

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea del CRAI-USTA y el Repositorio Institucional en la página Web de la CRAI-USTA, 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.”

**Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

Determinación de metales pesados en el material particulado fracción respirable PM₁₀ de la estación de monitoreo Ciudadela Real de Minas de la ciudad de Bucaramanga.

Dina Margarita María Bermúdez Ortiz y Luisa Fernanda Suárez

Trabajo de grado para optar el título de Química Ambiental

Director

**Alix Estela Yusara Contreras Gómez
Ing. Ambiental y Sanitaria**

Codirector

**Angélica María Candela Soto
Química, M. Sc, Ph. D**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga
División de Ingenierías y Arquitectura
Facultad de Química Ambiental
Floridablanca
2018**

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a Dios quien nos iluminó y brindó la sabiduría necesaria para culminar este proceso.

A nuestros padres, por su inmenso amor, incondicionalidad y sacrificios realizados. Dedicamos a ustedes esta parte de nuestros sueños.

A nuestros familiares y amigos por animarnos día a día y compartir alegrías y conocimiento a lo largo de este camino.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a nuestra directora de trabajo de grado, la ingeniera ambiental Alix Estela Yusara Contreras Gómez, por confiar en nuestro trabajo, por su constante dirección, paciencia, esfuerzo y asesoría en el desarrollo de este trabajo investigativo.

A nuestra codirectora, Angélica María Candela Soto, agradecemos su paciencia, tiempo e importantes aportes que ayudaron a enriquecer la investigación y análisis del proyecto.

Agradecemos a la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga por la colaboración con el proyecto de grado suministrando información meteorológica, filtros y concentraciones de PM₁₀.

A la Universidad Santo Tomás por brindar los espacios, recursos y equipos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

Agradecemos al grupo de investigación GINMEA por sus importantes aportes económicos e investigativos.

Al laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Universidad Santo Tomás por sus servicios prestados.

Tabla de contenido

	Pág.
1. Planteamiento del problema.....	13
2. Justificación	14
3. Objetivos	16
3.1 Objetivo general.....	16
3.2 Objetivo específicos.....	16
4. Marco referencial	17
4.1 Marco teórico	17
4.1.1. Contaminación atmosférica	17
4.1.2 Material particulado	17
4.1.2.1. Material particulado en la salud	18
4.1.3. Metales pesados	19
4.1.3.1. Metales pesados en la salud	20
4.1.4. Técnicas de caracterización química de metales pesados	22
4.1.4.1. Espectroscopia de absorción atómica	23
4.1.5 Rosa de los vientos.....	24
4.1.5.1 Software para crear rosas de viento.	24
4.1.6. Red de monitoreo de la calidad del aire.....	25
4.2. Marco de antecedentes	26
4.3 Marco normativo.....	33
4.3.1 Guías para la calidad del aire OMS	33
4.3.2 Resolución 2254 de 2017.....	33
4.3.3 Resolución 610 de 2010.....	35
4.3.4 Decreto 979 del 2006	35
4.3.5 Índice de la calidad del aire de Bucaramanga (IBUCA).....	36
4.3.6 Índice de la calidad del aire (ICA)	37
5. Metodología	39
5.1 Selección de las muestras.....	39
5.2 Análisis de la calidad del aire del área seleccionada	40
5.2.1 Determinación del IBUCA	40
5.2.2 Determinación del ICA	41
5.2.2 Elaboración de la rosa de los vientos.....	41
5.3 Caracterización del material particulado PM ₁₀	42
5.3.1 Pesaje de filtros	42
5.3.2 Dopaje de los filtros	43
5.3.3 Extracción de los filtros con ácido caliente	43
5.3.4 Técnica analítica	44
5.3.5 Límite de detección y límite de cuantificación	44
5.3.6 Porcentaje de recuperación	45
6. Resultados y discusión.....	47
6.1 Contexto del área	47

6.1.1 Fuentes de emisión.....	50
6.1.1.1 Fuentes fijas	51
6.1.1.2 Fuentes móviles	51
6.2 Meteorología	54
6.3 Comportamiento del material particulado	57
6.4 Análisis de la calidad del aire	59
6.4.1 Índice de la calidad del aire de Bucaramanga.....	59
6.4.2 Índice de la calidad del aire	61
6.5 Cuantificación de metales pesados en el PM ₁₀	62
6.5.1 Límite de Detección y Límite de Cuantificación	63
6.5.2 Cobre.....	63
6.5.3 Níquel.....	67
6.5.4 Plomo	70
6.5.5 Zinc	73
7. Conclusiones	77
8. Recomendaciones	79
9. Divulgación de los resultados	80
Referencias bibliográficas.....	81
Apéndices.....	92

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Estación meteorológica de ciudadela - real de minas.....	49
Figura 2. Panorámica de la estación meteorológica.....	49
Figura 3. Ubicación geográfica de la estación de muestreo.....	48
Figura 4. Ubicación geográfica fuentes móviles y fijas en el área de estudio.	50
Figura 5. Inventario de fuentes móviles en el año 2016.	52
Figura 6. Inventario de fuentes móviles en el año 2017.	53
Figura 7. Rosa de vientos correspondiente al año 2016.....	55
Figura 8. Rosa de vientos correspondiente al año 2017.....	56
Figura 9. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio de PM_{10} en la semana de estudio del año 2016....	57
Figura 10. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio diario de PM_{10} en la semana de estudio del año 2017.....	58
Figura 11. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio de PM_{10} en la semana de estudio del año 2017..	59
Figura 12. IBUCA PM_{10} del mes de junio del año 2016 y 2017	60

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Ordenamiento según diámetro del material particulado.	18
Tabla 2. Fuentes antropogénicas de metales pesados	20
Tabla 3. Estaciones de la red de monitoreo de la calidad de aire de Bucaramanga.....	26
Tabla 4. Valores guía de la OMS para los contaminantes “clásicos” del aire	33
Tabla 5. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio.....	34
Tabla 6. Niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos en el aire.	34
Tabla 7. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para los niveles de prevención, alerta o Emergencia.	35
Tabla 8. Medidas específicas de cada nivel, cuando la declaratoria se deba a material particulado y/o dióxido de azufre.	36
Tabla 9. Normas Nacionales de calidad del Aire utilizadas en el cálculo del IBUCA.....	37
Tabla 10. Valores y descripción epidemiológica del IBUCA.....	37
Tabla 11. Numero de industrias del sector de estudio.	51
Tabla 12. Sitios de monitoreo y sentidos de la observación para el análisis de fuentes móviles.	51
Tabla 13. Parámetros de operación del equipo de absorción atómica por llama.....	44
Tabla 14. Factores para la determinación de metales pesados en el material particulado (PM_{10})	45
Tabla 15. Límites de detección del EAA	63
Tabla 16. Concentración de cobre en la Est. Ciudadela Real de minas – 2016.....	64
Tabla 17. Concentración de cobre en la Est. Ciudadela Real de minas – 2017	64
Tabla 18. Comparación de resultados con otros estudios	66
Tabla 19. Concentración de níquel en la Est. Ciudadela Real de minas – 2016.....	67
Tabla 20. Concentración de níquel en la Est. Ciudadela Real de minas – 2017.....	68
Tabla 21. Comparación de resultados con otros estudios	69
Tabla 22. Concentración de plomo en la Est. Ciudadela Real de minas – 2016	70
Tabla 23. Concentración de plomo en la Est. Ciudadela Real de minas – 2017	71
Tabla 24. Comparación de resultados con otros estudios	72
Tabla 25. Concentración de zinc en la Est. Ciudadela Real de minas – 2016.....	74
Tabla 26. Concentración de cobre en la Est. Ciudadela Real de minas – 2017.....	74
Tabla 27. Comparación de resultados con otros estudios	75

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Solicitud de datos dirigida a la CDMB para el suministro de información del material particulado y meteorología.	92
Apéndice B. Formato de campo para el monitoreo de fuentes móviles.....	93
Apéndice C. Concentración de material particulado colectado en la estación Ciudadela real de minas en el año 2016.....	94
Apéndice D. Concentración de material particulado colectado en la estación Ciudadela real de minas en el año 2017.....	95
Apéndice E. Curva de calibración de cobre	96
Apéndice F. Curva de calibración de níquel	97
Apéndice G. Curva de calibración de plomo	98
Apéndice H. Curva de calibración de zinc.....	99
Apéndice I. Porcentajes de recuperación de los metales en los filtros de los cuatro metales de estudio.	100
Apéndice J. Determinación del límite de detección.....	101
Apéndice K. Determinación del límite de cuantificación	102

Glosario

Contaminación: Es la introducción o incremento anormal de microorganismos o sustancias tóxicas que pueden ejercer un efecto dañino en el agua, aire o suelo y en los organismos en el medio ambiente, debido a su cantidad o composición química, inhibe el normal funcionamiento de procesos naturales, ocasionando efectos indeseables para la salud y el medio ambiente (Merriam, 2018).

Contaminante: Es toda sustancia indeseable que se introduce en el medio ambiente, generalmente causando efectos para la utilidad de un recurso o para la salud de los seres humanos, animales o ecosistemas (GreenFacts, 2017).

Contaminante del aire: Elemento o componente en el aire que, en altas concentraciones, perjudica a los seres humanos, vegetación y animales. (Contaminación-Aire, s.f.).

Emisión: Conjunto de sustancias liberadas hacia la atmósfera, por la actividad humana ya sea industrial o doméstica (Ramos Miras, 2002).

Exposición: La cantidad de radiación o contaminante presente en un ambiente dado que representa una amenaza potencial a la salud de los organismos vivos (Ramos Miras, 2002).

Límite de cuantificación: Es la cantidad más pequeña de analito en una muestra que puede ser cuantitativamente determinada con precisión y exactitud bajo las condiciones experimentales establecidas. (Chica, Galvis, & Madrid, 2007)

Límite de detección: Es la cantidad más pequeña de analito en una muestra que puede ser detectada, con un nivel de confianza determinado, pero no necesariamente cuantificado con un valor exacto. (IDEAM, 2006)

Metales pesados: Elementos metálicos con pesos atómicos y densidad relativamente alta, pueden presentar cierta toxicidad a los seres vivos en pequeñas concentraciones (Roca Jusmet & Padilla Rosa, 2003).

Monitoreo: Un proceso sistemático o manual, con el fin de reunir y analizar información para realizar un seguimiento (IMAS de Educación en el Riesgo de las Minas, 2005).

Morbilidad: Tasa de la incidencia de una enfermedad determinada (García, 2000).

Mortalidad: Tasa de defunciones en cierto grupo de personas en un tiempo determinado (García, 2000).

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 (Querola, y otros, 2001).

Tóxico: Todo aquel elemento o compuesto químico que, absorbido e introducido en el medio interno y metabolizado, es capaz de producir lesiones en los aparatos y sistemas orgánicos de la economía e incluso provocar la muerte (Bello Gutiérrez & López De Cerain Salsamendi, 2001).

Resumen

El presente estudio, describe los resultados de los registros contenidos en la red de monitoreo de la calidad del aire, evaluando la composición elemental de Cu, Ni, Pb y Zn en la fracción respirable del aire PM₁₀. Las muestras fueron colectadas en la estación ubicada en el colegio Aurelio Martínez Mutis de la calle de los estudiantes, utilizando un muestreador de alto volumen con filtros de fibra de cuarzo, en muestreos de 24 horas, con una frecuencia de siete días. Los periodos de estudio comprenden del 27 de mayo al 2 de junio de 2016 y del 19 de junio al 25 de junio de 2017, periodos con presencia y receso escolar respectivamente.

El proceso de extracción se realizó siguiendo el método IO-3.1, estandarizado por la EPA y para la lectura de los metales se usó el método IO-3.2 mediante la técnica de absorción atómica. Los niveles promedio de material particulado en el año 2016 (34, 6 µg/m³) y 2017 (35, 4 µg/m³), no excedieron estándares nacionales e internacionales. Los resultados encontrados indican que el Cu y Ni son los metales más abundantes en las muestras, a diferencia de Pb y Zn que se encontraron en menor proporción.

Palabras Clave: PM₁₀, cobre, níquel, plomo, zinc, absorción atómica.

Abstract

This study describes the results of the records contained in network monitoring air quality, evaluating the elemental composition of Cu, Ni, Pb and Zn in the respirable fraction of air PM₁₀. Samples were collected at the station located in school Aurelio Martinez Mutis Street students using a high-volume sampler with quartz fiber filters at sampling 24 hours with a frequency of seven days. Study periods comprise from 27 May to 2 June 2016 and 19 June to 25 June 2017, with the presence and school periods respectively recess.

The extraction process was carried out following the method IO-3.1, standardized by the EPA and for the reading of the metals, the IO-3.2 method was used by the atomic absorption technique. The average particulate levels in 2016 (34, 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) and 2017 (35, 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) did not exceed national and international standards. The results indicate that the Cu, Ni and Zn are the most abundant metal in the samples, unlike Pb was found to a less proportion.

Key words: PM₁₀, copper, nickel, lead, zinc, atomic absorption.

1. Planteamiento del problema

En las últimas décadas, el requerimiento de la calidad del aire en las grandes ciudades del mundo obedece principalmente a una preocupación masiva de los organismos ambientales por el impacto que tienen los contaminantes atmosféricos en la salud de la población (Clean Air Institute, 2012). De esta manera, en Bucaramanga, existen diferentes fuentes de material particulado sólido en suspensión (PM₁₀) presentes en el aire y que están asociados principalmente a las actividades comerciales, de transporte y centros industriales (Tobón Orozco, Sánchez Gandur, & Cárdenas Londoño, 2006).

La fracción respirable del material particulado PM₁₀ generalmente contiene trazas de metales pesados adheridos, que ingresan a los seres humanos por las vías respiratorias, generando efectos tóxicos ya sea por su composición o por su incidencia a mediano y largo plazo. Cada metal tiene un mecanismo de acción y un lugar de acumulación dentro del organismo de un ser vivo; los daños que causan son severos y en ocasiones ausentes de síntomas. (Revilla, 2009)

El sector de estudio, Ciudadela Real de Minas, está altamente influenciado por las concentraciones de material particulado y por consiguiente de metales pesados, debido a que se encuentra en una zona con alta densidad de tráfico. Esto se considera una amenaza hacia la población receptora (viviendas, centros educativos y comercio), dado que afectan la calidad del aire y guardan relación directa sobre la salud.

Dada la trascendencia, este estudio evaluará y establecerá la presencia de los metales pesados cobre, níquel, plomo y zinc, en el material particulado PM₁₀ filtrado en la estación Ciudadela Real de Minas de la ciudad de Bucaramanga. Hasta el 2017, no se han establecido estudios de metales pesados en la estación mencionada, por lo que se espera que la publicación del presente estudio

tenga un impacto y sea un aporte valioso para las decisiones que en adelante tome la CDMB con relación a este sector.

2. Justificación

A escala local, en Bucaramanga, se emiten a la atmosfera partículas y gases nocivos que afectan potencialmente la salud humana, el medio ambiente y a largo plazo deterioran los recursos para el desarrollo ambiental de las áreas urbanas. (OMS, 2004). En este sentido, se han reportado los metales pesados como parte de los contaminantes identificados en el aire. Las emisiones de metales pesados, en este caso, cobre, níquel, plomo y zinc a la atmósfera se asocian con fuentes naturales y fuentes antropogénicas (fuentes fijas y móviles), siendo estas últimas las de mayor importancia. (Zafra, Temprano, & Tejero, 2011).

Los metales como cobre, níquel, plomo y zinc se pueden atribuir a la combustión de vehículos automotores, principalmente de motores diésel, el desgaste de neumáticos o el desgaste de los forros de frenos y la combustión de carbón. Debido a su carácter acumulativo y de permanencia, estos metales pueden incorporarse al cuerpo humano a través del aire y actuar como poderosos agentes tóxicos para los seres humanos y para los ecosistemas. (Callender, 2003) Los efectos de cobre a exposiciones prolongadas pueden irritar la nariz, la boca, los ojos y causar dolores de cabeza. (ATSDR, 2004). El efecto adverso más común de la exposición a níquel es una reacción alérgica, que desarrolla dermatitis o eczemas (ATSDR, 2005). El plomo a diferencia de otros metales, puede afectar casi todos los órganos y sistemas del cuerpo, la exposición a altos niveles puede dañar seriamente el cerebro y los riñones. (ATSDR, 2007) La inhalación de grandes cantidades de polvos o vapores de zinc puede producir una enfermedad de corta duración llamada fiebre de vapores de metal. (ATSDR, 2005)

En Colombia, la Resolución 2254 del 01 de noviembre de 2017 regula las concentraciones de contaminantes tóxicos y criterio en el aire, en la que se establece la norma de calidad del aire y se adoptan las disposiciones para la gestión del mismo. El análisis de metales pesados en el material particulado PM₁₀ del sector de Ciudadela Real de Minas aún no se ha realizado, por esta razón se determinó el contenido de las trazas de cobre, níquel, plomo y zinc en los filtros, con el fin de conocer el estado de la calidad del aire.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Determinar la presencia de metales (cobre, níquel, plomo y zinc) en el material particulado (PM₁₀) de la estación de Ciudadela Real de Minas de la red de monitoreo de la calidad del aire de Bucaramanga, mediante la técnica de espectroscopía de absorción atómica de llama.

3.2 Objetivo específicos

- Evaluar el comportamiento del material particulado PM₁₀ y el índice de calidad del aire de Bucaramanga – IBUCA – para el periodo de muestreo, en la estación de Ciudadela Real de Minas de la red de monitoreo de la calidad del aire de Bucaramanga, a partir de la información reportada por la CDMB
- Analizar la información meteorológica que influye en la dispersión del material particulado PM₁₀ suspendido en el aire para el sector de Ciudadela Real de Minas de la ciudad de Bucaramanga, mediante la gráfica de rosa de vientos.
- Cuantificar la presencia de cobre, níquel, plomo y zinc en el material particulado PM₁₀ monitoreado por la CDMB en el periodo de muestreo de la estación de Ciudadela Real de Minas, mediante la técnica de espectroscopía de absorción atómica.

4. Marco referencial

4.1 Marco teórico

4.1.1. Contaminación atmosférica

Se puede definir la contaminación atmosférica como la presencia de sustancia o componentes que de una u otra forma alteran o participan en el desmejoramiento de la calidad del aire (Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

La contaminación al aire conlleva riesgos y daños graves para el bienestar del ambiente y así mismo de los seres vivos, creando afecciones en las actividades humanas. Los contaminantes atmosféricos más comunes son el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre, los hidrocarburos, los oxidantes fotoquímicos y las partículas (Oyarzun G., 2010). En cuanto a la composición de las partículas se encuentra cierta diversidad como: metales pesados, silicatos y sulfatos, entre otros y están directamente relacionados con emisiones de gases, vapores, polvos y aerosoles. Estos, al difundirse a la atmósfera, se integran en los distintos ciclos biogeoquímicos que se desarrollan en la Tierra (Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

4.1.2 Material particulado

La materia particulada o simplemente ‘partícula’ es un término que se emplea para describir la materia sólida y líquida, dispersa y arrastrada por el aire. (Gonzalez Castanedo, 2012) En general las partículas arrastradas por el aire varían según su tamaño como se puede apreciar en la tabla 1 (Requena Rodríguez & Tomás Balibrea, 2008). Esta variación en tamaño hace que existan diferencias en su comportamiento en cuanto a su movimiento y velocidad de asentamiento (Gonzalez Castanedo, 2012).

Tabla 1.
Ordenamiento según diámetro del material particulado.

Partículas	Diámetro (µm)	Denominación
Ultrafinas	<1	PM ₁
Finas	Menor a 0 igual a 2,5	PM _{2,5}
Gruesas	Mayor a 2,5 igual a 10	PM ₁₀
Suspendidos totales	Hasta 50	PST

Nota: Adaptado de Sbarato & Ortega, s.f.

