

ESTUDIO DE LA EXPOSICIÓN A MATERIAL PARTICULADO PM2.5 A NIVEL
INTRA- Y EXTRA-DOMICILIARIO EN UNA ZONA DE LA CIUDAD DE
BUCARAMANGA

LUISA FERNANDA ÁLVAREZ SERRANO
SILVIA JULIANA GÓMEZ ACOSTA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2015

ESTUDIO DE LA EXPOSICIÓN A MATERIAL PARTICULADO PM2.5 A NIVEL
INTRA- Y EXTRA-DOMICILIARIO EN UNA ZONA DE LA CIUDAD DE
BUCARAMANGA

LUISA FERNANDA ÁLVAREZ SERRANO
SILVIA JULIANA GÓMEZ ACOSTA

DIRECTOR:

Kento Taro Magara Gómez. PhD.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA PRESIDENTE DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

Bucaramanga, Enero de 2016

A Dios, por el amor y la oportunidad otorgada

Para lograr este sueño, a nuestros padres

Por todo el apoyo y esfuerzo brindado

En esta etapa de nuestras vidas.

AGRADECIMIENTOS

A Dios esencialmente por haber sido nuestro guía a lo largo de este proceso, por ser nuestra fortaleza en los momentos difíciles y por brindarnos una vida llena de aprendizajes y experiencias.

Damos gracias a nuestros padres por el apoyo, amor y esfuerzo incondicional en cada momento de alegría y dificultad, por los valores inculcados y las enseñanzas a lo largo de nuestras vidas porque gracias a ellos tuvimos la oportunidad de una excelente formación académica y personal que está reflejada en las mujeres que hoy somos. A nuestros hermanos por ser parte importante de nuestras vidas y acompañarnos en este recorrido. A Mariana por ser mi todo, mi mayor alegría y motivación más grande.

A nuestro director de tesis Kento Taro Magara por enseñarnos, guiarnos y aconsejarnos en cada etapa de este proyecto, y al Ingeniero Manuel Campos por la dedicación y entrega a la hora de instruirnos en la fase de muestreo.

CONTENIDO

	Pág.
1. OBJETIVOS.....	16
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	16
2. MARCO TEORICO	17
2.1. DESCRIPCION PM 2.5.....	17
2.1.1. Fuentes de material particulado	17
2.2. RELACIÓN DE LOS NIVELES DE EXPOSICION INTRA Y EXTRADOMICILIARIA DE MATERIAL PARTICULADO.....	18
2.3. EFECTOS EN LA SALUD.....	20
2.4. EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE.....	22
2.4.1. Deposición de partículas suspendidas.....	22
2.4.2. Efectos en el cambio climático	24
2.5. ESTADO DEL ARTE.....	24
2.6. VARIABLES METEOROLOGICAS.....	26
2.6.1. Radiación solar.....	26
2.6.2. Temperatura.....	27
2.6.3. Velocidad y Dirección del Viento	27
2.6.4. Precipitación.....	28
3. METODOLOGIA.....	29
3.1. PREPARACIÓN DEL MUESTREO	30
3.1.1. Calibración del equipo.....	30

3.1.2	Operación del equipo y toma de muestras.....	30
3.1.3	Preparación del filtro	31
3.2	CAMPAÑA CUATRIMESTRAL DE MUESTREO DE MATERIAL PARTICULADO PM 2.5 A NIVEL EXTRA-DOMICILIARIO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO SELECCIONADOS.	31
3.2.1	Selección del sitio.	31
3.2.2	Descripción del equipo	33
3.2.3	Monitoreo.	34
3.3	CAMPAÑA CUATRIMESTRAL DE MUESTREO DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5 A NIVEL INTRA-DOMICILIARIO EN UN NUMERO DETERMINADO DE VIVIENDAS EN LA ZONA DE INFLUENCIA DE LOS PUNTOS DE MUESTREO SELECCIONADOS.	35
3.3.1	Selección del sitio y vista previa a los hogares seleccionados.....	35
3.3.2	Descripción del equipo.	36
3.3.3	Monitoreo.	37
3.4	EVALUACION DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LAS CONCENTRACIONES AMBIENTALES DE PM 2.5 DURANTE CUATRO MESES EN UNA ZONA DE ALTO TRAFICO VEHICULAR DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA.	37
3.5	DETERMINACION DE LOS NIVELES DE EXPOSICION INTRA-DOMICILIARA a PM2.5 POR 24 HORAS EN MÁS DE CIENTO VIVIENDAS UBICADAS EN LA ZONA DE STUDIO.	38
3.6	CORRELACION DE LOS NIVELES DE EXPOSICION INTRADOMICILIARIA A PM2.5 CON LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN EL INTERIOR DE LAS VIVIENDAS EN ESTUDIO EN EL PERIODO DE MUESTREO.....	39
4	RESULTADOS	40

