de energía dispersiva marca Shimadzu modelo EDX-700HS equipado con un detector de estado	
--	--	--

	sólido de Silicio – Litio utilizando como fuente de radiación un tubo de rodio (Rh) y colimador de 5 mm.	
14.- Prueba de fugas del Equipo PQ-200.	a) Inserte un filtro nuevo en el soporte de filtros. No usarlo para muestreo inmediatamente después de la prueba. Puede utilizarse para otras calibraciones. b) Remueva la admisión y coloque el adaptador para el verificador de flujo en la parte superior del tubo de bajada. Cierre la válvula del adaptador para impedir flujo de aire. c) En el menú principal, use las teclas de flecha hasta que parpadee. * Menú de prueba y calibración. Oprima SELECT para entrar. d) Oprima la flecha hacia abajo hasta que parpadee * Prueba de fugas. Oprima SELECT. Verifique que la trayectoria del flujo esté sellada (que la válvula en el adaptador para el verificador de flujo esté cerrada) y oprima SELECT para empezar a desalojar el sistema. e) El PQ200 evaluará automáticamente el funcionamiento del sistema y reportará si el sistema aprueba o no la prueba de fugas. Esta es una prueba de 2 minutos. <u>Si supera la prueba de fugas</u>, el muestreador está funcionando adecuadamente. En caso contrario, investigue y corrija cualquier mal funcionamiento: • Asegúrese de que el adaptador de flujo esté colocado correctamente en el tubo de bajada y que la válvula esté completamente cerrada. • Asegúrese de que el ensamble del WINS y cartucho con el filtro esté cerrado por completo. • Asegúrese de que el cartucho del filtro esté cerrado y colocado en el estuche del filtro durante la prueba de fugas • Inspeccione visualmente los tubos para encontrar grietas o conexiones sueltas • Inspeccione visualmente los O-ring en el adaptador de flujo y soporte del filtro para encontrar grietas, deformaciones o colocación inadecuada de algún elemento. f) Si todos estos elementos parecen normales y el muestreador continua mostrando una falla en la prueba de fugas, contacte al supervisor y/o al fabricante. g) Apague el muestreador, remueva el adaptador de flujo y ponga la admisión nuevamente en el tubo de bajada. h) Remueva el filtro. Deseche el filtro o guárdelo para pruebas de fuga posteriores o bien puede usarla para verificaciones de calibración	R: Prueba de fuga no exitosa AP: Mantenimiento de equipo PQ200

Fuente: Procedimiento de Operación Determinación de Material Particulado (PM₁₀ o PM_{2.5}) con Equipos Low Vol-PQ200: “K2 Ingeniería”

Anexo B. Formato de Campo para datos de material particulado –PM₁₀–

	DETERMINACIÓN DE AEROSOL Y OTRAS ESPECIES QUÍMICAS DE INTERÉS EN SALUD PÚBLICA. CASO AUTOPISTA FLORIDABLANCA-BOGOTÁ. SECTOR UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS Y ALREDEDORES					
	DATOS DE CAMPO / MUESTREO PM₁₀					
INFORMACION GENERAL						
NOMBRE ESTACION						
NOMBRE FILTRO				DISTANCIA AUTOPISTA		
UBICACIÓN	LATITUD		ALTITUD (ASNM)			
	LONGITUD		ALT. DEL SUELO			
ENTORNO LOCAL						
RESPONSABLES	LAURA SANCHEZ MANTILLA					
	ANDREA GALEANO ALVAREZ					
PARAMETROS						
INICIO				PARAR		
ET	Q (VLpm)		A °C		TEMP. PROM	
TV	Prom(L)		F °C		BP. MAX	
BTY	CV		TEMP. MIN		BP. MIN	
	PRESION		TEMP. MAX		BP PROM.	
DATOS CUANTITATIVOS						
FILTRO	PESO INICIAL (mg)		PESO FINAL (mg)		PM ₁₀ (mg)	PM ₁₀ (µg)
	1		1			
	2		2			
	3		3			
	Promedio		Promedio			
OBSERVACIONES						

Fuente: Autoras

Anexo C. Datos cuantitativos del Punto 1 de monitoreo “Campus Floridablanca Cancha Múltiple” –CFCM-