En variedad de estudios han determinado que el material particulado está compuesto por material geológico, sulfatos y nitratos de amonio, material orgánico, y elementos trazas, etc. En general, estas partículas se combinan con algunas sustancias del aire, creando una formación de compuestos inorgánicos como orgánicos, siendo el sulfato el más común de ellos (Canales-Rodríguez, Quintero-Núñez, Castro-Romero, & García-Cuento, 2014).

Además, es estimado que el material particulado como una mezcla heterogénea a la que normalmente está expuesta la humanidad, tienen la capacidad de penetrar las vías respiratorias (Organización Mundial de la Salud, 2016). Existe plena evidencia científica de la relación entre la presencia de éstas con los problemas significativos en la salud de la población en general (Gonzalez Castanedo, 2012). Las concentraciones de este contaminante en Bucaramanga sobrepasan en varias ocasiones los límites que aconsejan la Normatividad Ambiental (Dennis R1, y otros, 2004).

4.1.2.1. Material particulado en la salud

Los factores más importantes para la absorción en el sistema respiratorio de los contaminantes presentes en partículas son su tamaño y solubilidad en agua (Organización Mundial de la Salud, 2016). El diseño de las vías respiratorias favorece la deposición de partículas en sus paredes. El

punto donde se depositan las distintas partículas está determinado fundamentalmente por su tamaño (Fundación para la Salud Geoambiental, 2013).

Las partículas de 2,5 a 10 μm se depositan en la tráquea, bronquios y bronquiolo, viéndose sometidas de inmediato hacia la faringe y el sistema digestivo y las partículas de tamaño superior a 10 μm penetran en los pulmones. Partículas de tamaño inferior a 2,5 μm son capaces de llegar al interior de los alvéolos pulmonares, donde las más hidrosolubles se disuelven y los que presentan mayor solubilidad se depositan. La eliminación o absorción subsiguiente de estas partículas tiene lugar por fagocitosis o por drenaje hacia el sistema linfático. Los macrófagos pulmonares fagocitan la partícula y pasan al torrente sanguíneo (Fundación para la Salud Geoambiental, 2013).

El material particulado está asociado con compuestos con conocida actividad carcinogénica y genotóxica. Generando molestias que involucran visitas permanentes al médico, ataques de asma, síntomas respiratorios, síntomas visuales y disminuciones de la función pulmonar. Los más afectados son la población sensible (niños menores de 5 años y personas de la tercera edad) y su peligrosidad depende del tamaño y con las sustancias que se adhieren a su superficie (Solarte, Caicedo, & Restrepo, 2002).

4.1.3. Metales pesados

Los metales pesados se definen como aquellos que poseen una gravedad específica mayor a 5 $\mu\text{g}/\text{cm}$, son contaminantes inorgánicos desarrollados, considerados como no biodegradables ya que una vez liberados al ambiente no se descomponen y por el contrario persisten (Carnicer, 2008). Estos contaminantes son liberados al ambiente por procesos naturales y antropogénicos, tal como se muestra en la tabla 2; su exposición es altamente reconocida como una amenaza para la salud humana. (Ferrer, 2003).

Tabla 2.

Fuentes antropogénicas de metales pesados

Metales pesados	Fuentes
Cobre (Cu)	Emisión de vehículos (Combustión diésel y desgaste de frenos) Emisiones por parte de honor de fundición.
Níquel (Ni)	Combustión de petróleo y carbón. Producción y reciclaje de baterías Níquel - Cadmio.
Plomo (Pb)	Producción de acero, plásticos y pigmentos. Combustión del carbón Gasolina Incineración de residuos
Zinc (Zn)	Fundición de acero Quema de incineradores, caldera de carbón. Incineración de residuos. Emisión del vehículo (emisiones del motor de gasolina y desgaste de los neumáticos).

Adaptado por Qi-Li, y otros, 2015

4.1.3.1. Metales pesados en la salud

Los metales pesados constituyen un riesgo considerable para la salud por el contacto frecuente laboral y ambiental, han sido relacionados en humanos debido a la gravedad de intoxicación que originan (Tchounwou, Yedjou, Patlolla, & Sutton, 2012). La Agencia estadounidense para el registro de sustancias tóxicas y enfermedades confiere que las mayores amenazas para la salud humana por parte de los metales pesados, están asociadas a la exposición a plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), arsénico (As) y Níquel (Ni), siendo el plomo y el cadmio los más tóxicos para humanos y animales puesto que afectan principalmente el sistema nervioso central y los riñones, respectivamente (Carnicer, 2008).

Los metales como elementos son indestructibles y, por tanto, tienen el potencial para acumularse en el cuerpo provocando efectos crónicos. La única forma en que pueden ser

eliminados del cuerpo es por excreción. La tasa y vías de excreción varían de un metal a otro. (Ferrer, 2003).

Plomo: Por vía aérea son involucrados varios factores: El tamaño de las partículas, la composición del aire y el tipo de plomo inhalado (carbonato, óxidos, sulfatos, fosfatos). La principal vía de entrada es la respiratoria. Los efectos del plomo son adquiridos por medio de la inhalación e ingestión son similares ambas rutas de exposición. Las principales fuentes de emisión de este metal en la atmósfera han sido atribuidas a la fabricación de baterías y combustión de la gasolina, aunque en el país ha sido retirada la gasolina plomada del mercado, también son consideradas como fuentes de contaminación de este metal la combustión de residuos sólidos, emisiones de producción de hierro y acero, manufactura de vidrio y los lodos de las depuradoras de aguas ya que estas contienen, comúnmente el plomo y diversos metales (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016).

Es persistente en el medio ambiente, es bioacumulable y tóxico para el medio ambiente, La intoxicación por plomo se le llama saturnismo; En el ser humano provoca desórdenes en las células de la sangre y graves efectos en el sistema nervioso central y reproductivo (McKeown, 2008).

Níquel: Especialmente empleado como cubierta metálica, en cerámicas de color y para hacer baterías. Las principales afecciones sobre la salud sobre humanos son las reacciones alérgicas, irritación en los ojos y piel. En altas concentraciones de níquel ($>0,18\mu\text{g}/\text{m}^3$) ingeridas ocasionan dolor de estómago y efectos adversos en sangre, riñones y pulmones. El Departamento de Salud y Servicios Humanos de USA (*United States Department of Health and Human Services –DHHS–*) ha determinado que el níquel puede ser posiblemente un carcinógeno (catalán-Vázquez, Riojas-Rodríguez, Jarillo-Soto, & Delgadillo-Gutiérrez, 2009).

Zinc: Se encuentra de forma natural en el aire, agua y suelo, pero a medida del tiempo su concentración ha ido aumentando por causas no naturales, a través de las actividades humanas (López de Romaña, Castillo D., & Díaz granados, 2010). La mayoría de compuestos de este metal como el óxido de zinc es agregada durante actividades industriales, como la minería, la combustión de carbón, residuos y el procesado del acero. Una alta cantidad de Zinc puede también causar problemas de salud notables, como es irritación de la piel, vómitos y anemia, además puede afectar el páncreas y alterar el metabolismo de las proteínas, y causar desordenes respiratorios (Brender, y otros, 2010).

Cobre: Considerado como elemento esencial en el ser humano, se encuentra de forma natural en el suelo, rocas, agua y el aire. No obstante, la exposición a dosis altas puede ser perjudicial. La exposición continua a polvos de cobre puede irritar los ojos, la nariz, la boca y causar dolores de cabeza, mareo, náusea y diarrea. En la EPA no ha sido clasificado en cuanto carcinogenicidad en seres humanos porque no hay estudios adecuados en seres humanos (ATSDR, 2004).

Este elemento es liberado principalmente industrias mineras, en la producción de químicos (pinturas, barnices, tintas), en la fundición de acero, Cu y Zn y por la utilización de algunos combustibles en los procesos como el carbón, crudo y gas natural. El cobre también es liberado por el polvo que generan los incendios forestales y por la vegetación en descomposición. (Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., 2004)

4.1.4. Técnicas de caracterización química de metales pesados

Para el análisis cualitativo y cuantitativo de muestras de elementos traza presentes en muestras biológicas y ambientales, existen diversas técnicas tales como: espectroscopia de masas (ICP-AES, MS) y espectroscopia de absorción atómica –AAE-, las cuales requieren que las muestras sean

líquidas. Siendo esta última, la técnica de caracterización química utilizada en la presente investigación.

4.1.4.1. Espectroscopia de absorción atómica

La espectroscopia de absorción atómica con llama es el método más empleado para la determinación de metales en agua, aire y suelos, Actualmente la aplicación de la técnica está siendo implementada en el análisis de partículas suspendidas en el aire (Frederic Walton & Reyes, 2005). Esta técnica tiene como fundamento la absorción de radiación de una longitud de onda determinada que es absorbida selectivamente por átomos con niveles energéticos la diferencia en energía corresponderá a la energía de los fotones incidentes. La ley de Beer indica la cantidad de fotones absorbidos, que relaciona esta pérdida de poder radiante, con la concentración de la especie absorbente y con el espesor de la celda o recipiente que contiene los átomos absorbentes (Walton, F., & Reyes, 1983).

Los componentes instrumentales de un equipo de espectroscopia de absorción atómica son los similares a los de un fotómetro o espectrofotómetro de llama, excepto que en AAE se requiere de una fuente de radiación necesaria para excitar los átomos del analito (Frederic Walton & Reyes, 2005).

En los instrumentos de AAE, la llama fragmenta y excita los componentes de las muestras. Estos componentes emiten una radiación electromagnética de diferentes longitudes de onda que son separadas en el monocromador y la línea de interés llega al detector, al amplificador y finalmente al sistema de lectura.

Las bajas temperaturas de la flama, delimitan la aplicación práctica de la AAE en flama a los elementos más fáciles de excitar, como son los elementos alcalinos (Li, Na, K, Rb, Cs) y los

alcalinotérreos (Ca, Mg, Sr, etc.) (González Delgado, Orozco Barrenetxea, Pérez Serrano, Alfayate Blanco, & Rodríguez Vidal, 2003).

4.1.5 Rosa de los vientos

Las reducciones de descargas de contaminantes hacia la atmósfera están directamente relacionadas con las condiciones meteorológicas, en donde la dispersión de las descargas es transportada 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, en donde estadísticamente se muestran las condiciones meteorológicas de un tiempo determinado (EPA, 2016).

4.1.5.1 Software para crear rosas de viento.

WRPLOT View -Wind Rose Plot View- es un software gratuito que está planteado para el análisis de los datos del viento, basado en el ingreso de datos meteorológicos y es empleado para calcular estadísticas de frecuencia de viento de 16 direcciones. Como finalidad de este programa es obtener una gráfica del levante del viento en cada sector eólico (WRPLOT View, 2016). El programa WRPLOT View es especializado en Rosas de los Vientos y ejecutor de datos meteorológicos, 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 dado (WRPLOT View, 2016). La Rosa de Vientos se caracteriza por representar:

- Datos meteorológicos.
- Análisis de datos meteorológicos mostrando parcelas.
- Tablas y gráficos de distribución de frecuencia de los vientos.

Presenta una compatibilidad con todos los formatos de archivo más comunes. Aquellos que no lo son, se pueden importar de Excel. Además, una cómoda visualización de la Rosa de los Vientos en Google Earth, donde se tiene el control radio máximo y altura (WRPLOT View, 2016).

4.1.6. Red de monitoreo de la calidad del aire

El área Metropolitana de Bucaramanga desde el año 2000 cuenta con una red de monitoreo de la calidad del aire, que reúne características de calidad, operatividad, garantía y expansión que la ubica a la altura de las mejores a nivel nacional e internacional. La ciudad de Bucaramanga y la Corporación de la Meseta de Bucaramanga encontraron la importancia de visualizar la contaminación atmosférica afectación a la salud humana (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga).

Esta red de monitoreo de la calidad del aire cuenta con 8 estaciones de monitoreo de las cuales 5 son automáticas y 3 manuales en diferentes puntos importantes de la ciudad como se observa en la tabla 3. Estas estaciones permiten obtener los registros de concentraciones horarias de contaminantes en determinadas unidades de medida, las cuales son estudiadas en periodos de exposición y presentadas a la comunidad a través de un indicador de calidad del aire que permite visualizar la contaminación en niveles y colores según la afectación a la salud humana (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, s.f.).

Tabla 3.

Estaciones de la red de monitoreo de la calidad de aire de Bucaramanga.

Estación	Tipo	Ubicación	Medición
Centro	Automática	Carrera 15 con calle 34 terrazza nor occidental	NO _x , SO ₂ , CO, O ₃ , PM ₁₀ , Meteorología
Semiautomática	Centro	PM _{2.5}	
Ciudadela	Automática	Calle de los estudiantes Terraza Colegio Aurelio Martínez Mutis	NO _x , CO, O ₃ , PM ₁₀ , Meteorología
Florida	Automática	Terraza edificio Telebucaramanga sede sur cañaveral	O ₃ y PM ₁₀
Cabecera	Automática	Carrera 33 con calle 52	NO _x , SO ₂ , CO, O ₃ , PM ₁₀
Norte	Automática	Terraza del Hospital local del Norte	O ₃ , PM ₁₀ , Meteorología
La concordia	Manual	Carrera 21 N° 51-20	PM ₁₀
Dirección de transito	Manual	Oficinas del DTB: Diagonal 15 con carrera 17	PM ₁₀
La Joya	Manual	Carrera 11 Occ N° 36 -04	PM ₁₀

Adaptado por Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga)

4.2. Marco de antecedentes

El material particulado (PM) presente en el ambiente está compuesto por diversas especies químicas que incluyen, entre otras, metales, aniones, cationes y carbono orgánico y elemental. La técnica conocida como “caracterización del material particulado” comprende la identificación y cuantificación de dichas especies a través de la aplicación de diversas técnicas de análisis fisicoquímicos.

En Rio de Janeiro, Brasil, Quiterio, S; Escaleira, V; Sousa, realizaron la caracterización físico-química de las partículas suspendidas totales generadas por el alto flujo de vehículos pesados en el sector. El análisis de metales traza (Mn, Zn, Cr, Fe, Al, Cd, Cu, Ni, Pb) se realizó mediante espectroscopia de emisión por plasma de acoplamiento inductivo (ICP - OES), en donde se encontraron altas concentraciones para Cadmio (2203.6 ng /m⁻³), Sodio (2546.0 ng/m⁻³) y hierro

(1212.8 ng /m⁻³) atribuidas probablemente a insumos naturales (Quiterio, Escaleira, Sousa, Maia, & Arbilla, 2004).

Por otra parte, Mauricio Velasco Gracias en el año 2005, en la ciudad de Manizales realizó la determinación cuantitativa de las concentraciones de metales pesados por el método de absorción atómica y la cuantificación de material particulado en el aire en 3 estaciones que conforman la red de calidad del aire de la ciudad de Manizales, mediante análisis físico-químicos, los metales determinados en los resultados Hg, Ni, Cr, Pb, Cd en todas las estaciones y en diferentes concentraciones (Velasco Garcia, 2005).

Además de los estudios ya mencionados, se han publicado numerosos trabajos sobre los niveles y caracterización de PM₁₀ en diferentes países y sobre todo en Colombia como en la ciudad de Bogotá. En el año 2006, Cristhian Fabián Ruiz Ramos realizo la caracterización del material particulado en las principales vías de transporte público de dicha ciudad. El estudio explorativo se basó en la caracterización de cierto número de muestras por medio de espectrometría de absorción atómica con horno de grafito, determinando la presencia de metales como: Plomo, Cromo, Manganeso, Cobre y Cadmio, siendo así el análisis arrojo que la mayor concentración de metales en el PM₁₀ es Mn, Cu, Cd y Cr (Ruiz Ramos, 2006).

En un estudio realizado en la localidad de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá, se determinó la presencia de cinco metales pesados Pb, Cu, Cr, Zn y Fe en la fracción respirable del aire (PM₁₀) mediante la técnica de EAA; el muestreo se realizó durante 10 días consecutivos en los meses de junio y julio de 2005. Los metales con mayor concentración fueron el Fe y el Pb, debido principalmente a actividades industriales de la zona. (Perez Fadul & Hernandez Hernandez, 2006).

Un estudio realizado en las ciudades de Barranquilla, Bogotá, Bucaramanga, Cali, Medellín, Nobsa y Pereira en el año 2008, determinaron la concentración de los metales Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Si, V y Zn contenidos en el PM₁₀ a través de espectrofotometría de absorción atómica. Los metales más abundantes encontrados en el PM₁₀ fueron Si y el Ca, a diferencia de Cd, Mn y Cu que se encontraron en menor proporción (Caro Marciales & Uribe Laverde, 2008).

En el año 2009 y 2010, la CDMB y el grupo de investigación en energía y medio ambiente GIEMA-UIS, realizó un análisis de la composición físico-química del material particulado recolectado en los sectores de Cañaveral, Ricaurte, La Joya y San Miguel de la ciudad de Bucaramanga. La cuantificación de los iones metales (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄⁻², Ca, Pb, Cu, Fe, Zn, Al) fue determinada mediante el método de cromatografía de gases con detector selectivo de masas (GC-MS) en donde se encontró un alto porcentaje de sílice en Cañaveral y una mayor concentración de sulfatos en Ricaurte. En conclusión, los cloruros, sulfatos y sílice son los principales iones encontrados en el Área Metropolitana de Bucaramanga –AMB (Castro Ortiz, Castro Suarez, Chacón Velasco, Andrea, & Herrera López, s.f.).

En el año 2010, la CDMB, La Fundación Oftalmológica de Santander, La Clínica Carlos Ardilla Lulle y el Observatorio de Salud Pública de Santander realizaron el proyecto de investigación (estudio epidemiológico) de los efectos de la contaminación del aire sobre la salud de poblaciones sensibles con el propósito de determinar alertas epidemiológicas – ambientales y orientar los planes de la calidad del aire a mediano y largo plazo en la Ciudad de Bucaramanga, usando metodologías mixtas de observación y análisis. Dentro de la caracterización fisicoquímica se tomaron 50 muestras de PM₁₀ para determinar iones-metales (Cl⁻, SO₄⁻², NO₃⁻, SiO₂, Ca, Pb, Cu, Fe, Zn, Al), las muestras fueron procesadas y analizadas utilizando métodos convencionales y absorción atómica, respectivamente. Los resultados para metales arrojaron concentraciones de Ca

1,84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Pb 0,04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Cu 0,12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Fe 1,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Zn 0,11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Al 0,13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. (Observatorio de Salud Pública de Santander, 2010)

En el aire de la ciudad de Pamplona, Alfonso Quijano, Mónica Quijano y José Henao Martínez mediante las técnicas de absorción atómica y fluorescencia de rayos x determinaron la presencia de metales como: Cr, Fe, K, Mn, Ni, Pb, Zn y compararon con los metales hallados en la ciudad de Bogotá y la ciudad de Bucaramanga donde estimaron la presencia de Fe, Ni, Pb, Zn con concentraciones de 22,97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 0,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 1,02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 245,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente (Quijano Parra, Quijano Vargas, & Henao Martínez, 2010).

En el año 2011 se realizó por parte de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de la CDMB la evaluación de las concentraciones diarias promedio de PM₁₀ en diferentes puntos de la ciudad; finalmente los resultados de los monitores revelaron que el barrio La Joya, en el occidente de la ciudad fue el sitio en Bucaramanga que tenía menor promedio diario de concentración de PM₁₀ (menor de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y que la zona centro era la que tenía mayores promedios diarias (superiores a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Coordinacion de Informacion e Investigacion Ambiental, 2011).