4.1	DETERMINACION DE LOS NIVELES DE EXPOSICION DE PM 2.5 A NIVEL INTRA-DOMICILIARIO.	40
4.2	CORRELACION DE LOS NIVELES DE EXPOSICION INTRADOMICILIARIA A PM 2.5 CON LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS AL INTERIOR DE LAS VIVIENDAS.	45
4.3	EVALUACION DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LAS CONCENTRACIONES AMBIENTALES DE PM2.5 EN LA ZONA DE MUESTREO.	54
5	CONCLUSIONES	64
6	RECOMENDACIONES.....	65
7	ANEXOS.....	66
8	BIBLIOGRAFIA.....	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Deposición húmeda y seca de partículas.....	23
Figura 2 . Metodología a seguir en el proyecto	29
Figura 3 Punto de Muestreo.....	32
Figura 4 Referencia del equipo URG-3000 ABC.....	33
Figura 5 Características del equipo URG- 3000 ABC.	34
Figura 6 Referencia Bombas TUFF.	36
Figura 7 Características de las Bombas TUFF	37
Figura 8 Área de muestreo barrió San Miguel.....	41
Figura 9 Rosa de los vientos.....	41
Figura 10 Fotografía Rosa de los vientos en el área de muestreo.....	42
Figura 11 Correlación estadística variables meteorológicas y concentración PM2.5	62

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5.	44
Gráfica 2 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5 y uso de ventilador.	46
Gráfica 3 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5 y uso de productos de limpieza.	47
Gráfica 4 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5 y uso de insecticidas y/o mata plagas.	48
Gráfica 5 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5 y fumadores cercanos.	49
Gráfica 6 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5 y uso de pegantes.	50
Gráfica 7 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5 y encendido de velas y/o incienso.....	51
Gráfica 8 Concentración Intra y Extra-domiciliaria de PM2.5.	53
Gráfica 9 Concentración Extradomiciliaria de PM2.5.	55
Gráfica 10 Concentración Extradomiciliaria de PM2.5 y temperatura.	57
Gráfica 11 Concentración Extradomiciliaria de PM2.5 y precipitación.	58
Gráfica 12 Concentración Extradomiciliaria de PM2.5 y velocidad del viento	59
Gráfica 13 Concentración Extradomiciliaria de PM2.5 y humedad.	60
Gráfica 14 Concentración Extradomiciliaria de PM2.5 y radiación solar.	61

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1 Registro de inspección en físico	66
Anexo 2 Tabla de muestreo Intradomiciliario	67
Anexo 3 Tabla de concentraciones Extradomiciliarias	72
Anexo 4 Tabla de concentración Intradomiciliaria y uso de químicos	73
Anexo 5 Tabla de concentración Intradomiciliaria y uso de insecticidas	74
Anexo 6 Tabla de concentración Intradomiciliaria y fumadores cercanos.....	75
Anexo 7 Tabla de concentración Intradomiciliaria y uso de pegantes.....	76
Anexo 8 Tabla de concentración Intradomiciliaria y encendido de velas y/o incienso	77
Anexo 9 Tabla de concentración Intradomiciliaria y uso de ventiladores	78
Anexo 10 Tabla de concentración Extradomiciliaria y variables meteorológicas ..	79

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ESTUDIO DE LA EXPOSICIÓN A MATERIAL PARTICULADO PM2.5 A NIVEL INTRA- Y EXTRA-DOMICILIARIO EN UNA ZONA DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