DATOS CUANTITATIVOS "CAMPUS FLORIDABLANCA CANCHA MULTIPLE"												
Estación	Filtro	Peso inicial (mg)		Peso final (mg)		PM ₁₀ (mg)	PM ₁₀ (µg)	Presión (mm _{Hg})	Volumen 1 (m ³)	Volumen 2 (m ³)	Concentración (µg/m ³)	ET (Hora:min)
I n v i e r n o	CFCM-F1	1	86,2	1	86,8	0,7000	700,0	684	24,040	21,6360	32,3535	23:59
		2	86,1	2	86,8							
		3	86,1	3	86,9							
		$\bar{X}$	86,1333	$\bar{X}$	86,8333							
	CFCM-F2	1	85,9	1	86,3	0,2667	266,7	684	24,020	21,6180	12,3369	23:59
		2	85,7	2	86,2							
		3	86,4	3	86,3							
		$\bar{X}$	86,0000	$\bar{X}$	86,2667							
	CFCM-F3	1	86,8	1	87,1	0,3667	366,7	681	10,58	9,4802	38,6805	10:34
		2	86,9	2	87,2							
		3	86,7	3	87,2							
		$\bar{X}$	86,8000	$\bar{X}$	87,1667							
V e r a n o	CFCM-F4	1	85,4	1	86,7	1,2666	1266,6	683	24,013	21,5801	58,6930	23:59
		2	85,3	2	86,5							
		3	85,4	3	86,7							
		$\bar{X}$	85,3667	$\bar{X}$	86,6333							
	CFCM-F5	1	87,3	1	88,3	0,8666	866,6	683	24,040	21,6044	40,1123	23:59
		2	87,5	2	88,5							
		3	87,3	3	87,9							
		$\bar{X}$	87,3667	$\bar{X}$	88,2333							
	CFCM-F6	1	86,3	1	87,4	1,1000	1100,0	683	24,044	21,6080	50,9072	23:59
		2	86,6	2	87,5							
		3	86,4	3	87,7							
		$\bar{X}$	86,4333	$\bar{X}$	87,5333							
	CFCM-F7	1	86,8	1	88,1	1,3000	1300,0	682	26,913	24,1509	53,8283	26:52:00
		2	86,9	2	88,1							
		3	86,7	3	88,1							
		$\bar{X}$	86,8000	$\bar{X}$	88,1000							

Anexo D. Datos cuantitativos del Punto 2 de monitoreo “Campus Floridablanca Portería Múltiple” –CFP-

DATOS CUANTITATIVOS "CAMPUS FLORIDABLANCA PORTERIA"												
Estación	Filtro	Peso inicial (mg)		Peso final (mg)		PM ₁₀ (mg)	PM ₁₀ (µg)	Presión (mmHg)	Volumen 1 (m³)	Volumen 2 (m³)	Concentracion (µg/m³)	ET (Hora:min)
I n v i e r n o	CFP-F1	1	86,4	1	87,7	1,0667	1066,7	684	24,040	21,636	49,3021	23:59
		2	86,5	2	87,8							
		3	86,9	3	87,5							
			86,6000		87,6667							
	CFP-F2	1	86,9	1	87,6	0,6000	600,0	684	24,042	21,6378	27,7293	23:59
		2	87,2	2	87,7							
		3	87,0	3	87,6							
		$\bar{X}$	87,0333	$\bar{X}$	87,6333							
	CFP-F3	1	87,7	1	88,1	0,4333	433,3	685	24,036	21,6640	20,0009	23:59
		2	87,6	2	88,1							
		3	87,7	3	88,1							
		$\bar{X}$	87,6667	$\bar{X}$	88,1000							
	CFP-F4	1	84,6	1	85,2	0,6333	633,3	685	24,043	21,6703	29,2243	23:59
		2	84,6	2	85,2							
		3	84,5	3	85,2							
		$\bar{X}$	84,5667	$\bar{X}$	85,2000							
	CFP-F5	1	85,7	1	86,2	0,4333	433,3	685	33,973	30,6204	14,1507	33:54:00
		2	85,7	2	86,0							
		3	85,6	3	86,1							
		$\bar{X}$	85,6667	$\bar{X}$	86,1000							
V e r a n o	CFP-F6	1	85,6	1	87,1	1,2666	1266,6	682	24,042	21,5745	58,7081	23:59
		2	85,5	2	86,3							
		3	85,6	3	87,1							
		$\bar{X}$	85,5667	$\bar{X}$	86,8333							
	CFP-F7	1	86,7	1	88,0	1,5666	1566,6	683	24,038	21,6026	72,5191	23:59
		2	86,6	2	88,5							
		3	86,7	3	88,2							
		$\bar{X}$	86,6667	$\bar{X}$	88,2333							
	CFP-F8	1	83,8	1	84,6	0,8000	800,0	683	24,044	21,6080	37,0234	23:59
		2	84,0	2	84,7							
		3	83,8	3	84,7							
		$\bar{X}$	83,8667	$\bar{X}$	84,6667							
	CFP-F9	1	84,7	1	86,0	1,2000	1200,0	681	24,009	21,5133	55,7794	23:59
		2	84,8	2	86							
		3	84,9	3	86							
		$\bar{X}$	84,8000	$\bar{X}$	86,0000							