En 2011, un estudio realizado en Navarra, España por Aldabe, Elustondo, et al; realizó la caracterización química de PM_{2.5} y PM₁₀ y determinaron la concentración de 32 metales en tres lugares diferentes (rural, urbano y zona con tráfico vehicular) mediante espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Los metales que registraron mayores concentraciones para PM₁₀ fueron P, Ti, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Sr, Sn, Ba y Pb. (Aldabe, y otros, 2011)

En Faisalabad y Gujranwala (Arabia) en el año 2013, la universidad del Rey Fahd de petróleo y minerales realizó la caracterización del material particulado mediante la técnica (LIBS) espectroscopia de descomposición inducida por láser, el método desarrollado se realizó en

muestras de aire reales para la determinación de los metales pesados como cadmio, zinc y plomo, donde lograron determinar una concentración máxima de Cd (339,8 ng / m³) debido a las altas emisiones industriales y vehiculares, además un alto contenido de Pb (94,0 y 98,9 ng/m³) y de Zn(25,5 y 94.3ng/m³) atribuidas totalmente a actividades antropogénicas como la minería, la producción de acero, metales de fusión, y la quema de carbón en los sectores. Las concentraciones de diversos metales determinados por el método desarrollado LIBS fueron verificados por la técnica analítica convencional espectroscopia de absorción atómica de llama (Muhammad, Hassan Ahmed, M., A. Qazi, & Anwar Baig, 2013).

Raina Pal, M, en el año 2014 evaluó Zn, Fe, Cu, Cr, Ni y Pb en material particulado (PM₁₀) en Moradabad, India. Las muestras (PM₁₀) fueron colectadas en tres diferentes sitios y se llevó a cabo un muestreo simultáneo dos veces por semana durante el periodo de abril de 2011 y marzo de 2012. La concentración de PM₁₀ fue analizada usando espectroscopía de emisión por plasma de acoplamiento inductivo (IPC-OES), obteniendo que la concentración media mensual osciló entre 63.226 µg/m³. La máxima concentración de los metales fue de Zn (21,24 µg/m³), Fe 18,43 µg/m³), Cu (15,23 µg/m³), Cr (0,41 µg/m³) y Ni (0,03 µg/m³) mientras que la máxima concentración de Pb (2,72 µg/m³) y Cd (0,20 µg/m³) fue encontrada en el área de la densidad del tráfico pesado, denotado como zona comercial (Raina Pal, Gupta, & Tripathi, 2014).

Un estudio realizado por Ahmed, F; Shah, M y Shaheen, N; en el año 2014, describe las variaciones diurnas y nocturnas de metales pesados en material particulado en Islamabad, Pakistán. El procedimiento analítico seguido para el análisis de metales pesados (Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Pb y Zn) fue el establecido en el Método IO-3.1 de la USEPA; la determinación se llevó a cabo mediante absorción atómica bajo condiciones analíticas óptimas. De acuerdo a los resultados, se encontró que las concentraciones medias de Ca son altas (12,752 ng/m³) durante el

día y bajas (8,622 ng/m³) durante el periodo nocturno. Los otros metales, Fe, Mg y Pb muestran concentraciones más altas y Co, Cu y Zn muestran concentraciones relativamente bajas durante periodos diurnos y nocturnos en material particulado (Ahmed, Shah, & Shaheen, 2014)

Roberto Rojano, Heli Arregoces y Gloria Restrepo describen el estudio realizado en Riohacha-Colombia en el año 2014. El cual realizó la composición elemental en partículas respirables (PM₁₀) y partículas suspendidas (PST) utilizando la técnica de espectroscopia de absorción atómica. Los elementos químicos cuantificados fueron: (As, Cd, Ca, Zn, Cu, Cr, Co, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, K, Na y V) en donde se encontró un alto contenido de Calcio, Zinc, y Sodio (Rojano, Arregoces, & Restrepo, 2014).

Un estudio realizado en dos puntos de la ciudad de Yangtze River Delta - China, en el año 2014. Evaluaron la composición elemental de Ti, V, Cr, Cd, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, y Pb en muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}, mediante las técnicas: Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente y espectrometría de fluorescencia atómica, encontrado como resultado que Fe era el metal predominante en las muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}, la carga del metal oscila entre 50%- 76%. A diferencia de los metales Mn, Co y Ti sus concentraciones fueron inferiores en los dos sitios de muestreo (Qi-Li, y otros, 2015).

Miranda y Arriaga, en el año 2017, realizaron un estudio con el objetivo de determinar la concentración de metales pesados en el aire (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn), en los distritos de Manantay, Callería y Yarinacocha de la Provincia de Portillo en Perú, las muestras fueron tomadas en 14 puntos estratégicos ubicados en los tres distritos. Las muestras obtenidas fueron enviadas al laboratorio de DIGESA- Lima, para que se realizaran los análisis correspondientes. Los metales de mayor concentración encontrados en la Provincia de Portillo fueron cadmio, cromo, hierro,

manganeso y plomo. Cobre y zinc se encontraron dentro del rango establecido por la AAQC. (Miranda & Arriaga, 2016)

En el año 2017, el departamento de química industrial de la universidad de Blida en Argelia realizaron la cuantificación y caracterización fisicoquímica del PM₁, PM_{2,5} y PM₁₀ recolectado durante dos años en dos estaciones diferentes, una urbana y una en carretera principal. La caracterización de los metales pesados se realizó mediante la técnica de fluorescencia de rayos x (XRF). Donde confirman la presencia de diecinueve elementos con orígenes antropogénicos y naturales, dentro de estos el metal de mayor contenido fue el hierro con una concentración de 3953 ng/m³ (Talbi, Yacine, Rabah, & Menouer, 2017).

En el año 2017 en la ciudad de Guajira- Colombia Argumedo Carlos Doria en compañía de la universidad de la Guajira realizaron la caracterización metálica del material particulado PM₁₀ en un sitio específico como Fonseca, en este estudio seleccionaron 20 muestras que fueron sometidas a un proceso de digestión ácida, y analizadas por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS). Los niveles de PM₁₀ reportados superaron el estándar anual de 20 µg/m³ establecido por la OMS. Los metales de mayor concentración corresponden a Na (2,40 µg/m³), Al (0,52 µg/m³), Ca (0,49 µg/m³) y Cr (0,40 µg/m³) (Doria Argumedo, 2017).

Las referencias presentadas anteriormente constituyen tan sólo una muestra de los múltiples antecedentes que existen sobre identificación de metales pesados en el análisis de la contaminación por material particulado en el mundo, sin embargo, es importante resaltar que en Colombia son muy pocos relacionados con este tema.

4.3 Marco normativo

4.3.1 Guías para la calidad del aire OMS

Proporcionan valores de contaminación del aire basados en el ambiente o en la salud. Están hechas con el objetivo de dar respuesta a las acciones que respectan a la contaminación en un nivel local y a la necesidad de mejorar la legislación, el manejo y la orientación en ámbitos nacionales y regionales.

Tabla 4.

Valores guía de la OMS para los contaminantes “clásicos” del aire

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	20	Anual
	50	24 horas
PM _{2,5}	10	Anual
	25	24 horas
SO ₂	20	24 horas
	500	1 hora
NO ₂	40	Anual
	200	1 hora
O ₃	100	8 horas
Plomo	0,5	Anual

Nota: Niveles máximos permisibles de los contaminantes criterio encontrados en la atmósfera a nivel internacional. Adaptado de Organización Mundial de la Salud, 2006) (Organización Mundial de la Salud, 2004).

4.3.2 Resolución 2254 de 2017

En Colombia, la norma de calidad del aire ambiente es dirigida por la resolución 2254 del 1 de noviembre de 2017, en la que se definen los niveles máximos permisibles en condiciones de referencia para contaminantes criterio y los elementos técnicos integrales para mejorar su gestión y así garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana (Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017 - nov. 1).

Tabla 5.

Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio.

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM _{2,5}	25	Anual
	50	24 horas
SO ₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 hora
O ₃	100	8 horas
CO	5000	8 horas
	35000	1 hora

Nota: Niveles máximos permisibles de los contaminantes criterio en la atmósfera a nivel nacional. Adaptado de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017 - nov. 1

En Colombia, no todos los metales evaluados en este estudio son regulados, la resolución 2254 de 2017 contempla los niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos en el aire, solo para plomo y sus compuestos y níquel y sus compuestos a niveles de exposición anuales.

Tabla 6.

Niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos en el aire.

Contaminantes tóxicos	Nivel Máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
Benceno	5	Anual
Plomo y sus compuestos	0,5	Anual
Cadmio	0,005	Anual
Mercurio Inorgánico (Vapores)	1	Anual
Tolueno	260	1 semana
	1000	30 minutos
Níquel y sus compuestos	0,180	Anual
Hidrocarburos Aromáticos policíclicos expresados como Benzo (a) pireno	0,001	Anual

Adaptado por Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017 - nov. 1

Tabla 7.

Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para los niveles de prevención, alerta o Emergencia.

Contaminante	Tiempo de exposición	Prevención	Alerta	Emergencia
PM10	24 horas	155-254	255 -354	≥ 355
PM _{2.5}	24 horas	38-55	56-150	≥ 151
O ₃	8 horas	139-167	168-207	≥ 208
SO ₂	1 hora	198-486	487-797	≥ 796
NO ₂	1 hora	190-677	676-1221	≥ 1222
CO	8 horas	10820- 14254	14255- 17688	≥ 17689

Adaptado por Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006 abril 3

4.3.3 Resolución 610 de 2010

En Colombia, hasta diciembre de 2017, la norma de calidad del aire ambiente estuvo dirigida por la resolución 610 del 24 de marzo de 2010, en la que se definían los niveles máximos permisibles en condiciones de referencia para contaminantes criterio y los elementos técnicos integrales para mejorar su gestión y así garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana (Resolución 610, 2010).

4.3.4 Decreto 979 del 2006

El decreto contempla las medidas específicas y necesarias que se deberán tener en tal caso que se declare algunos de los niveles de PREVENCIÓN, ALERTA O EMERGENCIA, según el contenido y concentración de material particulado. Estas medidas están con el fin de mitigar o detener el estado de concentración de contaminantes que ha dado lugar a la declaratoria del respectivo nivel (Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006 abril 3).

Tabla 8.

Medidas específicas de cada nivel, cuando la declaratoria se deba a material particulado y/o dióxido de azufre.

Prevención	Alerta	Emergencia
• Se restringe la operación de incineradores a los horarios que determine la autoridad ambiental competente. • Se restringe todo tipo de quema controlada a los horarios que establezca la autoridad ambiental competente. • Se restringirá la operación de las industrias que operan calderas y equipos a base de carbón. • Se restringirá la circulación de vehículos diésel, públicos y particulares, de modelos anteriores a diez (10) años.	• Se prohíbe la operación de incineradores. • Se suspende todo tipo de quema controlada. • Se restringirá la operación de las industrias que operan calderas y equipos a base de carbón, fuel oil, crudos pesados o aceites usados. • Se restringirá la circulación de vehículos diésel, públicos y particulares, de modelos anteriores a cinco (5) años. • Ordenar la suspensión de clases en centros de todo nivel educativo.	• Restringir o prohibir, de acuerdo con el desarrollo del episodio, el funcionamiento de toda fuente fija de emisión, incluyendo las quemas controladas. • Restringir o prohibir, según el desarrollo del episodio, la circulación de toda fuente móvil o vehículos, excepto aquellos que estén destinados a la evacuación de la población o a la atención de emergencia. • Ordenar la suspensión de actividades de toda institución de educación. • Ordenar, si fuere del caso, la evacuación de la población expuesta.

Nota: Medidas específicas de cada nivel, cuando la declaratoria se deba a material particulado y/o dióxido de azufre. Adaptado por Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006 abril 3

4.3.5 Índice de la calidad del aire de Bucaramanga (IBUCA)

El IBUCA es un indicador que establece la calidad del aire en Bucaramanga, basado en los límites nacionales del Ministerio de ambiente observados en la Tabla 9. A estos valores van sujetos a un respectivo tratamiento para convertirlos a condiciones de presión y temperatura local. El comportamiento de la calidad del aire representado por el IBUCA está asociado directamente con el grado de afectación de la salud humana (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, s.f.) Este indicador es adimensional y tiene una escala de 0 a 10 que depende del grado de contaminación del aire. Está relacionado con la afectación que tiene la

contaminación del aire sobre la salud humana y cada uno se distingue por un color específico como se muestra en la tabla 10.

Tabla 9.

Normas Nacionales de calidad del Aire utilizadas en el cálculo del IBUCA

Contaminante	Periodo	Norma nacional	Unidad
Partículas suspendidas PM ₁₀	24 horas	100	µg/m ³
Óxidos de Azufre, SO ₂	24 horas	96	ppb
Óxidos de Nitrógeno, NO ₂	1 hora	101	ppb
Monóxido de Carbono, CO	1 hora	35	ppm
Oxidante Fotoquímico O ₃	1 hora	61	ppb

Adaptado por Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, s.f.

Tabla 10.

Valores y descripción epidemiológica del IBUCA.

ICA	Color	Clasificación	Efectos sobre la salud
0 – 1.25	Verde	Buena	La calidad del aire es considerada como satisfactoria, no evidencia ningún efecto en la salud humana.
1.26 – 2.50	Amarillo	Moderada	La calidad del aire es aceptable y no tiene ningún efecto sobre la población general.
2.51 – 7.50	Naranja	Regular	Aumento de molestias en personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares.
7.51 – 10	Rojo	Malo	Agravamiento significativo de la salud en personas con enfermedades cardíacas o respiratorias. Afectación de la población sana.
> 10	Purpura	Peligroso	Alto riesgo para la salud de la población. Aparición de efectos al nivel del daño.

Adaptado por Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, s.f.

4.3.6 Índice de la calidad del aire (ICA)

El ICA es la interpretación de los niveles de las concentraciones registradas en el aire de la región metropolitana de las ciudades, teniendo en cuenta los tiempos de exposición, es un valor adimensional, que lleva una escala numérica entre 0 y 500, con rangos intermedios y representados por

diferentes colores como se observa en la tabla 11 y 12. La principal función del ICA es mantener informada a la población sobre la calidad del aire en escalas que sean comprensibles. (Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017 - nov. 1)

El ICA en Colombia ha sido adoptado de la EPA Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, y el cual en nuestro país mide los siguientes contaminantes:

- Monóxido de carbono
- Dióxido de azufre
- Dióxido de Nitrógeno
- Partículas menores a 10 micrómetros
- Partículas menores a 2.5 micrómetros
- Ozono troposférico

Tabla 11.
Descripción general del índice de la calidad del aire

Rango	Color	Clasificación	Efectos
0 -50	Verde	Buena	La contaminación atmosférica supone un riesgo bajo para la salud
51 – 100	Amarillo	Aceptable	Posibles síntomas respiratorios en grupos poblacionales sensibles
101 -150	Naranja	Dañina a la salud de grupos sensibles	Los grupos poblacionales pueden presentar efectos sobre la salud. Material particulado: Las personas con enfermedad cardiaca o pulmonar, los adultos mayores y los niños se consideran sensibles y por lo tanto en mayor riesgo
151 – 200	Rojo	Dañina para la salud	Todos los individuos pueden comenzar a experimentar efectos sobre la salud. Los grupos sensibles pueden experimentar efectos más graves para la salud.

201 – 300	Purpura	Muy dañina para la salud	Estado de alerta que significa que todos pueden experimentar efectos más graves para la salud
301 - 500	Marrón	Peligrosos	Advertencia sanitaria. Toda la población puede presentar efectos adversos graves en la salud humana y están propensos a verse afectados por graves efectos sobre la salud

Adaptado por Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017 - nov. 1

Tabla 12.

Puntos de corte del ICA respecto al material particulado

Índice de calidad del Aire			Punto de corte del ICA	
ICA	Color	Categoría	PM ₁₀ µg/m ³ 24 horas	PM _{2.5} µg/m ³ 24 horas
0 -50	Verde	Buena	0 - 54	0 – 12
51- 100	Amarillo	Aceptable	55 - 154	13 – 37
101 – 150	Naranja	Dañina a la salud de grupos sensibles	155 – 254	38 – 55
151 – 200	Rojo	Dañina a la salud	255 - 354	56 – 150
201 – 300	Purpura	Muy dañina a la salud	355 – 424	151 – 250
301 – 500	Marrón	Peligrosa	425 – 604	251 – 500

Adaptado por Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017 - nov. 1

5. Metodología

5.1 Selección de las muestras

La estación de muestreo se encuentra ubicada en las instalaciones del colegio Aurelio Martínez Mutis en la Calle de los estudiantes. Este punto de monitoreo se seleccionó teniendo en cuenta la permanencia de personas, principalmente estudiantes y residentes del sector. El periodo de muestreo se registró entre el 27 de mayo al 2 de junio de 2016 y 19 al 25 de junio de 2017 en muestreos de 24 horas, con una frecuencia de siete días.

Estos dos nuevos periodos fueron seleccionados bajo la disposición del material y de la información suministrada por la CDMB, en el primer año se valoró la presencia de estudiantes en el sector y en el segundo año se seleccionó un periodo con receso estudiantil.

La toma de muestras se realiza mediante el muestreador automático BAM-1020 de alto volumen, propiedad de la CDMB. Para la retención del material particulado, esta estación emplea filtros de cuarzo, en el que se recogen partículas con diámetro aerodinámico inferior a 10 μm (PM_{10}). Este equipo obtiene automáticamente registros de las concentraciones horarias, que se interpretan teniendo en cuenta el cumplimiento de los estándares normativos establecidos en la resolución 2254 de 2017, siendo la norma de calidad diaria, o nivel de inmisión diario, expresado con base al valor de material particulado en 24 horas. De esta estación se seleccionaron para el análisis de metales (cobre, níquel, plomo y zinc) 28 muestras, que corresponden al máximo diario y semanal para el periodo de estudio establecido.

5.2 Análisis de la calidad del aire del área seleccionada

5.2.1 Determinación del IBUCA

El IBUCA permitió establecer cómo se encuentra la calidad del aire con respecto a la normatividad actual vigente. El indicador es adimensional y posee una escala de 0 a 10 que depende del grado de contaminación presente en la atmósfera del sector de Ciudadela Real de Minas. (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, s.f.)

El IBUCA tiene asignado colores específicos por cada una de las categorías para facilitar su interpretación. Los colores permitieron determinar si los contaminantes en el aire incrementaron a niveles perjudiciales para la salud con respecto a los límites locales establecidos por la autoridad ambiental de la ciudad. (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga)

A continuación, se presenta la fórmula para calcular el IBUCA:

Ecuación 1.

$$IBUCA (\text{compuesto } i) = \frac{(\text{valor representativo de } i)}{\text{Norma de inmisión}} \times 10$$

5.2.2 Determinación del ICA

El ICA es un valor adimensional para reportar el estado de la calidad del aire en función de un código de colores al que están asociados unos efectos generales que deben ser tenidos en cuenta para reducir la exposición a altas concentraciones por parte de la población.

Este índice fue establecido para el país y tomado como evaluación en este estudio a través de la Resolución 2254 de 2018 del hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el cual adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento a la Calidad del Aire y contiene el Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire. En la tabla 11 del apartado 4.3.6 se presentan los puntos de corte del ICA, utilizados para el cálculo del presente indicador. (Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017 - nov. 1)

El ICA se calculó a partir de la siguiente ecuación:

Ec 2.

$$ICA_p = \frac{I_{alto} - I_{bajo}}{PC_{alto} - PC_{bajo}} \times (C_p - PC_{bajo}) + I_{bajo}$$

En donde:

ICA_p = Índice de Calidad del aire para el contaminante p.

C_p = Concentración medida para el contaminante p.

PC_{alto} = Punto de corte mayor o igual a C_p .

PC_{bajo} = Punto de corte menor o igual a C_p .

I_{alto} = Valor del ICA correspondiente al PC alto.

I_{bajo} = Valor del ICA correspondiente al PC bajo.

5.2.2 Elaboración de la rosa de los vientos

Para el análisis meteorológico de la zona de estudio se tuvieron en cuenta los informes y datos de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bucaramanga de la CDMB, para el mes de mayo -

junio de 2016 y junio de 2017, en los cuales se realizó la campaña de muestreo. Se realizó un diagrama Rosa de los Vientos para cada año de estudio, cuya influencia en la dispersión de los contaminantes y en la calidad del aire es altamente significativa. Se realizó mediante la utilización del Software WRPLOT View y la aplicación del procedimiento posteriormente mencionado (WR Plot, 2005).