AUTOR(ES): LUISA FERNANDA ÁLVAREZ SERRANO
SILVIA JULIANA GÓMEZ ACOSTA

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): KENTO TARO MAGARA

RESUMEN

Este trabajo de grado consiste en el estudio de la exposición a PM 2.5 a nivel intra- y extra-domiciliario en una zona de la ciudad de Bucaramanga con alto tráfico vehicular. Por una parte se hicieron monitoreos extra-domiciliarios durante cuatro meses en un punto fijo del sector junto con reconocimiento de datos meteorológicos, actividades industriales y otras posibles fuentes en la zona en esa época del año, y así estimar el impacto de estas variables sobre las concentraciones de PM2.5. Por otra parte, simultáneamente se realizaron monitoreos intra-domiciliarios con bombas personales en más de 100 viviendas en el área circundante al punto de muestreo, identificando las actividades desarrolladas al interior de cada una de ellas, para correlacionarlas con la concentración de PM2.5. Los resultados mostraron que estadísticamente el efecto de las variables meteorológicas precipitación y humedad sobre concentración de PM2.5 fue el más representativo; a mayores niveles de estos parámetros disminuye la concentración de PM2.5. Variables como la temperatura, velocidad del viento y radiación solar no tuvieron influencia tan significativa sobre la concentración de PM2.5. Finalmente, no se encontraron correlaciones claras entre las actividades intra-domiciliarias y los niveles de PM2.5, posiblemente debido a la buena ventilación de las viviendas en la zona; como consecuencia, se encontró que la contaminación interior se correlaciona muy bien con la exterior.

PALABRAS CLAVES:

Contaminación atmosférica, PM2.5, concentración, exposición intra-domiciliaria, exposición extra-domiciliaria

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: STUDY OF EXPOSURE TO PM 2.5 AT INDOOR AND OUTDOOR LEVELS, IN AN AREA OF THE CITY OF BUCARAMANGA

AUTHOR(S): LUISA FERNANDA ÁLVAREZ SERRANO
SILVIA JULIANA GÓMEZ ACOSTA

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: KENTO TARO MAGARA

ABSTRACT

This graduation project consists in the study of exposure to PM 2.5 at indoor and outdoor levels, in an area of the city of Bucaramanga with high levels of traffic. Outdoor concentrations were determined through a 4-month sampling campaign in a fixed point in the chosen area, where weather, industrial activities and other sources information in the area were available, Simultaneously, an indoor monitoring campaign was performed using personal pumps in more than 100 homes in the surrounding area. The results showed that precipitation and humidity have a slight correlation with PM2.5 concentration, according to a simple statistical analysis; at higher levels of these parameters, PM2.5 concentration decreases. Other variables such as temperature, wind speed and solar radiation had no significant influence on PM2.5 concentration. Finally, clear correlations between indoor activities and PM2.5 levels could not be found, possibly due to good ventilation, as it is common in tropical weather; therefore, there was a good correlation between indoor and outdoor pollution.

KEYWORDS:

Air pollution, PM2.5, concentration, indoor, outdoor.

INTRODUCCIÓN

La calidad del aire hoy en día requiere del interés de todos debido a que se ha demostrado que existen diversos efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud humana y el medio ambiente.

La organización mundial de la salud (OMS) ha establecido una relación entre el material particulado y los efectos a la salud humana resaltando que el material particulado PM2.5 o partículas de diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micras, presentes en el humo y la neblina son más peligrosas que las partículas de mayor tamaño, ya que estas pasan por inhalación al torrente sanguíneo (OMS, Organización Mundial de la Salud 2014); una de las principales fuentes de PM2.5 es la combustión en vehículos, plantas energéticas, quema de madera, y otros procesos industriales.

En tiempo de exposiciones cortas a PM2.5 se pueden empeorar enfermedades pulmonares como el asma y la bronquitis aguda, así como provocar enfermedades respiratorias inclusive en la población sana. Por otro lado los efectos en el ambiente son notables ya que puede llegar a causar degradación de bosques, lagos y suelos, daños a la vida silvestre, así como la corrosión de los materiales de los edificios o construcciones entre otros (Instituto nacional de Ecología 2011).

Es importante resaltar que el aumento de las concentraciones de material particulado no se debe únicamente a los procesos de combustión, tráfico vehicular, procesos industriales, entre otros que se generan en un ambiente externo sino que existen actividades que se realizan al interior de las viviendas o ambientes cerrados que pueden influir en el aumento de la concentración de PM2.5.