Anexo E. Datos cuantitativos del Punto 3 de monitoreo “Conjunto Torres de Sevilla”–CTS-

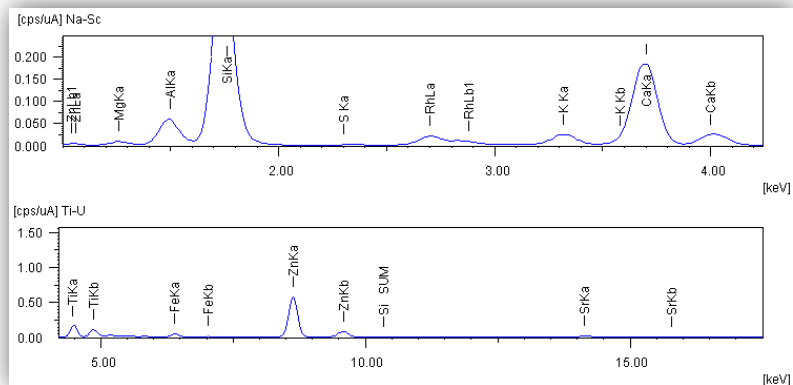
DATOS CUANTITATIVOS "CONJUNTO TORRES DE SEVILLA"												
Estación	Filtro	Peso inicial (mg)		Peso final (mg)		PM ₁₀ (mg)	PM ₁₀ (µg)	Presión (mmHg)	Volumen 1 (m ³)	Volumen 2 (m ³)	Concentración (µg/m ³)	ET (Hora:min)
I n v i e r n o	CTS-F1	1	85,7	1	85,9	0,5	500	684	24,042	21,6378	23,1077	23:59
		2	85,3	2	85,9							
		3	85,2	3	85,8							
		$\bar{X}$	85,4000	$\bar{X}$	85,8667							
	CTS-F2	1	85,6	1	86,8	1,0667	1066,7	682	24,04	21,5727	49,4467	23:59
		2	85,8	2	86,7							
		3	85,7	3	86,8							
		$\bar{X}$	85,7000	$\bar{X}$	86,7667							
	CTS-F3	1	86,1	1	88,1	2,2667	2266,7	681	16,209	14,5241	156,0646	16:12
		2	85,3	2	87,9							
		3	86,0	3	88,2							
		$\bar{X}$	85,8000	$\bar{X}$	88,0667							
	CTS-F4	1	85,7	1	86,7	1,0334	1033,4	683	24,878	22,3575	46,2217	24:49:00
		2	85,7	2	86,8							
		3	85,8	3	86,8							
		$\bar{X}$	85,7333	$\bar{X}$	86,7667							
CTS-F5	1	87,8	1	86,6	-1,0333	-1033,3	684	12,249	11,0241	-93,7310	12:13	
	2	87,7	2	86,5								
	3	87,3	3	86,6								
	$\bar{X}$	87,6000	$\bar{X}$	86,5667								
V e r a n o	CTS-F6	1	85,7	1	86,9	0,7666	766,6	683	51,294	46,0971	16,6301	51:14:00
		2	86,7	2	86,8							
		3	85,8	3	86,8							
		$\bar{X}$	86,0667	$\bar{X}$	86,8333							
	CTS-F7	1	84,1	1	85,3	1,2333	1233,3	685	24,015	21,6451	56,9783	23:59
		2	84,1	2	85,3							
		3	84,1	3	85,4							
		$\bar{X}$	84,1000	$\bar{X}$	85,3333							
	CTS-F8	1	86,2	1	87,6	1,4667	1466,7	684	24,042	21,6378	67,7842	23:59
		2	86,2	2	87,7							
		3	86,3	3	87,8							
		$\bar{X}$	86,2333	$\bar{X}$	87,7000							
	CTS-F9	1	85,7	1	87,4	1,6333	1633,3	684	24,042	21,6378	75,4836	23:59
		2	85,9	2	87,4							
		3	85,7	3	87,4							
		$\bar{X}$	85,7667	$\bar{X}$	87,4000							