Inicialmente, se realizó la descarga de los datos tomados en la estación meteorológica; correspondiente al periodo de estudio, estos fueron organizados en un archivo de Excel por año/mes/día/hora/velocidad del viento/dirección del viento y guardado como Libro de Excel 97-2003, pues es la única versión compatible con el software; después de estar directamente en el programa, se crea una carpeta interior en formato SAMSON. De nuevo fueron exportados y se completó la información del sector de estudio. Finalmente, en la pestaña “wind rose” se seleccionó el número de punto de la rosa de viento y se mostró la gráfica correspondiente. (WR Plot, 2005)

5.3 Caracterización del material particulado PM₁₀

5.3.1 Pesaje de filtros

Una vez entregado los filtros con su correspondiente manipulación en el transporte, se introdujeron al desecador del Laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Universidad Santo Tomas, se mantuvieron allí durante un periodo de 36 horas para completar su acondicionamiento. Cumplido este tiempo se retiró la parte innecesaria del filtro y se realizó el respectivo pesaje. Este proceso se realizó para verificación y control interno de las muestras, garantizando la conservación del contenido del material. Sin embargo, las concentraciones de material particulado PM₁₀ utilizadas en el análisis son las suministradas por la CDMB.

5.3.2 Dopaje de los filtros

Para el proceso de dopaje, cada filtro fue enriquecido con 0,3 ml de solución de 10 ppm de Cu, Ni, Pb y Zn durante 24 horas. Los filtros fueron depositados en vasos de precipitado y sometidos al proceso de extracción. Finalmente, antes de llevar a volumen de 25 ml, se añadió 1 ppm de cada metal de estudio.

5.3.3 Extracción de los filtros con ácido caliente

La preparación de los filtros se realizó de acuerdo al procedimiento establecido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) en el método EPA-IO 3.1, “Selección, preparación y extracción de material filtrado” de junio de 1999, que proviene del Capítulo IO-3: “Análisis de especies químicas en partículas suspendidas colectadas en filtros” procedimiento extracción con ácido caliente (Center for Environmental Research Information Office of Research and Development, 1999).

Una vez finalizado el dopaje, los filtros se ubicaron en la parte inferior de un vaso de precipitado de 50 ml, se adicionó 3 ml de HCl y 1 ml de HNO₃ garantizando que el volumen cubriera en su totalidad el filtro. La solución fue puesta en una manta de calentamiento a 90°C durante 1 hora. Una vez finalizada la etapa de extracción, se dejó enfriar durante media hora y se adicionó agua desionizada por las paredes del vaso de precipitado. Finalmente se lleva a un volumen final de 25 ml para su posterior lectura en el espectrofotómetro. (Center for Environmental Research Information Office of Research and Development, 1999).

Durante la fase de laboratorio se tuvieron en cuenta las recomendaciones que se mencionan en el método de extracción respecto a los instrumentos de laboratorio, los cuales fueron purgados con agua desionizada y ácido nítrico 10%, esto con el fin de certificar un control de calidad en el

procedimiento de laboratorio. Los reactivos utilizados para la digestión fueron ácido nítrico 65% (Merck) y ácido clorhídrico 37% (Merck).

5.3.4 Técnica analítica

Para la lectura de los metales se utilizó un espectrofotómetro de Absorción Atómica modelo Thermo Scientific, ICE 3000 series, ubicado en el laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Universidad Santo Tomás. En la cuantificación de los metales, se prepararon estándares para la curva de calibración de cada metal (Apéndice E-H). Los estándares se prepararon a partir de un patrón certificado (Mol Labs Quimiométricas) de 1000 ppm de Cu, Ni, Pb y Zn.

En la tabla 13, se muestran los parámetros utilizados para la determinación de los metales de estudio, estos fueron establecidos en el programa SOLAAR del equipo de absorción atómica.

Tabla 13.

Parámetros de operación del equipo de absorción atómica por llama

Elemento	Longitud de onda (nm)	Condiciones de llama
Cobre (Cu)	324,8	Aire-C ₂ H ₂ oxidante (azul)
Níquel (Ni)	232	Aire-C ₂ H ₂ oxidante (azul)
Plomo (Pb)	217	Aire-C ₂ H ₂ oxidante (azul)
Zinc (Zn)	213,9	Aire-C ₂ H ₂ oxidante (azul)

5.3.5 Límite de detección y límite de cuantificación

Límite de detección (LD): se analizaron 10 veces las lecturas del blanco (filtro blanco) para cada metal y se calculó el promedio y la desviación estándar de los mismos (Apéndice J). Para la determinación del límite de detección se aplicó la siguiente ecuación:

Ec 3: Determinación LD

$$LDM = Y_B + 3 S$$

Límite de cuantificación (LC): Para el límite de cuantificación del método, se añadió al filtro blanco una concentración conocida del analito de interés, y que estuviera por encima del límite de

detección. Se realizó 10 veces la lectura de los blancos y se calculó el promedio y desviación estándar de los mismos (Apéndice K). (IDEAM, 2006). Para la determinación del límite de cuantificación se aplicó la siguiente ecuación:

Ec 4: Determinación LC

$$LCM = Y_B + 10 S$$

5.3.6 Porcentaje de recuperación

Para la estimación de la eficiencia del proceso de extracción y de la cantidad de elemento que se pierde en la misma, se realiza el cálculo del porcentaje de recuperación para cada metal.

Este procedimiento se realizó por duplicado usando un filtro blanco enriquecido con una solución conocida (10 ppm) de cobre, níquel, plomo y zinc sometido al proceso de extracción con ácido caliente y lectura por EAA para verificar el porcentaje del contenido real de cada metal.

Teniendo en cuenta los factores para la determinación de metales pesados en PM₁₀ de la tabla 14, se calcularon los porcentajes de recuperación que se encuentran en el apartado 6,4.

Tabla 14.

Factores para la determinación de metales pesados en el material particulado (PM₁₀)

Factor	Ecuación
Volumen estándar	Ec 5. $V_{std} = Q_{std} * T$ Donde: Qstd: Caudal estándar T: Tiempo
Relación entre el área del filtro y el área de la tira	Ec 6. $R = A_f / A_t$ Donde: Af: Área del filtro At: Área de la tira del filtro
Concentración de metal por volumen de aire	Ec 7. $C_m = C * V_a * R / V_{std}$ Donde: C: Concentración en la tira del filtro descontando el blanco (mg/l) Va: Volumen de la alícuota (25 ml)
Porcentaje de recuperación	Ec 8. $\%R = \left(\frac{C_e}{C_t} \right) * 100$

Donde:

Ce: Concentración experimental

Ct: Concentración teórica

6. Resultados y discusión

6.1 Contexto del área

Bucaramanga, Capital del departamento de Santander limita por el Oriente con los municipios de Matanza, Charta y Tona; por el por el Sur con el municipio de Floridablanca, por el Norte con el municipio de Río negro; y; por el Occidente con el municipio de Girón. Se localiza en una terraza inclinada de la Cordillera Oriental a los 7° 08' de latitud norte con respecto al Meridiano de Bogotá y 73° 08' de longitud al Oeste de Greenwich. (Área Metropolitana de Bucaramanga, s.f.)

El área metropolitana del municipio es de 165 km², forma parte junto con los municipios de Floridablanca, Piedecuesta y Girón, con una población de aproximadamente un millón de habitantes. El 98.5% de los habitantes del Municipio residen en el área urbana (Alcaldía de Bucaramanga).

El suelo urbano se divide en 17 comunas. Dentro de cada comuna hacen parte: los barrios, asentamientos, urbanizaciones y otros (sectores con población flotante).

El sector de Ciudadela Real de Minas hace parte de la Comuna 7- La Ciudadela donde se encuentran las urbanizaciones: Macaregua, Ciudad Bolívar, Los Almendros, Plazuela Real, Los Naranjos, Plaza Mayor, Plazuela Real (Alcaldía de Bucaramanga, s.f.).

Este estudio se desarrolló específicamente en las instalaciones de la institución AURELIO MARTINEZ MUTIS ubicada en la avenida de los estudiantes # 9 - 313 ciudadela real de minas como se observa en la figura 1.



Figura 1. Ubicación geográfica de la estación de muestreo. Adoptado de Google Maps

La estación de ciudadela se encuentra ubicada en la zona Occidental del municipio de Bucaramanga, la estación y su panorámica se pueden observar en la figura 2 y 3, esta es una zona principalmente residencial, que se encuentra afectada en los últimos años por la alta presencia de tráfico vehicular. La fuente móvil de mayor circulación y contaminación son los medios de transporte público presentes en las calles 56 y 61. En esta zona se encuentra la Calle de los Estudiantes, donde se ubican varios colegios de bachillerato y dos instituciones de educación superior (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga).



Figura 2. Estación meteorológica de ciudadela - real de minas.



Figura 3. Panorámica de la estación meteorológica.

6.1.1 Fuentes de emisión

Para el inventario de las fuentes móviles se utilizó el método de observación y conteo diario de vehículos y motos que en total fue de 10 horas diarias por 7 días continuos. Adicionalmente, se realizó el inventario de fuentes fijas alrededor de la estación de monitoreo automática de propiedad de la CDMB.

Las principales fuentes de emisión existentes en el área de influencia directa (AID) de la estación son las fuentes móviles, por su alto nivel y su constante permanencia. Asimismo, las fuentes fijas más cercanas son las cuatro ladrilleras ubicadas en el sector del Porvenir a una distancia de 6,8 km aproximadamente como se muestra en la figura 4.

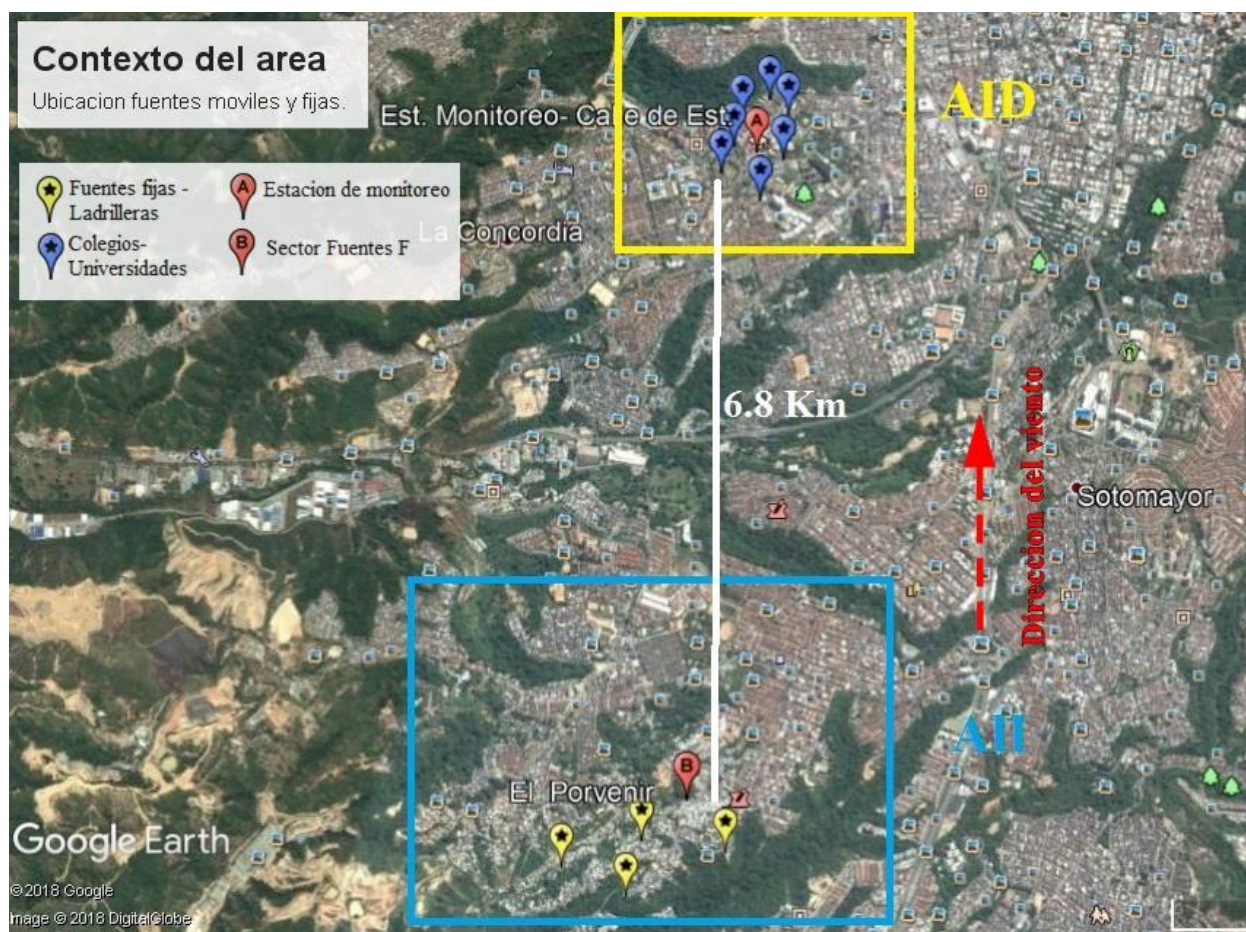


Figura 1. Ubicación geográfica fuentes móviles y fijas en el área de estudio. Adaptado de Google Earth

6.1.1.1 Fuentes fijas

De acuerdo con los resultados de las rosas de los vientos y la orientación predominante se considera relevante para el inventario de fuentes fijas, los barrios Provenza, Porvenir y Dangond. Entre los procesos industriales encontrados en la zona, los más representativos para el presente estudio son 4 empresas ladrilleras como se muestra a continuación:

Tabla 15

Numero de industrias del sector de estudio.

Industrias ladrilleras	Tipo de combustible
Ladrillera 1	Carbón mineral
Ladrillera 2	Carbón mineral
Ladrillera 2	Carbón mineral
Ladrillera 4	Carbón mineral – leña

6.1.1.2 Fuentes móviles

El primer monitoreo diario de fuentes móviles se ejecutó entre el 25 de septiembre y el 1 de octubre del 2016, el segundo monitoreo se realizó entre el 19 de junio y el 25 de junio de 2017, en los horarios de mayor importancia o mayor presencia de estudiantes en el sector 6:00 am a 9:00 am, 11:00 am a 1:00pm y 5:00 am a 10:00 pm (Alcaldía de Bucaramanga, 2010). Se realizó registro de vehículos livianos, motocicletas, buses escolares y transporte público, un conteo y promedio de fuentes por tipo de vehículo y un promedio por hora de este mismo, como resumen del flujo de fuentes móviles, y se definieron los sentidos de la observación de acuerdo con la dirección del tránsito vehicular y la cercanía a la estación como se describe en la tabla 16.

Tabla 16.

Sitios de monitoreo y sentidos de la observación para el análisis de fuentes móviles.

Punto de Monitoreo	Sentidos de la observación
Ciudadela Real de minas (Avenida samanes con calle 56)	Sur – Norte
	Norte – Sur
Ciudadela Real de minas- Calle de los estudiantes	Norte – Sur

En el año 2016 la densidad del tráfico automotor del sector de real de minas se consideró mayoritaria debido a la presencia de estudiantes, docentes y demás personal de las instituciones ubicadas en el sector. Presentándose un menor flujo vehicular los días domingo y un mayor porcentaje se encontró entre los días de lunes a viernes. La mayor proporción del volumen en los tres horarios seleccionados para el monitoreo, la aportan las motocicletas con porcentajes superiores a 40%, seguido los vehículos livianos, con porcentajes entre 20 y 40%, como se muestra en la figura 5.

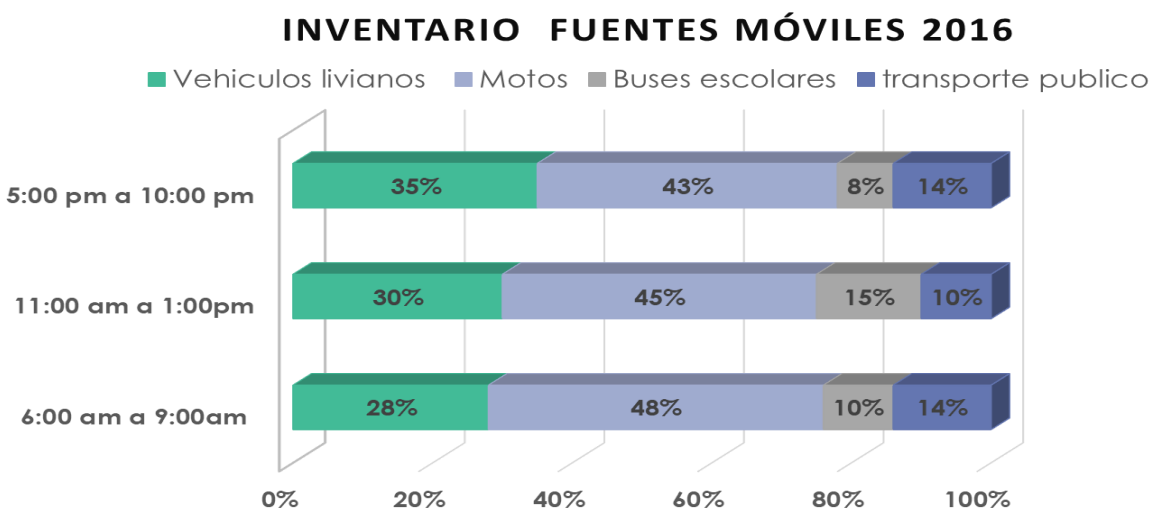


Figura 2. Inventario de fuentes móviles en el año 2016.

En el año 2017 implementaron la restricción de vehículos en la calle de los estudiantes, además fue un periodo con receso estudiantil donde no hubo monitoreo de buses escolares, es decir que el flujo automotor entre semana disminuyo en gran proporción, Para el fin de semana la cifra si presento un aumento debido a mayor flujo vehicular por la avenida samanes. Por otra parte, la

ocupación del transporte público ha aumentado de un 4% a un 6% para este sector. La mayor proporción del volumen la aportan las motocicletas, seguido los vehículos livianos, con porcentajes entre 30 y 40 % como se muestra en la figura 6.

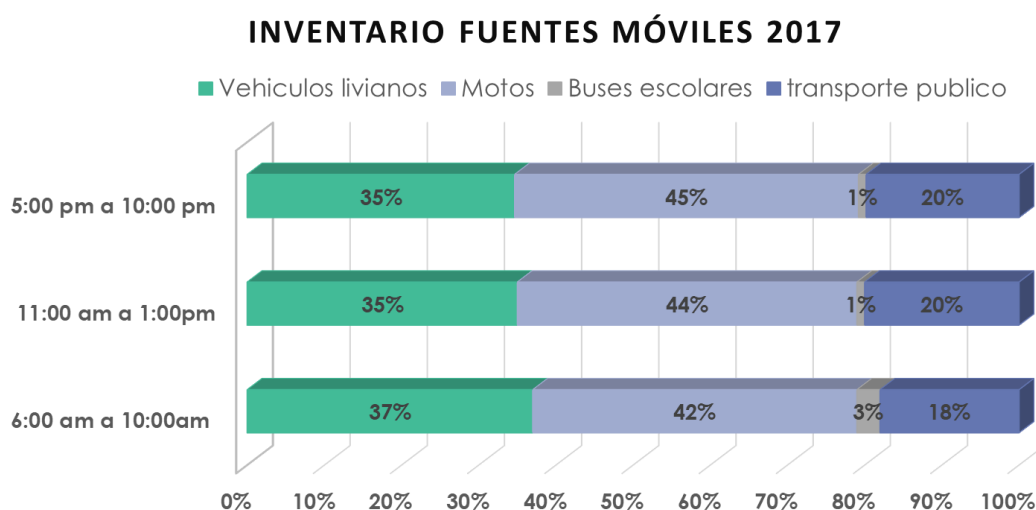


Figura 3. Inventario de fuentes móviles en el año 2017.