Es debido a esto la importancia de realizar el estudio de la exposición a material particulado PM2.5 a nivel intra- y extra- domiciliario en una zona de alto tráfico

vehicular en la ciudad de Bucaramanga Con el fin de establecer los niveles a los que están expuestos los habitantes de este sector y relacionar las variables que influyen en la concentración.

Esto se desarrolla mediante la recolección de información por medio de inspecciones y encuestas, monitoreo constante intra domiciliario en dirección radial al punto fijo de muestreo extra domiciliario durante cuatro meses, estudios de laboratorio como el pesaje de filtros, cálculos de concentraciones y análisis de datos para obtener resultados.

Se espera obtener un aumento en las concentraciones de PM2.5 al interior de las viviendas en donde se desarrollan actividades que son fuentes de emisiones como quema de madera, fumadores, talleres de modistería, entre otros, así como establecer una influencia de las diferentes variables meteorológicas sobre las concentraciones del material particulado.

Este trabajo de grado se desarrolló como una fase preliminar del proyecto de investigación titulado “Efecto de la exposición extra- e intra-domiciliaria a contaminación por material particulado con diámetros aerodinámicos menores de 2.5 micras en los niveles de presión arterial de 24 horas y de aterosclerosis subclínica en población adulta residente en Bucaramanga”, financiado por Colciencias según la convocatoria 569 de 2012 para formar un banco de proyectos de ciencia y tecnología. Este proyecto es liderado por la Universidad Autónoma de Bucaramanga con el Dr. Victor Mauricio Herrera Galindo como investigador principal, y tiene como co-investigador al Dr. Kento Taro Magara Gómez de la Universidad Pontificia Bolivariana; el código del proyecto es 124156934459.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

- Estudiar la exposición a material particulado PM2.5 a nivel intra- y extra-domiciliario en una zona de alto tráfico vehicular de la ciudad de Bucaramanga.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar la variabilidad temporal de las concentraciones ambientales de PM2.5 durante cuatro meses en una zona de alto tráfico vehicular de la ciudad de Bucaramanga.
- Determinar los niveles de exposición intra- domiciliaria a PM2.5 por 24 horas en más de cien viviendas ubicadas en la zona de estudio.
- Correlacionar los niveles de exposición intra-domiciliaria a PM2.5 con las actividades desarrolladas en el interior de las viviendas en estudio durante el período de muestreo.

2. MARCO TEORICO

2.1. DESCRIPCION PM 2.5

El PM2.5 son partículas finas por tener un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micras. Estas partículas son tan pequeñas que pueden ser observadas sólo con un microscopio electrónico, pueden permanecer suspendidas en el aire y viajar largas distancias. Las partículas pueden ser denominadas partículas de tipo primario cuando son emitidas a la atmósfera directamente y de tipo secundario cuando son generadas por reacciones químicas en la atmósfera (G.E morales 2006).

La composición química de las partículas es muy diversa y depende principalmente tanto de la fuente emisora como del mecanismo de formación de las partículas; la composición típica del PM2.5 incluye sulfatos, nitratos, amonio, plomo, cadmio, carbón orgánico, carbón negro. Estos han sido identificados en numerosas caracterizaciones de partículas llevadas a cabo en varias partes del mundo (Instituto nacional de Ecología 2011). Estas partículas pueden ir evolucionando en la atmósfera en función del tiempo cambiando su forma, composición química y tamaño.

2.1.1. Fuentes de material particulado

Se entiende por fuente de un contaminante el lugar donde o el proceso mediante el cual aquel se produce y es expulsado en la atmósfera. No siempre es por consecuencia de la actividad humana; hay procesos naturales tales como el rocío del agua de mar, partículas de polen, polvo, y partículas provenientes de erupciones volcánicas y procesos geotérmicos, así como de materiales arrastrados por los vientos derivados de la erosión del suelo (Puigcerver & Carrascal 2008). Las partículas más gruesas permanecen en la atmósfera poco tiempo ya que por su peso tienen una velocidad de sedimentación alta y generalmente son emitidas por fuentes naturales las cuales se encuentran por todo el planeta; las antropogénicas

se concentran básicamente en países desarrollados y, dentro de estos, en zonas densamente pobladas o industrializadas, proceso de generación de calor a nivel industrial, quema de combustibles fósiles, quema de residuos a campo abierto, incendios forestales, quemas controladas y en la agricultura pueden emitir cantidades importantes de material particulado (Puigcerver & Carrascal 2008).