Anexo F. Datos cuantitativos del Punto 4 de monitoreo “Comando de Policía de Floridablanca”–CPF-

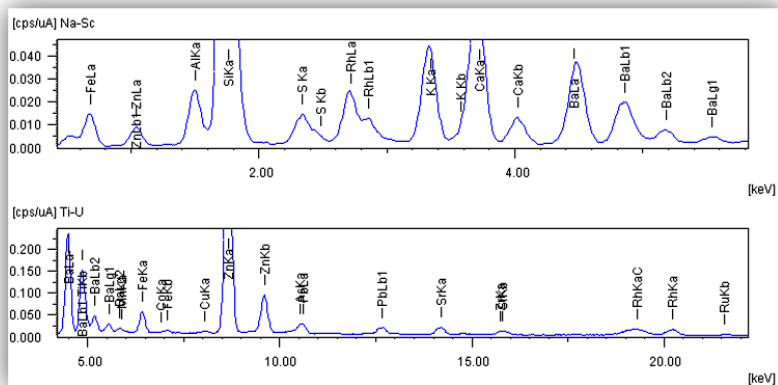
DATOS CUANTITATIVOS "COMANDO POLICIA FLORIDABLANCA"												
Estación	Filtro	Peso inicial (mg)		Peso final (mg)		PM ₁₀ (mg)	PM ₁₀ (µg)	Presión (mmHg)	Volumen 1 (m³)	Volumen 2 (m³)	Concentración (µg/m³)	ET (Hora:min)
Invierno	CPF-F3	2	86,2	2	87,7	1,4	1400	683	24,043	21,6071	64,7936	23:59
		3	86,3	3	87,6							
		$\bar{X}$	86,2667	$\bar{X}$	87,7000							
	CPF-F4	1	86,2	1	87,2	0,9666	966,6	682	24,044	21,5763	44,7991	23:59
		2	86,2	2	87,1							
		3	86,1	3	87,1							
	$\bar{X}$	86,1667	$\bar{X}$	87,1333								
	CPF-F5	1	85,8	1	87,2	0,7333	733,3	682	24,045	21,5772	33,9849	23:59
		2	86,1	2	86,9							
		3	86,0	3	87,00							
	$\bar{X}$	85,9667	$\bar{X}$	87,0333								
	CPF-F6	1	86,9	1	88,1	1,2334	1233,4	681	32,257	28,9040	42,6723	32:12:00
		2	86,8	2	88,0							
		3	86,8	3	88,10							
	$\bar{X}$	86,8333	$\bar{X}$	88,0667								
	CPF-F7	1	87,0	1	86,5	0,2334	233,4	681	24,044	21,5447	10,8333	23:59
2		86,6	2	86,5								
3		86,4	3	86,3								
$\bar{X}$	86,6667	$\bar{X}$	86,4333									
Verano	CPF-F8	1	86,8	1	87,4	0,6334	633,4	680	24,04	21,5095	29,4475	23:59
		2	86,9	2	87,6							
		3	86,8	3	87,4							
	$\bar{X}$	86,8333	$\bar{X}$	87,4667								
	CPF-F9	1	86,4	1	87,3	0,7667	766,7	682	24,04	21,5727	35,5402	23:59
		2	86,4	2	87,2							
		3	86,4	3	87,0							
	$\bar{X}$	86,4000	$\bar{X}$	87,1667								
	CPF-F10	1	86,4	1	87,2	1,0333	1033,3	682	24,044	21,5763	47,8905	23:59
		2	86,4	2	87,6							
		3	86,4	3	87,5							
	$\bar{X}$	86,4000	$\bar{X}$	87,4333								

Anexo G. Perfiles Fluorescencia de Rayos-X filtros blanco e invierno y verano

Perfil Filtro Blanco



Perfil Filtro CFP-F2 –invierno



Perfil Filtro CTS-F7 –verano