Como objetivo de la cuantificación de vehículos y motocicletas era determinar en qué medida cada clase de fuente móvil, en función del combustible, afecta la calidad del aire del sector de estudio. Encontrándose que el flujo de buses y busetas que utilizan diésel como combustible incrementan con la concentración promedio de PM₁₀ denotado en las gráficas de resultados en el apartado 6.2, donde la mayor concentración de PM₁₀ está acorde a los horarios en los que mayor tráfico vehicular presentan, por lo tanto, las concentraciones mínimas de plomo y la máxima de cobre pueden estar atribuidas a su presencia. En el sector de ciudadela real de minas las fuentes móviles son las principales generadoras de contaminación atmosférica en comparación con los aportes que realizan las fuentes fijas (establecimientos comerciales e industriales).

6.2 Meteorología

Este capítulo describe las características meteorológicas de manera general de la zona de estudio para el periodo de muestreo de 27 de mayo a 2 de junio de 2016 y 19 al 25 de junio de 2017.

En el sector de ciudadela real de minas la dispersión del material particulado y su disolución en la atmósfera está condicionada por los factores climáticos característicos de una zona Andina que presenta temperatura promedio de 22,6 °C. Al medio día la temperatura máxima media oscila alrededor de 28 °C. En la madrugada la temperatura mínima está entre los 18 y los 19 °C. La humedad relativa es mayor a 80% en promedio y en épocas de lluvias alcanza valores superiores al 84%. (Área Metropolitana de Bucaramanga)

Según los días de muestreo, en la figura 7 se observa que para los meses mayo- junio del año 2016 la dirección del viento predominante fue hacia el norte con un promedio de velocidad de 0,93 m/s, para la semana de estudio del año 2017, el noroeste fue la dirección predominante, con un promedio de velocidad de viento de 0,79 m/s como se muestra en la figura 8. Durante estos dos periodos de estudio se presentó un promedio inferior ya que presentan mayor frecuencia las velocidades que están hacia abajo ($<0,10$ m/s), como se registra en los apéndice L-M.

Para establecer el comportamiento tendencial de la dirección y velocidad de los vientos es necesarios realizar un análisis estadístico utilizando los datos de todo el año.

Con respecto al comportamiento horario de los vientos, la CDMB reportó para los meses mayo- junio del año 2016 una velocidad máxima de 4.0 m/s, caracterizados por ser vientos leves-moderados con una escala Beaufort 3 (Camargo Caicedo, Marín, & Vélez-Pereira, 2011). Esta rapidez es propicia para mayor dispersión de los contaminantes desde las fuentes emisoras a la zona de estudio. Los vientos para el año 2017 son de tipo leve con intensidades máximas de 3.3

m/s, se ubicaron en un nivel 2 según la escala Beaufort, contribuyendo a la acumulación de contaminantes cerca de las fuentes de emisión. (García Lozada, 2006)

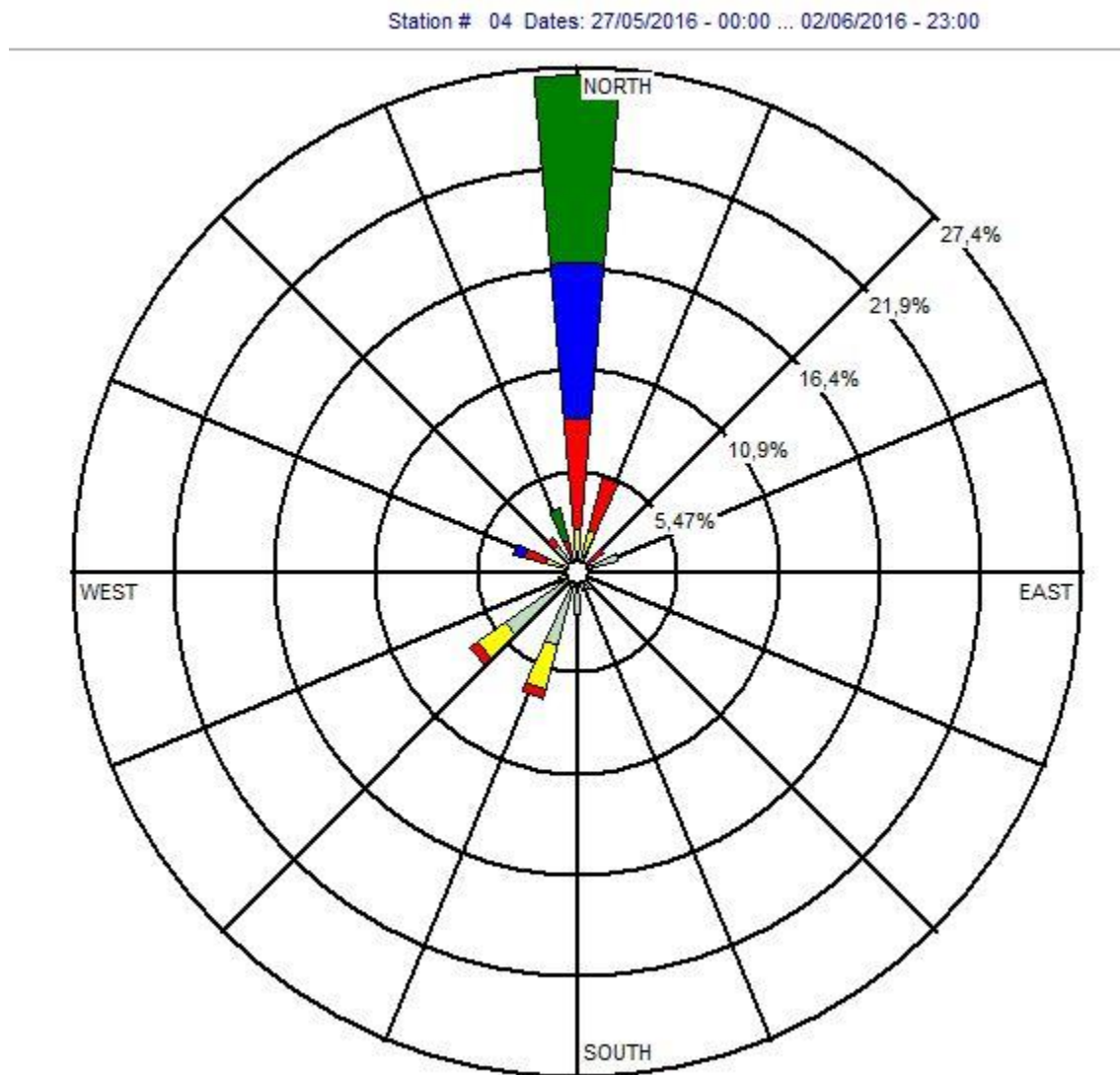


Figura 4. Rosa de vientos correspondiente al año 2016

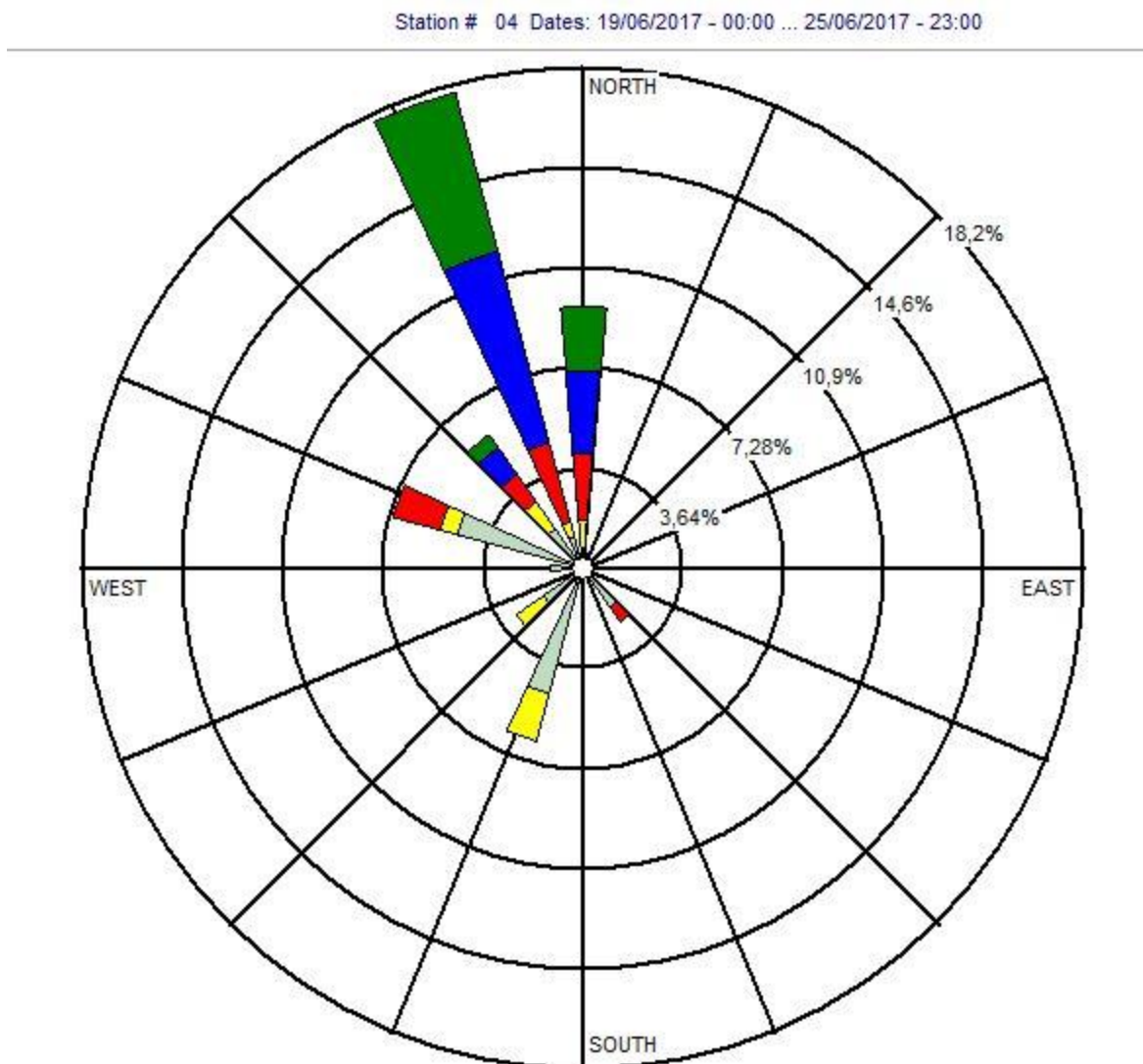


Figura 5. Rosa de vientos correspondiente al año 2017

6.3 Comportamiento del material particulado

A finales del mes de mayo y principios del mes de junio del año 2016, en el presente estudio se considera como semana escolar, se encontró un promedio máximo de concentración de PM₁₀ (34,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) para un periodo de 24 horas, que corresponde a la fecha del 31 de mayo como se observa en la figura 9, esto evidencia que las concentraciones determinadas de material particulado en la estación de ciudadela real de minas, en todos los días de muestreo y en promedio, son menores con respecto a los niveles máximos permisibles, establecidos por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). De igual forma presenta valores inferiores con respecto al nivel de concentración diario que dispone la Organización mundial de salud (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

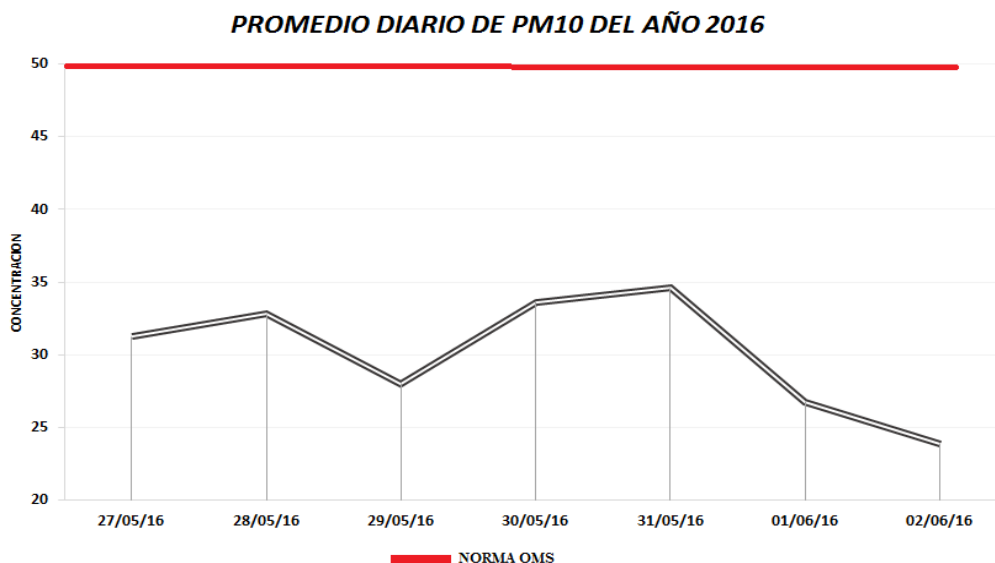


Figura 6. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio de PM₁₀ en la semana de estudio del año 2016.

En la figura 10 se muestra el resultado promedio de las concentraciones de la fracción respirable PM₁₀ realizados durante el año 2017 en una semana del periodo de vacaciones que realizan las instituciones ubicadas en el sector de estudio. En comparación con el año anterior muestra una continua disminución de la concentración para los primeros días de la semana. Siendo

así, se determinó el promedio máximo que corresponde a la fecha 22 de junio con una concentración de ($35,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se encuentra bajo los límites permisibles de la Norma Colombia y los niveles presentados por la OMS. Por lo tanto, este sector de Bucaramanga no se considera como foco de contaminación.

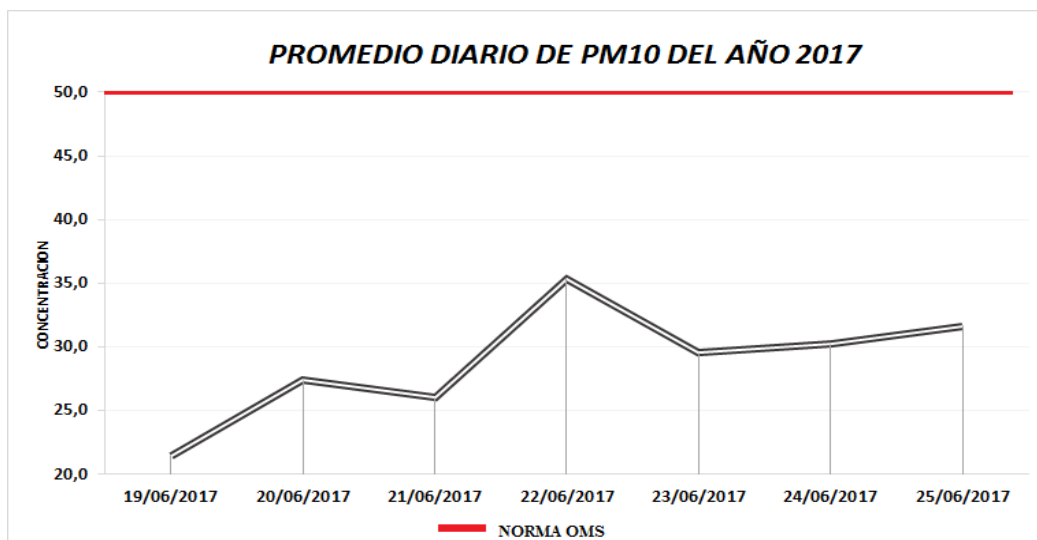


Figura 7. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio diario de PM₁₀ en la semana de estudio del año 2017.

La figura 11 presenta el comportamiento horario para los días en estudio. Se evidencia que, en la mayoría de horas, para el año 2016, los niveles de concentración de material particulado sobrepasan a los del 2017, adicionalmente se observa un incremento significativo de la concentración de las partículas en los horarios 6:00 a 9:00 am y una tendencia de disminución de PM₁₀ para un periodo de 12:00 pm a 6:00 pm. El valor más alto del promedio de concentraciones horarias es de $45,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ presentado en el año 2016. Este comportamiento evidencia y destaca el impacto que genera el aumento del tráfico vehicular en las horas pico originado por los estudiantes, residentes y población que habitan en el sector, además en las horas de la tarde donde se presentaron las concentraciones más bajas puede estar relacionado con la baja intensidad de aire.

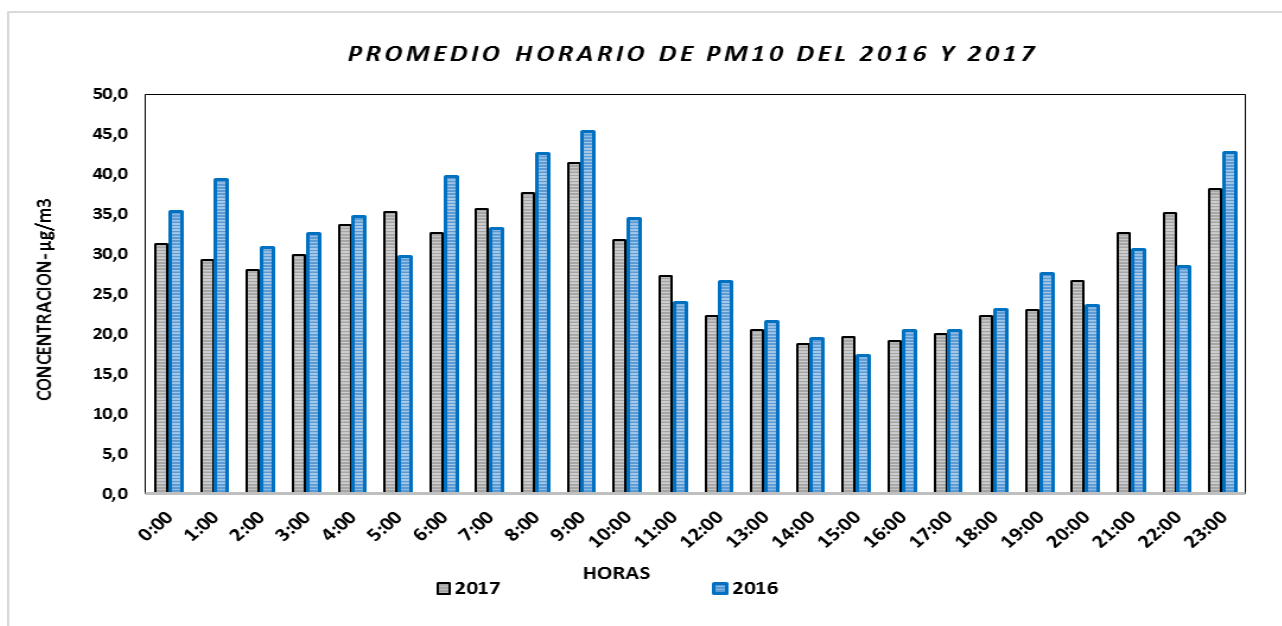


Figura 8. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio de PM₁₀ en los días de estudio.

6.4 Análisis de la calidad del aire

6.4.1 Índice de la calidad del aire de Bucaramanga

El Índice de Calidad del Aire del Área Metropolitana de Bucaramanga <IBUCA> permite expresar y evaluar la contaminación atmosférica en términos de afectación en la salud de la población. En el sector de ciudadela real de minas se realizó el IBUCA para las dos semanas de estudio, presenta resultados predominantes en calidad “moderada” según la figura 12.