Una fuente importante de material particulado son los vehículos, los cuales utilizan combustibles como la gasolina y el diésel, también emiten material particulado por el desgaste de llantas y frenos en menor proporción. En cuanto al material particulado, habría que mencionar que la fracción proviene en un 70% de motores diésel en áreas urbanas (Puigcerver & Carrascal 2008).

2.2.RELACIÓN DE LOS NIVELES DE EXPOSICION INTRA Y EXTRADOMICILIARIA DE MATERIAL PARTICULADO

La contaminación de espacios interiores puede representar un riesgo importante para la salud humana, si se considera que en general los individuos permanecen más del 80% de su tiempo en ambientes interiores y 60% de éste en sus hogares. En los países en vías de desarrollo la contaminación de interiores deriva principalmente de las actividades diarias como cocinar y calefacciones, debido al uso de combustibles que emiten contaminantes de alta toxicidad (Gil, Caceres, Quiñones, et al. 1997) (Pino et al. 1998). Sin embargo, en muchas de las grandes ciudades de mundo, una fuente importante de contaminación de interiores lo constituye el aire que se infiltra del exterior, el cual, frecuentemente es de mala calidad y contiene cientos de sustancias químicas peligrosas para la salud humana (Gil & Adonis 1996) (Gil, Caceres & Adonis 1997).

Investigaciones desarrolladas en los últimos 15 años han demostrado que la calidad del aire de espacios interiores es con frecuencia tanto o más mala que la de exteriores implicando graves peligros para la salud humana (Adonis 1985) ya que la mayor parte de la población gasta entre un 75 y 90% de su tiempo en interiores

(Lebowitz 1985),. El aire en espacios interiores contiene una gran variedad de contaminantes físicos, químicos y biológicos que son liberados por diversas fuentes entre ellas el aire exterior, materiales de edificación y actividades que desarrollan las personas (calefacción, cocción, hábito de fumar, entre otras) (Gil, Caceres, Quiñones, et al. 1997).

El clima es un factor determinante en el estilo de vida de las personas; en países con temperaturas bajas o que presentan estaciones es habitual encender la calefacción en época de invierno y el aire acondicionado en verano para tener la temperatura ideal y que las personas se sientan confortables. Esto hace que se cree un ambiente más cerrado en donde se reduce la ventilación y por tanto la concentración extra domiciliar no influye en la del interior.

Entre marzo y abril del año 2004 se realizó un monitoreo de PM_{2.5} en seis casas seleccionadas en Hong Kong, China, buscando relacionar la exposición a nivel intra- y extra- domiciliario (Cao, 2004); los resultados mostraron que dos terceras partes del PM_{2.5} a nivel intra-domiciliario provienen del exterior de la residencia, mientras que una tercera parte se genera dentro de la casa; también se mostró que la exposición a PM_{2.5} en esta región se da mayormente a nivel intra-domiciliario, esto debido a que en promedio sus habitantes pasan entre el 65% y el 70% del tiempo dentro de sus domicilios en donde se realizan actividades que aumentan las concentraciones de PM_{2.5} (hábito de fumar, quema de leña, entre otros). Según datos arrojados por la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), en promedio cerca de un 90% del tiempo estamos en interiores y alrededor de un 65% del tiempo estamos en nuestros hogares, la EPA calcula que el aire interior, muchas veces, puede estar de 2 a 5 veces más contaminado que el exterior y en ocasiones hasta 100 veces.

Un estudio realizado en Barcelona para analizar las concentraciones de PM_{2.5} en interiores y exteriores en 39 escuelas de primaria dio como resultado que el 47% de estas concentraciones provienen del interior en donde el 13% es producido por resuspensión y el 34% por una fuente mixta que comprende fibras de ropa,

partículas de tiza y posible condensación de compuestos orgánicos volátiles. El 53% restante proceden de fuentes exteriores que penetraron en el interior principalmente del tráfico vehicular (Amato et al. 2014).