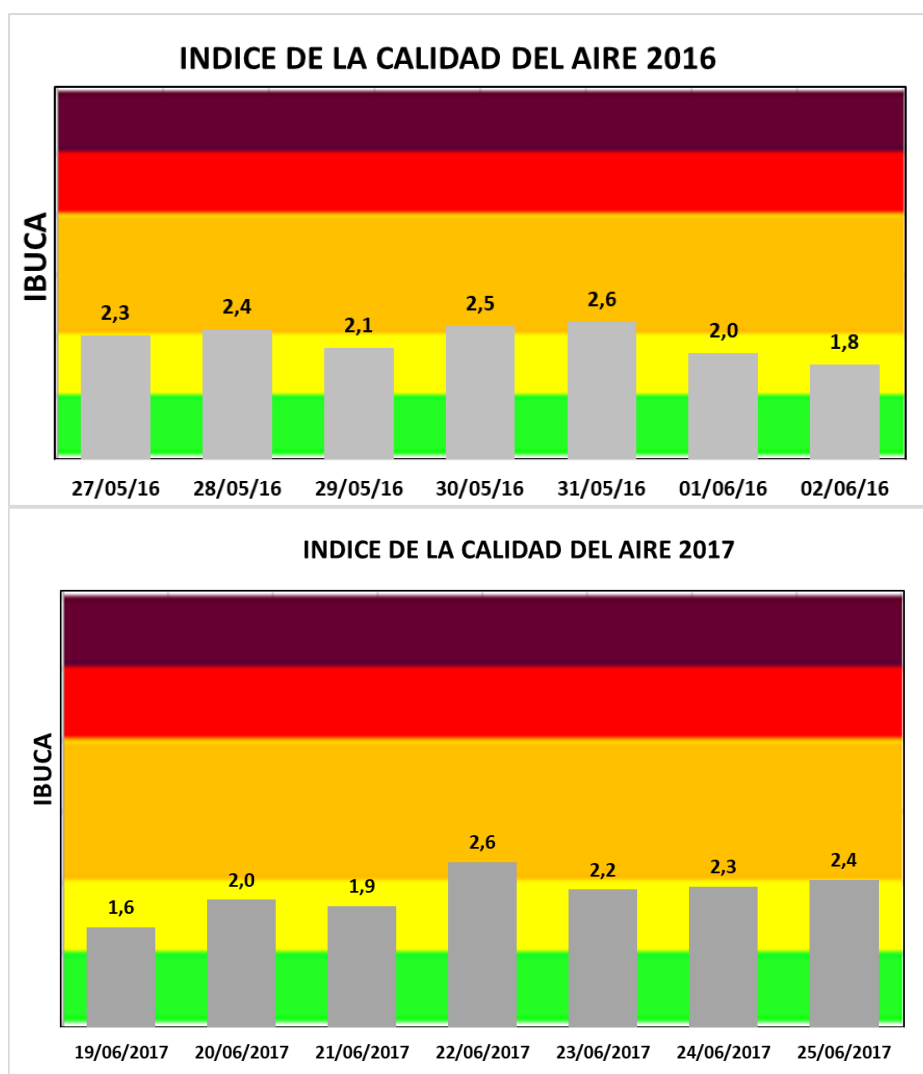


Figura 9. IBUCA- PM₁₀ de los dos periodos de estudio

De acuerdo con la descripción de la CDMB en esta clasificación no hubo riesgo importante para la salud de la población en general. En dos días durante el periodo de estudio se alcanzaron los límites de calidad de aire “regular” (color naranja), que significa que se presentó aumento de molestias en personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares; aparición de ligeras molestias en la población en general.

En comparación con los años anteriores, la CDMB presenta los registros tomados en el mes de junio de los años 2010 y 2014 demostrando una calidad de aire “moderada”. Sin embargo, en el año 2014 el promedio anual estuvo entre niveles “Regular” (Color Naranja) y “Peligroso” (Color

Morado) considerando los primeros meses del año con mayor contenido de PM₁₀. Analizando el año 2015 en comparación con el periodo 2010-2017 cabe resaltar que en el mes de junio se registró el mayor nivel de contaminación que obedece principalmente a los máximos eventos del PM₁₀ con un valor máximo del IBUCA de 9,69 clasificado como “Malo” (Color rojo), debido al alto flujo y parque automotor diésel. (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, s.f.). En comparación con los dos años de estudio la contaminación por PM₁₀ ha disminuido notoriamente debido a la medida de peatonalización implementada en el sector.

6.4.2 Índice de la calidad del aire

La Figura 13 muestra las categorías atmosféricas del Índice de Calidad del Aire para los dos periodos de estudio correspondientes a las fechas 27 de mayo al 2 de junio de 2016 y 19 al 25 de junio de 2017 registrando una escala “buena”, en la que no debe generarse alarma con respecto a la calidad del aire en el sector.

Se consideró pertinente aplicar el ICA nacional ya que fue implementado en la Resolución 2254 del 2017, con el fin de unificar la comparación de los niveles de concentración de los contaminantes en las estaciones de monitoreo que conforman el Sistema de Vigilancia de la Calidad del aire en las diferentes ciudades de Colombia.

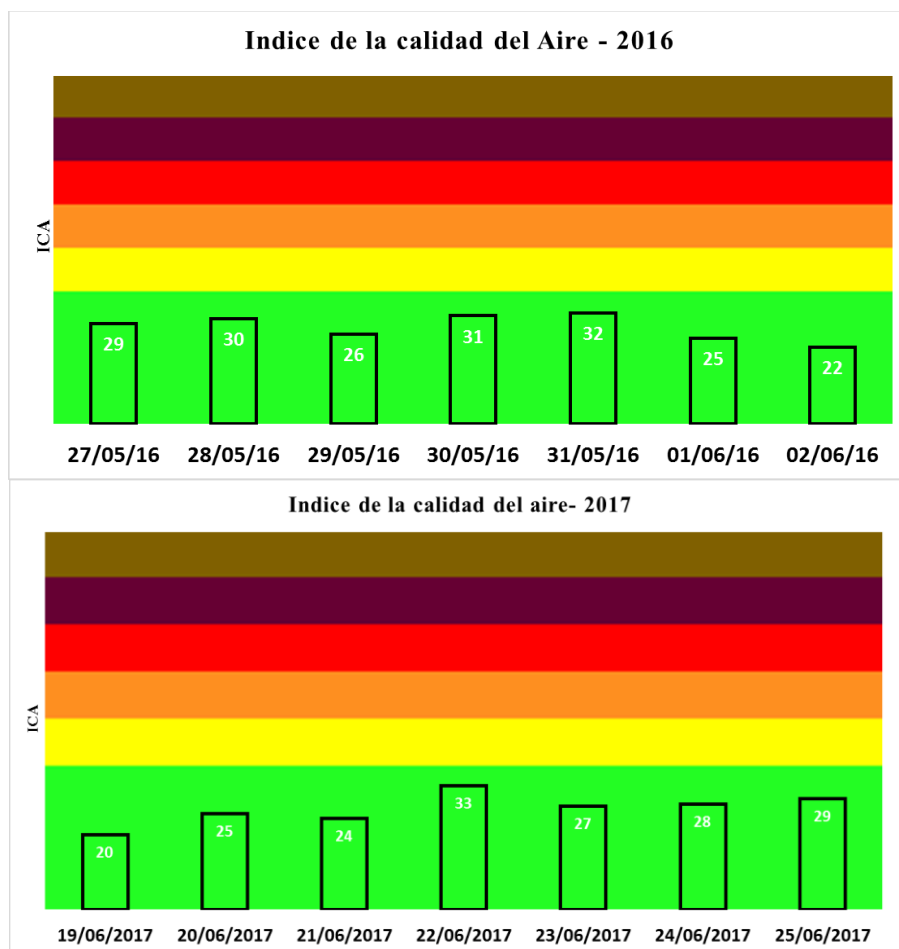


Figura 13. ICA- PM10 de los dos periodos de estudio.

Según las concentraciones promedio de material particulado PM10, no sobre pasan la norma establecida por la resolución 2254 del año 2017, pero si presentan una variación por parte del nivel de clasificación entre los dos indicadores evaluados, pese a que el ICA es más lapso y lleva una escala numérica de 0 a 500 con rangos intermedios, por el contrario, el IBUCA es un indicador más restrictivo y propone una escala de 0 a 10.

6.5 Cuantificación de metales pesados en el PM₁₀

Inicialmente se presenta los límites de detección de los cuatro metales (Cu, Ni, Pb y Zn) analizados en este estudio. Posteriormente se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica mediante el método de extracción IO – 3.1 establecido por la EPA y por la técnica de

espectroscopia de absorción atómica. La discusión de resultados se realiza frente a cuatro estudios debido a que presentan similitud con los metales analizados, la metodología de digestión y técnica de caracterización.

6.5.1 Límite de Detección y Límite de Cuantificación

El primer paso para determinar las concentraciones válidas de los metales en la estación de muestreo, se realizó calculando los límites de detección y cuantificación del equipo obtenidos en el Laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Universidad Santo Tomás, para los metales de estudio, tal como lo muestra la tabla 17.

Tabla 17.

Límites de detección y límites de cuantificación del EAA

Metal	Límite de detección	Límite de cuantificación
Cobre	0,001	0,011
Níquel	0,001	0,031
Plomo	0,002	0,022
Zinc	0,044	0,103

Fuente: Autor

Se calculó a partir de la información obtenida que ninguna de las concentraciones está por debajo de los límites de detección, lo que indica que las concentraciones encontradas son válidas.

6.5.2 Cobre

- Porcentaje de recuperación

El porcentaje de recuperación se calculó para determinar si hubo pérdidas en la concentración de cobre durante el proceso de extracción; éste se obtuvo considerando la masa del metal añadida al filtro y la registrada por el equipo de EAA. Los resultados mostraron un valor de 102%, lo que indica confiabilidad de los resultados obtenidos y del proceso de extracción desarrollado. (Apéndice I).

A continuación, se muestran los resultados de la concentración de cobre en los dos periodos de estudio.

Tabla 18.

Concentración de cobre en la Est. Ciudadela Real de Minas – 2016

Est. Ciudadela Real de Minas – 2016			
Fecha	Jornada	Concentración de metal en la tira (mg/l)	Concentración de metal por vol. de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
27-may-2016	Día	1,35	0,224
27-may-2016	Noche	1,28	0,213
28-may-2016	Día	1,30	0,216
28-may-2016	Noche	1,30	0,216
29-may-2016	Día	1,28	0,213
29-may-2016	Noche	1,26	0,210
30-may-2016	Día	1,25	0,207
30-may-2016	Noche	1,25	0,207
31-may-2016	Día	1,21	0,202
31-may-2016	Noche	1,41	0,235
01-jun-2016	Día	0,90	0,150
01-jun-2016	Noche	1,38	0,229
02-jun-2016	Día	0,93	0,155
02-jun-2016	Noche	0,88	0,147

Fuente: Autor

Tabla 19.

Concentración de cobre en la Est. Ciudadela Real de Minas – 2017

Est. Ciudadela Real de Minas – 2017			
Fecha	Jornada	Concentración de metal en la tira (mg/l)	Concentración de metal por vol. de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
19-jun-2017	Día	0,949	0,158
19-jun-2017	Noche	0,949	0,158
20-jun-2017	Día	0,916	0,152
20-jun-2017	Noche	0,916	0,152
21-jun-2017	Día	0,916	0,152
21-jun-2017	Noche	0,916	0,152
22-jun-2017	Día	1,43	0,238
22-jun-2017	Noche	1,43	0,238
23-jun-2017	Día	1,43	0,238
23-jun-2017	Noche	0,900	0,150
24-jun-2017	Día	1,44	0,240
24-jun-2017	Noche	1,41	0,235
25-jun-2017	Día	0,916	0,152

25-jun-2017	Noche	0,916	0,152
Fuente: Autor			

En el año 2016 se encontró una concentración máxima de cobre de $0,235 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que corresponde a la fecha del 31 de mayo. A su vez se determinó la concentración mínima de $0,147 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de cobre para la fecha 2 de junio como se muestra en la tabla 18.

En la tabla 19 se demuestra que los niveles de concentración de este metal en el año 2017 estuvieron orientados entre un nivel máximo de $0,238 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la fecha 22 de junio y un nivel mínimo de $0,150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el día 23 de junio.

De acuerdo con los demás metales de estudio, el cobre presenta concentraciones más altas, con comportamiento similar en los dos años. En relación con los parámetros legales, Colombia no dispone de regulación para el caso del cobre. La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) estableció un límite de $1,0 \text{ mg}/\text{m}^3$ para polvos de cobre (partículas de cobre metálico muy pequeñas) (ATSDR, 2004). Los valores reportados en este estudio no superan el estándar de calidad del aire establecido por la OSHA. La presencia de este metal en la zona se debe a la influencia antropogénica relacionada al desgaste de frenos, por ser una zona con tránsito lento y flujo vehicular de aproximadamente 600 vehículos por hora, además, a los procesos de las industrias ladrilleras que demandan la utilización de combustibles como el carbón mineral y la leña, descrito en el apartado 4.4.1.

Teniendo en cuenta la información anterior, el cobre está presente en la fracción respirable y sugiere un riesgo para la salud. Su exposición prolongada puede irritar la nariz, la boca, los ojos y causar dolores de cabeza, mareo, náusea y diarrea. (Apartado 4.1.3)

A continuación, se comparan los resultados obtenidos para las concentraciones de cobre del presente estudio con trabajos realizados en la misma ciudad de muestreo y en ciudades con condiciones similares, como se muestra en la tabla 20.

Tabla 20.

Comparación de resultados con otros estudios

Ciudad y estación de monitoreo	Concentración de cobre por vol. de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Bucaramanga – Est. Ciudadela Real de Minas (Presente estudio)	0,20 (2016) 0,18 (2017)
Bucaramanga – Est. Centro (Caro Marciales & Uribe Laverde, 2008)	0,04
Bogotá, Puente Aranda - Est. La Merced (Pérez Fadul & Hernández, 2006)	0,34
Manizales – Est. Centro (Velasco García, 2005)	-
Riohacha – Est. Cruz Roja (Rojano, Arregoces, & Restrepo, 2014)	0,52
Perú – Est. Manantay (Miranda & Arriaga, 2016)	7,4
España – Est. Plaza de la Cruz (Aldabe, y otros, 2011)	0,038
Ontario's Ambient Air Quality Criteria (Environment, 2012)	50

Fuente: Autor

Al comparar el comportamiento de este metal de manera local, se observa que en la zona centro de Bucaramanga, la concentración es inferior con los reportados en este estudio tal y como se observa en la tabla 20, con concentraciones de 0,04 y 0,180 – 0,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. La presentación de los datos encontrados por Pérez y Hernández en 2006 para la localidad de Puente Aranda en Bogotá muestra que la concentración de cobre es superior en un 40% respecto a la muestra analizada en Bucaramanga en la estación de Ciudadela Real de Minas (presente estudio) y se atribuye principalmente a una importante zona industrial ubicada en la misma localidad.

Un trabajo realizado en 2014 en la Universidad de la Guajira, señala que la concentración de cobre es superior en un 60% con respecto a la reportada en este estudio, pues se trata de una zona con intercepción de mayor tráfico vehicular. En Perú, Miranda y Arriaga encontraron en la estación

de Manantay, concentraciones superiores ($7,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) con respecto a las reportadas en esta publicación, atribuidos a que la estación se encuentra ubicada en uno de los sectores con mayor concentración de vehículos y aserraderos.

Aldabe y Elustondo, en el estudio sobre metales pesados en el aire en la ciudad de Navarra, España reportan valores entre $0,007 - 0,120$ de cobre en PM_{10} , los cuales se encuentran por debajo de las concentraciones halladas en el presente estudio. Finalmente, la norma AAQC de Canadá ha establecido una concentración para 24 horas de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de Cu, que a manera de comparación con este estudio muestra que los datos obtenidos se encuentran por debajo de la normatividad.

6.5.3 Níquel

- Porcentaje de recuperación

El porcentaje de recuperación se calculó para determinar si hubo pérdidas en la concentración de níquel durante el proceso de extracción; éste se obtuvo considerando la masa del metal añadida al filtro y la registrada por el equipo de EAA. Los resultados mostraron un valor de 101%, lo que indica confiabilidad de los resultados obtenidos y del proceso de extracción desarrollado. (Apéndice I).

A continuación, se muestran los resultados de la concentración de níquel en los dos periodos de estudio.

Tabla 21.

Concentración de níquel en la Est. Ciudadela Real de Minas – 2016

Est. Ciudadela Real de Minas – 2016			
Fecha	Jornada	Concentración de metal en la tira (mg/l)	Concentración de metal por vol. de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
27-may-2016	Día	0,035	0,006
27-may-2016	Noche	0,035	0,006
28-may-2016	Día	0,289	0,048
28-may-2016	Noche	0,035	0,006
29-may-2016	Día	0,035	0,006

29-may-2016	Noche	0,289	0,048
30-may-2016	Día	0,056	0,009
30-may-2016	Noche	0,014	0,002
31-may-2016	Día	0,289	0,048
31-may-2016	Noche	0	0
01-jun-2016	Día	0,247	0,041
01-jun-2016	Noche	0,247	0,041
02-jun-2016	Día	0	0
02-jun-2016	Noche	0	0

Fuente: Autor

Tabla 22.

Concentración de níquel en la Est. Ciudadela Real de minas – 2017

Est. Ciudadela Real de Minas – 2017			
Fecha	Jornada	Concentración de metal en la tira (mg/l)	Concentración de metal por vol. de aire (µg/m³)
19-jun-2017	Día	0,247	0,041
19-jun-2017	Noche	0,014	0,002
20-jun-2017	Día	0,904	0,150
20-jun-2017	Noche	0,226	0,038
21-jun-2017	Día	0,247	0,041
21-jun-2017	Noche	0,247	0,041
22-jun-2017	Día	0,247	0,041
22-jun-2017	Noche	0	0
23-jun-2017	Día	0,226	0,038
23-jun-2017	Noche	0,204	0,034
24-jun-2017	Día	0	0
24-jun-2017	Noche	0,247	0,041
25-jun-2017	Día	0	0
25-jun-2017	Noche	0,247	0,041

Fuente: Autor

En la tabla 21 se presentan las concentraciones de níquel calculadas en las muestras de PM₁₀ correspondientes al año 2016 en el que se presentó un valor máximo de 0,048 µg/m³ en varios días de la semana de estudio. En el año 2017 se determinó una concentración máxima de 0,150 µg/m³ para el día 20 de junio como se muestra en la tabla 22. Estos niveles posiblemente causados por la combustión de vehículos livianos que circulan en las vías cercanas al sector o por industrias que en sus procesos realizan la combustión de carbón y/o aceite para la generación de calor o energía (Fuentes de contaminación) Además, se puede apreciar que no hubo presencia o contenido de

níquel en varios días del año 2016 y 2017. Adicionalmente, se observa poca variabilidad en la concentración de este metal en los dos periodos de estudio.

En relación con la normatividad, para el níquel y sus componentes se establece un límite máximo permisible de $0,180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a un tiempo de exposición anual. El presente estudio no permite determinar concentraciones anuales, así mismo y a manera de comparación se encuentra que los valores de Ni no superan los niveles establecidos.

A continuación, se comparan los resultados obtenidos para las concentraciones de níquel del presente estudio con trabajos realizados en la misma ciudad de muestreo y en ciudades con condiciones similares, como se muestra en la tabla 23.

Tabla 23.

Comparación de resultados con otros estudios

Ciudad y estación de monitoreo	Concentración de níquel por vol. de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Bucaramanga – Est. Ciudadela Real de Minas (Presente estudio)	0,024 (2016) 0,046 (2017)
Bucaramanga – Est. Centro (Caro Marciales & Uribe Laverde, 2008)	-
Bogotá, Puente Aranda - Est. La Merced (Pérez Fadul & Hernández, 2006)	-
Manizales – Est. Centro (Velasco García, 2005)	0,008
Riohacha – Est. Cruz Roja (Rojano, Arregoces, & Restrepo, 2014)	0,004
Perú – Est. Manantay (Miranda & Arriaga, 2016)	-
España – Est. Plaza de la Cruz (Aldabe, y otros, 2011)	0,0009
Ontario's Ambient Air Quality Criteria (Environment, 2012)	0,1

Fuente: Autor

Al comparar el comportamiento de este metal con los resultados obtenidos en Manizales de la estación centro en un periodo de muestreo de dos meses en 2005, se observa en la tabla 23 que la concentración de Ni ($0,004 \mu\text{g}/\text{m}^3$) es menor teniendo en cuenta la reportada en este estudio ($0,024 - 0,046 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En el trabajo realizado en la Universidad de la Guajira en 2014, se llevó a cabo un análisis a partir de la información obtenida en la estación ubicada en la Cruz Roja, que representa

una zona con alta influencia vehicular en la que es razonable encontrar concentraciones de metales pesados, pero que en este caso se encontró $0,004 \mu\text{g}/\text{m}^3$; este valor es inferior considerando las concentraciones $0,024 - 0,046 \mu\text{g}/\text{m}^3$ encontradas en la estación de este estudio.

Los resultados encontrados por Aldabe en 2011, en un estudio sobre metales pesados en el aire en la ciudad de Navarra, España reporta un valor promedio de 0,0009 de cobre en PM_{10} , este valor se encuentra por debajo de las concentraciones halladas en el presente estudio ($0,024-0,046 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Finalmente, la norma AAQC de Canadá ha establecido una concentración para 24 horas de $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de Ni, que a manera de comparación con el presente estudio muestra que los datos obtenidos se encuentran por debajo de la normatividad.

6.5.4 Plomo

- Porcentaje de recuperación

El porcentaje de recuperación se calculó para determinar si hubo pérdidas en la concentración de plomo durante el proceso de extracción; éste se obtuvo considerando la masa del metal añadida al filtro y la registrada por el equipo de EAA. Los resultados mostraron un valor de 102%, lo que indica confiabilidad de los resultados obtenidos y del proceso de extracción desarrollado. (Apéndice I).

A continuación, se muestran los resultados de la concentración de plomo en los dos periodos de estudio.

Tabla 24.

Concentración de plomo en la Est. Ciudadela Real de Minas – 2016

Est. Ciudadela Real de Minas – 2016			
Fecha	Jornada	Concentración de metal en la tira (mg/l)	Concentración de metal por vol. de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
27-may-2016	Día	0,203	0,034
27-may-2016	Noche	0,122	0,020
28-may-2016	Día	0,095	0,016

28-may-2016	Noche	0,176	0,029
29-may-2016	Día	0,095	0,016
29-may-2016	Noche	0,095	0,016
30-may-2016	Día	0,095	0,016
30-may-2016	Noche	0,176	0,029
31-may-2016	Día	0,095	0,016
31-may-2016	Noche	0,095	0,016
01-jun-2016	Día	0,068	0,011
01-jun-2016	Noche	0,068	0,011
02-jun-2016	Día	0,122	0,020
02-jun-2016	Noche	0,095	0,016

Fuente: Autor

Tabla 25.

Concentración de plomo en la Est. Ciudadela Real de Minas – 2017

Est. Ciudadela Real de Minas – 2017			
Fecha	Jornada	Concentración de metal en la tira (mg/l)	Concentración de metal por vol. de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
19-jun-2017	Día	0,149	0,025
19-jun-2017	Noche	0,149	0,025
20-jun-2017	Día	0,149	0,025
20-jun-2017	Noche	0,203	0,034
21-jun-2017	Día	0,122	0,020
21-jun-2017	Noche	0,122	0,020
22-jun-2017	Día	0,149	0,025
22-jun-2017	Noche	0,122	0,020
23-jun-2017	Día	0,122	0,020
23-jun-2017	Noche	0,149	0,025
24-jun-2017	Día	0,122	0,020
24-jun-2017	Noche	0,122	0,020
25-jun-2017	Día	0,149	0,025
25-jun-2017	Noche	0,068	0,011

Fuente: Autor

Las concentraciones de plomo obtenidas en las partículas de PM₁₀ mostraron valores similares para el mínimo y máximo diario; 0,011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,034 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, en 2016 y 2017.

El plomo hallado se puede atribuir al que ha sido añadido a la gasolina y que luego va a ser emitido por el sistema de escape de vehículos como sales inorgánicas del mismo.

La Resolución 2254 de 2017 fija para el plomo y sus componentes una concentración anual de 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El presente estudio no permite determinar concentraciones anuales, así mismo y a

manera de comparación se encuentra que los valores de Pb en la estación de ciudadela real de minas son inferiores y no sobrepasan la norma. La resolución 610 de 2010, que tuvo vigencia hasta diciembre de 2017; establece para plomo y sus compuestos un tiempo máximo permisible de $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un monitoreo continuo de 24 horas, que también resulta inferior para este estándar.

A continuación, se comparan los resultados obtenidos para las concentraciones de plomo del presente estudio con trabajos realizados en la misma ciudad de muestreo y en ciudades con condiciones similares, como se muestra en la tabla 26.

Tabla 26.

Comparación de resultados con otros estudios

Ciudad y estación de monitoreo	Concentración de plomo por vol. de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Bucaramanga – Est. Ciudadela Real de Minas (Presente estudio)	0,019 (2016) 0,023 (2017)
Bucaramanga – Est. Centro (Caro Marciales & Uribe Laverde, 2008)	0,49
Bogotá, Puente Aranda - La Merced (Pérez Fadul & Hernández, 2006)	10,78
Manizales – Est. Centro (Velasco García, 2005)	0,076
Riohacha – Est. Cruz Roja (Rojano, Arregoces, & Restrepo, 2014)	0,007
Resolución 610 de 2010	1,5 (24 horas)
Perú – Est. Manantay (Miranda & Arriaga, 2016)	23,8
España – Est. Plaza de la Cruz (Aldabe, y otros, 2011)	0,004
Ontario's Ambient Air Quality Criteria (Environment, 2012)	0,5

Fuente: Autor

Al hacer una comparación de manera local, se encuentra que para la zona centro de Bucaramanga, las trazas de plomo fueron las de mayor concentración en aproximadamente un 95%, tal y como se muestra en la tabla 26, atribuidas a fuentes fijas puntuales ubicadas en norte y noroeste de la ciudad.

La presentación de los datos encontrados por Pérez y Hernández en 2006 para la estación La Merced en la localidad de Puente Aranda en Bogotá, muestran concentraciones significativamente superiores ($10,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$) con respecto a este estudio ($0,019 - 0,023 \mu\text{g}/\text{m}^3$), atribuidas principalmente a una importante zona industrial ubicada en la misma localidad.

Al comparar con los resultados obtenidos en Manizales, se encuentra que la concentración registrada por Velasco duplica a la reportada en este estudio, que se debe muy posiblemente a las emisiones de los procesos de las empresas del sector, que trabajan con hornos de aplicación de pintura y hornos de temple en plomo. En el trabajo realizado en 2014 en la Universidad de la Guajira, se encontró que la concentración de Pb es considerablemente menor ($0,007 \mu\text{g}/\text{m}^3$) con respecto a este estudio, a pesar de tratarse de una zona con alto flujo vehicular.

En Perú, Miranda y Arriaga encontraron en la estación de Manantay, concentraciones superiores ($23,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) con respecto a las reportadas en esta publicación, que pueden estar atribuidas a que la estación se encuentra ubicada en uno de los sectores con mayor concentración de vehículos y aserraderos.

En el estudio realizado por Aldabe y Elustondo, sobre metales pesados en el aire en la ciudad de Navarra, España, reportan valores entre $0,0003 - 0,015$ de plomo en PM_{10} , los cuales se encuentran por debajo de las concentraciones halladas en el presente estudio. Finalmente, la norma AAQC de Canadá ha establecido una concentración para 24 horas de $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de Pb, que a manera de comparación con el presente estudio muestra que los datos obtenidos se encuentran por debajo de la normatividad.

6.5.5 Zinc

- Porcentaje de recuperación

El porcentaje de recuperación se calculó para determinar si hubo pérdidas en la concentración de zinc durante el proceso de extracción; éste se obtuvo considerando la masa del metal añadida al filtro y la registrada por el equipo de EAA. Los resultados mostraron un valor de 99%, lo que indica confiabilidad de los resultados obtenidos y del proceso de extracción desarrollado. (Apéndice I).

A continuación, se muestran los resultados de la concentración de zinc en los dos periodos de estudio.

Tabla 27.

Concentración de zinc en la Est. Ciudadela Real de minas – 2016

Est. Ciudadela Real de Minas – 2016			
Fecha	Jornada	Concentración de metal en la tira (mg/l)	Concentración de metal por vol. de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
27-may-2016	Día	0,172	0,029
27-may-2016	Noche	0,267	0,044
28-may-2016	Día	0,031	0,005
28-may-2016	Noche	0	0
29-may-2016	Día	0,139	0,023
29-may-2016	Noche	0	0
30-may-2016	Día	0,119	0,020
30-may-2016	Noche	0,071	0,012
31-may-2016	Día	0	0
31-may-2016	Noche	0	0
01-jun-2016	Día	0	0
01-jun-2016	Noche	0	0
02-jun-2016	Día	0	0
02-jun-2016	Noche	0,744	0,124

Fuente: Autor

Tabla 28.

Concentración de cobre en la Est. Ciudadela Real de minas – 2017

Est. Ciudadela Real de Minas – 2017			
Fecha	Jornada	Concentración de metal en la tira (mg/l)	Concentración de metal por vol. de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
19-jun-2017	Día	0	0
19-jun-2017	Noche	0	0
20-jun-2017	Día	0	0
20-jun-2017	Noche	0	0
21-jun-2017	Día	0	0
21-jun-2017	Noche	0	0

22-jun-2017	Día	0	0
22-jun-2017	Noche	0	0
23-jun-2017	Día	0	0
23-jun-2017	Noche	0	0
24-jun-2017	Día	0	0
24-jun-2017	Noche	0,354	0,059
25-jun-2017	Día	0	0
25-jun-2017	Noche	0	0

Fuente: Autor

Los resultados muestran que la concentración más alta de Zn para 2016 fue de 0,124 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 2 de junio (noche). En 2017, solo se encontró un dato representativo de 0,059 el 24 de junio (noche), los demás días de estudio mostraron valores nulos del metal.

Las emisiones de Zn se pueden atribuir principalmente a vehículos con motor Diésel, lo que relaciona a las fuentes móviles descritas en el apartado 4.2.2 con la presencia de este metal en la atmósfera. En relación a la normativa vigente en Colombia, no se dispone regulación alguna para el caso de Zn.

A continuación, se comparan los resultados obtenidos para las concentraciones de zinc del presente estudio con trabajos realizados en la misma ciudad de muestreo y en ciudades con condiciones similares, como se muestra en la tabla 29.

Tabla 29.

Comparación de resultados con otros estudios

Ciudad y estación de monitoreo	Concentración de zinc por vol. de aire de ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Bucaramanga – Est. Ciudadela Real de Minas (Presente estudio)	0,037 (2016) 0,059 (2017)
Bucaramanga – Est. Centro (Caro Marciales & Uribe Laverde, 2008)	0,050
Bogotá, Puente Aranda - Est. La Merced (Pérez Fadul & Hernández, 2006)	5,07
Manizales – Est. Centro (Velasco García, 2005)	-
Riohacha – Est. Cruz Roja (Rojano, Arregoces, & Restrepo, 2014)	1,94
Perú – Est. Manantay (Miranda & Arriaga, 2016)	90
España – Est. Plaza de la Cruz (Aldabe, y otros, 2011)	0,028

Ontario's Ambient Air Quality Criteria (Environment, 2012)	120
---	-----

Fuente: Autor

Al confrontar con los resultados obtenidos en la estación centro de Bucaramanga, se observa un comportamiento similar con la concentración reportados en este estudio.

En los datos encontrados por Pérez y Hernández en 2006, en la estación La Merced de la localidad de Puente Aranda, considerada como zona industrial muestra concentraciones para zinc bastante altas ($5,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$) lo que demuestra la magnitud industrial de esta zona, con respecto a las concentraciones que se encontraron en este estudio ($0,037 - 0,059 \mu\text{g}/\text{m}^3$), como se muestra en la tabla 29.

La Universidad de la Guajira en el estudio de metales pesados en el aire encontró que las concentraciones ($1,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$) superan notablemente a las encontradas en la estación de Ciudadela real de minas (presente estudio), estas se atribuyen principalmente al parque automotor de la zona.

En Perú, Miranda y Arriaga encontraron en la estación de Manantay, concentraciones de zinc de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que superan considerablemente a las reportadas en esta publicación. En el estudio realizado por Aldabe y Elustondo, en la ciudad de Navarra, España reportan una concentración de zinc en PM_{10} de $0,028 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que se encuentra por debajo de las concentraciones halladas en el presente estudio. Finalmente, la norma AAQC de Canadá ha establecido una concentración para 24 horas de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de Zn, que a manera de comparación se puede decir que no es superada según las concentraciones obtenidas en esta estación.

7. Conclusiones

La calidad del aire del sector Ciudadela Real de Minas para el parámetro de material particulado PM₁₀, no presentó valores altos en cuanto a la generación de riesgos en la salud de la población (34,6 µg/m³, 2016 – 35,4 µg/m³, 2017) teniendo en cuenta la Resolución 2254 de 2017 (100µg/m³) y la Guía de la calidad del aire de la OMS (50 µg/m³). Esto se corrobora con el Índice de Calidad del aire local que presenta un nivel “aceptable” y el nacional con un nivel “Bueno”.

De acuerdo con el análisis de este estudio, las concentraciones de PM₁₀ en la semana del año 2016 son mayores que las del año 2017, dado que esta última es una semana de receso estudiantil, asimismo se ve la influencia de la medida implementada, es decir, la restricción de vehículos en la calle de los estudiantes. Otro factor es la velocidad de los vientos presentados en el año 2016 que por su intensidad favorecen la dispersión de los contaminantes.

La obtención de las rosas de los vientos para los periodos estacionales mostró que la dispersión de los contaminantes se desplaza principalmente en dirección norte y noreste, transportando hacia el área de influencia directa las emisiones generadas por la Zona Industrial Ladrillera del barrio Porvenir; posiblemente incrementando el contenido del material particulado y afectando la calidad del aire en el sector.

El presente estudio determinó las concentraciones de metales en el PM₁₀ de la estación Ciudadela real de minas para las semanas del 27 de mayo al 2 de junio de 2016 y 19 al 25 de junio de 2017. Estas concentraciones se encuentran de la siguiente manera Cu > Ni > Pb > Zn, pero el número de determinaciones presenta una cobertura limitada, no permite hacer una comparación con la norma 2254 del 01 de noviembre del 2017, ya que se requieren datos anuales y contempla niveles permisibles únicamente para níquel y plomo.

Los metales más abundantes en la concentración de PM₁₀ son Cu y Ni, su aparición se asocia directamente con el parque automotor que circula en la zona. Estos metales a exposiciones prolongadas generan riesgos en la salud que van desde diferentes tipos de irritaciones, náuseas, dolores de cabeza; aun así, la probabilidad de presentar enfermedades asociadas al cáncer es reducida.

De acuerdo a las concentraciones promedio el Zn (0,037 y 0,059 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el Pb (0,019 y 0,023 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) son las especies con menores aportes entre los metales analizados, pero se halla su presencia en las partículas inhalables. Este último metal considerado por la anterior legislación colombiana (Resolución 610 de 2010) como contaminante tóxico en el aire, no alcanzó el nivel máximo permisible.

En el análisis por espectroscopia de absorción atómica se adoptó el método IO 3.2 estandarizado por la EPA para garantizar la veracidad de las lecturas, permitiendo conocer las concentraciones reales y específicas de diferentes elementos metálicos (Cu, Ni, Pb, Zn) que están inmersos en el material particulado suspendido en el aire del sector de estudio.

8. Recomendaciones

Este trabajo será una herramienta importante para estudios posteriores y como modalidad para evaluar las concentraciones de metales pesados a lo largo del tiempo en el sector y en toda el Área Metropolitana de Bucaramanga.

Se considera necesario realizar este tipo de análisis a dos tiras por día muestreado para realizar todos los ensayos por duplicado y obtener mayor confiabilidad y seguridad en los resultados.

Este estudio servirá como base para que las autoridades encargadas tengan conocimiento sobre el estado actual del sector y empiecen a implementar seguimientos continuos, estrategias educativas, informativas y de mitigación para la disminución de metales en el aire.

Es importante mantener las condiciones de trabajo del equipo de EAA, para evitar lecturas erróneas y que el mismo se descalibre, igualmente, de ser posible, que se realicen mantenimientos periódicos a los equipos, esto con el fin de evitar inconvenientes técnicos en futuras investigaciones.

9. Divulgación de los resultados

Los resultados de esta investigación serán expuestos y/o divulgados a las directivas competentes de la Corporación Autónoma de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). De igual forma quedara en la base de datos de esta identidad, como guía para próximos estudios a realizar en el área metropolitana de Bucaramanga.

Referencias bibliográficas

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2004). Resumen de salud pública Cobre.

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2005). Resumen de salud pública Níquel.

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2005). Resumen de salud pública Zinc.

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2007). Resumen de salud pública Plomo.

Ahmed, F., Shah, M. H., & Shaheen, N. (2014). Diurnal and nocturnal variations of trace metals in urban atmospheric particulate matter from Islamabad, Pakistan. *Environ Earth Sci* 71, 817–826.

Alcaldía de Bucaramanga. (2010). *Datos Generales*. Obtenido de <http://versionantigua.bucaramanga.gov.co/Contenido.aspx?Param=9>

Alcaldía de Bucaramanga. (s.f.). *División Político Urbana y Rural*. Obtenido de <http://www.bucaramanga.gov.co/el-mapa/division-politico-urbana/>

Aldabe, J., Elustondo, D., Santamaría, C., Lasheras, E., Pandolfi, M., Alastuey, A., . . . Santamaría, J. (2011). Chemical characterisation and source apportionment of PM2.5 and PM10 at rural, urban and traffic sites in Navarra (North of Spain). *Atmospheric Research*, 191-205.

Área Metropolitana de Bucaramanga. (s.f.). *Normatividad Bucaramanga*. Obtenido de http://www.amb.gov.co/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=83%3Abucaramanga&catid=79%3Ainstitucional&Itemid=938

- Baird, C. (2001). *Química ambiental Barcelona: Reverté S. A.* Obtenido de https://books.google.com.co/books?id=bgUaHUqGPYIC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Bello Gutiérrez, J., & López De Cerain Salsamendi, A. (2001). *Fundamentos de ciencia Toxicológica*. Madrid: Diaz De Santos.
- Brender, J., Hartman, K., Reddy Nanga1, R., Popovych, N., De la Salud Bea, R., Vivekanandan, S., . . . Ramamoorthy, A. (2010). Role of Zinc in Human Islet Amyloid Polypeptide Aggregation. *J Am Chem Soc. July 7; 132(26):* , 8973–8983.
- Callender, E. (2003). Heavy metals in the Environmet - Historical Trends. *Treatise on Geochemistry*, 67-69.
- Camargo Caicedo, Y., Marín, D. H., & Vélez-Pereira, A. M. (2011). Emisiones Atmosféricas de Origen Biológicos. Obtenido de https://books.google.com.co/books?id=K9BBDwAAQBAJ&pg=PA159&lpg=PA159&dq=como+es+el+comportamiento+de+las+particulas+segun+la+velocidad+del+viento&source=bl&ots=Gvbk38Qf_A&sig=6A_KYbUGtEwXSQJE_4x_yVOG-j4&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi8zqeI0fPZAhXQslkKHUHfDnsQ
- Canales-Rodríguez, M. Á., Quintero-Núñez, M., Castro-Romero, T. G., & García-Cuento, R. O. (2014). Las Partículas Respirables PM10 y su Composición Química en la Zona Urbana y Rural de Mexicali, Baja California en México. *Información Tecnológica – Vol. 25 N° 6*.
- Carnicer, J. M. (2008). Contaminación atmosférica.
- Caro Marciales, D. N., & Uribe Laverde, L. F. (2008). *Evaluación de la concentración de metales contenidos en material particulado respirable y su incidencia sobre ambientes intra - extra murales en dos localidades de Bogotá y otras ciudades del país con antecedentes de*

- contaminación atmosférica*. Bogotá: Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Ingeniería Ambiental y Sanitaria.
- Castro Ortiz, H., Castro Suarez, R. F., Chacón Velasco, J. L., Andrea, R. V., & Herrera López, A. B. (s.f.). Caracterización fisicoquímica de material particulado y aplicación de modelos receptor-fuente en el Área Metropolitana de Bucaramanga.
- Catalán-Vázquez, M., Riojas-Rodríguez, H., Jarillo-Soto, E., & Delgadillo-Gutiérrez, H. (2009). Percepción de riesgo a la salud por contaminación del aire en adolescentes de la Ciudad de México. *salud pública de México / vol. 51, no. 2, marzo-abril*.
- Center for Environmental Research Information Office of Research and Development. (1999). Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air. *Compendium Method IO-3.1 Selection, preparation and extraction of filter material*.
- Center for Environmental Research Information Office of Research and Development. (1999). Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air. *Compendium Method IO-3.2 Determination of metals in ambient particulate matter using atomic absorption (AA) spectroscopy*.
- Chica, O., Galvis, N., & Madrid, J. (2007). IDEAM. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021320/02Preliminares.pdf>
- Clean Air Institute. (2012). *La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica*. Washington.
- Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017 - nov. 1). *Resolución No. 2254. Por el cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006 abril 3). *Decreto Número 979. "Por el cual se modifican los artículos 7,10, 93, 94 y 108 del Decreto 948 de 1995."*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política de prevención y control de la contaminación del aire*. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Contaminación-Aire. (s.f.). *Contaminantes del aire*. Obtenido de <https://contaminacion-aire.org/contaminantes/>
- Coordinación de Información e Investigación Ambiental. (2011). *Informe Anual de Calidad del Aire de Bucaramanga 2010*. Bucaramanga: CDMB.
- Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (s.f.). *Estaciones de monitoreo de calidad del aire*. Obtenido de <http://caracoli.cdm.gov.co/cai/cai2/estaciones.html>
- Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (s.f.). *Índice de calidad del aire para el Área Metropolitana de Bucaramanga-IBUCA*. Obtenido de <http://caracoli.cdm.gov.co/cai/cai2/icaibu.php>
- Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (s.f.). *Red de monitoreo de calidad del aire*. Obtenido de <http://caracoli.cdm.gov.co/cai/cai2/>
- Dennis R, C. L., Rojas, M., Orduz, C., Cardona, R., Blanco, A., Egea, E., . . . Cala, L. (2004). *Asthma and other allergic conditions in Colombia: a study in 6 cities*. Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15609767>
- Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU. (2004). *Resumen de la salud Pública Cobre. CAS # 7440-50-8*.

- Doria Argumedo, C. (2017). Caracterización metálica de material particulado PM10 en la atmósfera de Fonseca, La Guajira, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental – Volumen 8 Número 2 – julio - diciembre*.
- Environment, S. D. (2012). Ontario's Ambient Air Quality Criteria. 3-11.
- Eurachem. (2005). *Métodos Analíticos Adecuados a Su Propósito: Guía de Laboratorio Para La Validación de métodos y temas relacionados*. Mexico, D.F.
- EPA. (7 de septiembre de 2016). *Meteorological Processors and Accessory Programs*. Obtenido de https://www3.epa.gov/scram001/metobsdata_procaccprogs.htm
- Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. *ANALES Sis San Navarra; 26 (Supl. 1).*, 141-153.
- Frederic Walton, H., & Reyes, J. (2005). *Análisis químico e instrumental moderno*. España: Reverté S. A. Obtenido de https://books.google.com.co/books?id=htRP2dHJkXgC&printsec=frontcover&dq=Walton,+H.,+Reyes,+Y.,+Análisis+Químico+e+instrumental+moderno.+Ed.,+Revert%C3%A9.,+Espa%C3%B1a,+2005&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj18MS_6e_YAhWCmeAKHajxB_oQ6AEIJjAA#v=onepage&q&f=false
- Fundación para la Salud Geoambiental. (2013). *Material particulado*. Obtenido de <http://www.saludgeoambiental.org/material-particulado>
- Gaitán, M., Cancino, J., & Behrentz, E. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. #26 *Revista de ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. rev.ing. ISSN. 0121-4993. Noviembre*.
- García, J. J. (2000). Uso de algunos indicadores en epidemiología. Segunda parte. *Rev Mex Pediatría* 67(2), 86-88.

- García Lozada, H. M. (2006). Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión estudio de caso: Bogotá. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=T87uEuVP84kC&pg=PA15&lpg=PA15&dq=como+es+el+comportamiento+de+las+particulas+segun+la+velocidad+del+viento&source=bl&ots=W6wbZKL Vn9&sig=5hocgeaa8FH1Vn0fnAzwMOE06yc&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi8zqeI0fPZAhXQslkKHUHfDnsQ6A>
- González Castanedo, Y. (2012). Caracterización fisicoquímica del material particulado atmosférico de origen industrial en Andalucía. Huelva: Universidad de Huelva, Departamento de física aplicada.
- González Delgado, A. N., Orozco Barrenetxea, C., Pérez Serrano, A., Alfayate Blanco, J. M., & Rodríguez Vidal, F. J. (2003). *Contaminación ambiental: una visión desde la química. Madrid: Thomson Editores Spain.* Obtenido de https://books.google.com.co/books?id=nUoOx-8knyUC&pg=PA658&dq=Parker,+A.+Contaminaci%C3%B3n+del+Aire+por+la+Industria;+Revert%C3%A9:+Barcelona&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjn5PCK6u_YAhWjneAKHW_KA2sQ6AEIKzAB#v=onepage&q=Parker%2C%20A.%20Contaminaci%C3%B3n%20d
- GreenFacts. (28 de diciembre de 2017). *GreenFacts Express: latest reports.* Obtenido de <https://www.greenfacts.org/en/index.htm>
- Grupo Gestión del Conocimiento Ambiental. (2017). *Red de monitoreo de calidad del aire del área metropolitana.* Bucaramanga: CDMB.
- Hewitt, C., & Jackson, A. V. (2003). *Handbook of Atmospheric Science: Principles and Applications.* Australia: Blackwell Publishing.

- IDEAM. (2006). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38152/Lineamientos_ldeCalidadAnal%C3%ADtica.pdf/709753b2-4738-43f2-8247-fc8fea3de83f
- IMAS de Educación en el Riesgo de las Minas. (2005). *Guía de Mejores Prácticas 7*. Ginebra, UNICEF.
- López de Romaña, D., Castillo D., C., & Diazgranados, D. (2010). El zinc en la salud humana – i. *Rev Chil Nutr Vol. 37, N°2, junio*.
- Machado, A., Garcia, N., Garcia , C., Acosta, L., Cordova, , A., Linares, M., . . . Velasquez, H. (2008). Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Rev. Int. Contam. Ambient. 24 (4) , 171-182*.
- McKeown, D. (2008). An Assessment of Health Implications Associated with Exposures to Electromagnetic Fields in and next to Hydro Corridors in the City of Toronto. *Toronto Public Health*.
- Merriam. (27 de Enero de 2018). *Definition of pollution*. Obtenido de <https://www.merriam-webster.com/dictionary/pollution>
- Miranda, E., & Arriaga, L. (2016). Evaluación del nivel de concentración de metales pesados en el aire, en los distritos de Callería, Yarinacocha y Manantay, Provincia de Coronel Portillo - Ucayali - Pucallpa - Perú. *Ciudad y Desarrollo , 25-32*.
- Muhammad, A. A., Hassan Ahmed, S., M., R. A., A. Qazi, I., & Anwar Baig, M. (2013). Determination of Heavy Metals in Ambient Air Particulate Matter Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Arab J Sci Eng 38, 1655–1661*.
- Municipio de Bucaramanga. (2012). *Plan de Desarrollo Económico*. Bucaramanga: Concejo de Bucaramanga.

- Observatorio de Salud Pública de Santander. (2010). *Informe final del convenio especial de cooperación científica y tecnológica No. 033 de 2009 suscrito entre el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, la Foscal, la CDMB y SSAB*. Bucaramanga.
- Organización Mundial de la Salud. (septiembre de 2016). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Obtenido de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- Organización Mundial de la Salud. (2004). *Guías para la calidad del aire*. Lima.
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*.
- Oyarzun G., M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Rev. Chil EnfRespir* (26), 16-35.
- Pérez Fadul, L. F., & Hernández, L. (2006). *Determinación de metales pesados en partículas respirables e identificación de fuentes de emisión, a partir de un muestreo atmosférico en la localidad de puente Aranda en la ciudad de Bogotá*. Bogotá: Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Pregrado en Ingeniería Ambiental.
- Qi-Li, D., Xiao-Hui, B., Jian-Hui, W., Yu-Fen, Z., Jing, W., Hong, X., . . . Yin-Chang, F. (2015). Characterization and Source Identification of Heavy Metals in Ambient PM10 and PM2.5 in an Integrated Iron and Steel Industry Zone Compared with a Background Site. *Aerosol and Air Quality Research*, 15, 875–887.
- Querola, X., Alastueya, A., Rodriguez, S., Planaa, F., Ruiz, R., Cots, N., . . . Pui, O. (2001). PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain. *Atmospheric Environment* 35 , 6407–6419.
- Quijano Parra, A., Quijano Vargas, M. J., & Henao Martínez, J. A. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM2.5 en Pamplona-Norte de

- Santander-Colombia. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 8, núm. 1, enero-junio, 1-20.
- Quiterio, S. L., Escaleira, V., Sousa, C. R., Maia, L. F., & Arbilla, G. (2004). Metals in Airborne Particulate Matter in Downtown Rio de Janeiro, Brazil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 72, 916–922.
- Raina Pal, M., Gupta, A., & Tripathi, A. (2014). Assessment of heavy metals in suspended particular matter in Moradabad, India. *Journal of Environmental Biology Vol 35*, 357-361.
- Ramos Miras, J. J. (2002). *Estudio de la contaminación por metales pesados y otros procesos de degradación química en los suelos de invernadero del Poniente Almeriense*. Obtenido de <https://goo.gl/kfPZ3b>
- Requena Rodríguez, A., & Tomás Balibrea, L. M. (2008). *Tríadas. Nuevas Lecturas en Ciencia y Tecnología*. Obtenido de <https://goo.gl/AqWJrK>
- Revilla, C. P. (2009). Contaminación por metales pesados . (K. P. Ledezma, Entrevistador)
- Roca Jusmet, J., & Padilla Rosa, E. (2003). Emisiones atmosféricas y crecimiento económico en España. La Curva de Kuznets Ambiental y el Protocolo de Kyoto. *Economía Industrial N.º 351 • / III*.
- Rojano, R., Arregoces, H., & Restrepo, G. (2014). Composición Elemental y Fuentes de Origen de Partículas Respirables (PM10) y Partículas Suspendidas Totales (PST) en el Área Urbana de la Ciudad de Riohacha, Colombia. *Información Tecnológica – Vol. 25 N.º 6*.
- Ruiz Ramos, C. F. (2006). *Caracterización del material particulado en las principales vías del transporte público colectivo y masivo del centro de Bogotá*. Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Ambiental.
- Sbarato, R. D., Sbarato, V., & Ortega, J. E. (s.f.). *Predicción y evaluación de impactos ambientales sobre la atmosfera* 2. Obtenido de

- https://books.google.com.co/books?id=xNnHxgwU_toC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Solarte, P. I., Caicedo, M., & Restrepo, S. (2002). Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Bogotá. *Revista Médica Sanitas, Volumen 5, Número 2*.
- Talbi, A., Yacine, K., Rabah, K., & Menouer, B. C. (2017). Assessment of annual air pollution levels with PM1, PM2.5, PM10 and associated heavy metals in Algiers, Algeria*. *Environmental Pollution*.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy Metals Toxicity and the Environment. NIH Public Access EXS. 101 doi:10.1007/978-3-7643-8340-4_6., 133–164.
- Tobón Orozco, D., Sánchez Gandur, A. F., & Cárdenas Londoño, M. V. (2006). *Regulación ambiental sobre la contaminación vehicular en Colombia: ¿hacia dónde vamos?* Medellín: Centro de Investigaciones Económicas Universidad de Antioquia.
- Vargas R., C. (2011). *Efectos de la fracción gruesa (PM10-2.5) del material particulado sobre la salud humana. Revisión Bibliográfica MINSAL*.
- Velasco García, M. (2005). *La calidad del aire asociado con metales pesados en la ciudad de Manizales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura; Departamento de Ingeniería Química.
- Walton, F., H., & Reyes, J. (1983). Análisis químico e instrumental moderno. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=htRP2dHJkXgC&pg=PA243&dq=espectroscopia+de+absorcion+atomica&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjht5yi5ezZA hWNvFMKHxjEC9MQ6AEILjAB#v=onepage>

&q=espectroscopia%20de%20absorcion%20atomica&f=false

World Health Organization. (2000). *Air Quality Guidelines for Europe Second Edition*. WHO Regional Publications, European Series, No. 91.

WR Plot. (27 de Octubre de 2005). *Manual Wolf-Rainer Hamann with earlier support of Lars Koesterke and many more*. Obtenido de http://astro.uni-tuebingen.de/~rauch/TMAP/WRPLOT/WRPLOT_Guide3.html

WRPLOT View. (14 de noviembre de 2016). *WRPLOT View™ - Freeware*. Obtenido de <https://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>.

Zafra, C. A., Temprano, J., & Tejero, I. (2011). Distribution of the concentration of heavy metals associated with the sediment particles acculated on road surfaces. *Enviromental Technology* , 997-1008.

Apéndices

Apéndice A. Solicitud de datos dirigida a la CDMB para el suministro de información del material particulado y meteorología.

Bucaramanga, Mayo 23 de 2017

Ingeniero
CARLOS SUAREZ
Subdirector
Ordenamiento y Planificación del Territorio
CDMB
Carrera 23 No. 37-63
Bucaramanga

Asunto: solicitud de datos calidad de aire y otros para tesis

Estimado Ingeniero,

Yo Luisa Fernanda Suarez identificada con el número de cedula 1095821346 de Floridablanca, estudiante de la facultad de Química Ambiental de la Universidad Santo Tomás, en calidad de tesista solicito colaboración con la propuesta de proyecto de grado que se titula **"CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO-FRACCIÓN RESPIRABLE PM₁₀ EN LA ESTACION DE MONITOREO CIUDADELA REAL DE MINAS DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA- SANTANDER"**. Para esto estoy requiriendo que la Corporación me suministre el complemento de la información meteorológica en la estación Ciudadela, para el periodo de tiempo comprendido entre 1 de mayo y 30 de junio del 2016, además me suministre la información meteorológica y las concentraciones de PM₁₀ para el periodo de tiempo comprendido entre el 1 de junio y 30 de junio del 2017 con los filtros de las muestras de material recolectado en dicho periodo, esto con el fin de analizarlos.

Ingeniero, agradezco su colaboración en pro de la investigación que pretendo desarrollar y me comprometo a compartir una copia de mis resultados con la entidad.

Cordialmente,

Luisa Fernanda Suárez
Estudiante de Química Ambiental
Universidad Santo Tomás
Dirección: Panorama Bellavista torre 1 apto 100
Celular: 3168236514
Email: luisa.suarez1107@gmail.com

[illegible]

Apéndice C. Concentración de material particulado colectado en la estación Ciudadela real de minas en el año 2016.

27/05/16	28/05/16	29/05/16	30/05/16	31/05/16	01/06/16	02/06/16	
21	28	47	34	43	42	32	0:00
45	42	36	34	40	47	31	1:00
24	31	23	26	42	32	38	2:00
34	41	29	35	36	36	17	3:00
29	48	29	52	36	16	33	4:00
20	49	26	35	33	15	30	5:00
39	57	40	29	38	43	32	6:00
42	32	29	45	24	39	21	7:00
49	60	31	46	44	45	23	8:00
46	70	39	34	69	31	28	9:00
45	34	34	25	45	32	26	10:00
14	25	21	23	33	19	32	11:00
18	35	20	33	32	22	26	12:00
19	20	20	19	27	27	19	13:00
12	17	23	20	22	19	23	14:00
13	13	15	25	16	19	20	15:00
13	23	16	34	23	12	22	16:00
7	8	24	32	24	17	31	17:00
33	20	14	36	26	18	14	18:00
41	19	27	38	26	23	19	19:00
39	21	28	29	23	21	4	20:00
42	36	28	33	36	16	23	21:00
44	22	27	41	23	27	15	22:00
61	36	46	49	69	24	14	23:00

Apéndice D. Concentración de material particulado colectado en la estación Ciudadela real de minas en el año 2017.

19/06/2017	20/06/2017	21/06/2017	22/06/2017	23/06/2017	24/06/2017	25/06/2017	
27	28	22	33	38	35	36	0:00
13	29	23	30	29	45	36	1:00
19	22	23	37	32	24	39	2:00
19	29	26	41	30	34	30	3:00
20	29	27	59	25	36	39	4:00
14	31	27	43	47	36	49	5:00
19	27	32	42	39	28	41	6:00
17	50	32	49	37	33	31	7:00
17	49	27	59	35	38	38	8:00
29	46	29	76	38	38	34	9:00
17	21	32	55	32	35	30	10:00
24	20	27	40	32	28	20	11:00
18	21	24	21	24	26	22	12:00
20	23	17	16	23	26	18	13:00
18	14	16	17	14	25	27	14:00
19	19	22	15	16	23	23	15:00
16	23	23	16	16	14	26	16:00
17	24	18	16	20	21	24	17:00
21	27	21	17	29	21	20	18:00
24	24	19	11	26	23	34	19:00
29	21	30	32	21	24	29	20:00
30	27	29	34	41	33	34	21:00
38	29	42	40	30	39	28	22:00
30	24	37	50	35	40	51	23:00

Apéndice E. Curva de calibración de cobre

Estándar (mg/L)	Absorbancia
0,1	0,007
0,5	0,032
1	0,064
2	0,125
3,5	0,217
4	0,241
R ²	0,9995

Apéndice F. Curva de calibración de níquel

Estándar (mg/L)	Absorbancia
0,5	0,023
1	0,047
2	0,094
3	0,134
5	0,238
6	0,281
R ²	0,9990

Apéndice G. Curva de calibración de plomo

Estándar (mg/L)	Absorbancia
0,5	0,019
0,8	0,031
1	0,039
2	0,076
3	0,114
4	0,149
R ²	0,9997

Apéndice H. Curva de calibración de zinc

Estándar (mg/L)	Absorbancia
0,1	0,095
0,5	0,169
1	0,236
1,5	0,305
3	0,530
4	0,682
R ²	0,9995

Apéndice I. Porcentajes de recuperación de los metales en los filtros de los cuatro metales de estudio.

Metal	C experimental (mg/l)	C teórica (mg/l)	% R
Cu	2,16	2,12	102
Ni	2,15	2,12	101
Pb	2,17	2,12	102
Zn	1,10	1,12	99

Apéndice J. Determinación del límite de detección

Blanco	Absorbancia Cu	Absorbancia Ni	Absorbancia Pb	Absorbancia Zn
1	0,001	-0,001	0,001	0,042
2	0,001	-0,001	0	0,041
3	0	-0,001	0	0,042
4	0	-0,001	0	0,041
5	0	-0,001	0	0,041
6	0	-0,001	0	0,041
7	0	-0,001	0,001	0,042
8	0	-0,001	0	0,042
9	0	-0,001	0,001	0,042
10	0	-0,001	0	0,038
Promedio	0,0002	-0,001	0,0003	0,041
Desviación estándar	0,0004	0	0,0005	0,001
LD	0,001	0,001	0,002	0,044

Apéndice K. Determinación del límite de cuantificación

Blanco	Absorbancia Cu 0,1 mg/l	Absorbancia Ni 0,5 mg/l	Absorbancia Pb 0,5 mg/l	Absorbancia Zn 0,1 mg/l
1	0,005	0,021	0,022	0,095
2	0,006	0,021	0,022	0,096
3	0,006	0,021	0,022	0,094
4	0,006	0,021	0,022	0,094
5	0,006	0,022	0,022	0,094
6	0,006	0,022	0,022	0,094
7	0,006	0,022	0,022	0,094
8	0,007	0,023	0,022	0,093
9	0,006	0,023	0,022	0,094
10	0,006	0,023	0,022	0,093
Promedio	0,006	0,022	0,022	0,094
Desviación estándar	0,0005	0,0009	0	0,001
LC	0,011	0,031	0,022	0,103