En Guangzhou se realizó una investigación para comparar las concentraciones de PM_{2.5} a nivel interior y exterior en un edificio, y algunos parámetros meteorológicos. Los resultados determinaron que la mayor contaminación en el exterior se dio en primavera seguida por el invierno, en el interior del edificio no había ninguna fuente de emisión de PM_{2.5} ni ventilación en donde aun así se hallaron concentraciones de PM_{2.5} lo que indica que hay un factor de infiltración por tanto la contaminación al interior siempre va relacionada con la exterior y a su vez con los parámetros meteorológicos (Wang et al. 2015).

2.3. EFECTOS EN LA SALUD

La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud, bien sea en los países desarrollados o en los países en desarrollo. Según estimaciones de 2012, la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 3,7 millones de defunciones prematuras (OMS, Organización Mundial de la Salud 2014).

Las partículas más perjudiciales para la salud son las de un diámetro aerodinámico menos o igual a 2.5 µm, que pueden penetrar y alojarse en el interior profundo de los pulmones. La exposición crónica a las partículas agrava el riesgo de desarrollar cardiopatías y neuropatías, así como cáncer de pulmón (OMS, Organización Mundial de la Salud 2014).

Existe una estrecha relación cuantitativa entre la exposición a altas concentraciones de pequeñas partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}) y el aumento de la mortalidad o morbilidad diaria y a largo plazo. A la inversa, cuando las concentraciones de partículas pequeñas y finas son reducidas, la mortalidad conexas también desciende, en el supuesto de que otros factores se mantengan sin cambios. Esto permite a las

instancias normativas efectuar proyecciones relativas al mejoramiento de la salud de la población que se podría esperar si se redujera la contaminación del aire con partículas (OMS, Organización Mundial de la Salud 2014).

La contaminación con partículas conlleva efectos sanitarios incluso en muy bajas concentraciones; de hecho, no se ha podido identificar ningún umbral por debajo del cual no se hayan observado daños para la salud. Por consiguiente, los límites de la directriz de 2005 de la OMS se orientan a lograr las concentraciones de partículas más bajas posibles (OMS, Organización Mundial de la Salud 2014).

Actualmente, numerosos estudios epidemiológicos realizados en muchos países del mundo han determinado que la exposición a la contaminación provocada por partículas de PM2.5 presenta asociaciones positivas entre este contaminante y las tasas de mortalidad y morbilidad de la población expuesta. Los efectos en la salud relacionados con la presencia de partículas suspendidas han sido observados a concentraciones que actualmente ocurren en diversos lugares del planeta. Por lo anterior, se considera que cuando las partículas suspendidas, y en especial las partículas PM2.5, entran al medioambiente, constituyen o pueden constituir un peligro para la salud, e incluso para la vida humana (Instituto nacional de Ecología 2011).

Estudios recientes demuestran que el carbono negro forma parte de las PM2.5, y que una vez emitido a la atmósfera puede causar diversos impactos tanto en el medioambiente como en la salud de las personas debido a su elevada toxicidad, a su porosidad y a su amplia superficie de contacto. Este contaminante puede adsorber una gran variedad de químicos durante el proceso de combustión, incluidos los hidrocarburos aromáticos policíclicos, que pueden ser carcinogénicos y mutagénicos (Instituto nacional de Ecología 2011).

Muchos de los estudios que establecen la relación de la exposición a partículas y el efecto en la salud han identificado que los efectos directos se dan en el tracto respiratorio y que hay producción de anticuerpos. Otros efectos que pueden causar las partículas al ingresar al sistema sanguíneo son incrementar el riesgo de una embolia o un infarto, o bien acelerar la aterosclerosis cuando hay una exposición crónica a éste contaminante (Instituto nacional de Ecología 2011).

2.4. EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE

Una vez que las partículas PM_{2.5} se emiten a la atmósfera, algunas de ellas sufren cambios por reacciones con otros compuestos químicos, son transportadas por procesos atmosféricos, las de mayor tamaño caen por gravedad en un menor tiempo y estas provocan la degradación de bosques, lagos y suelos, daños a la vida silvestre y humana, así como la corrosión de los materiales de los edificios o construcciones. Durante su permanencia en la atmósfera, las partículas provocan diversos impactos al ambiente (Instituto nacional de Ecología 2011).

2.4.1. Deposición de partículas suspendidas

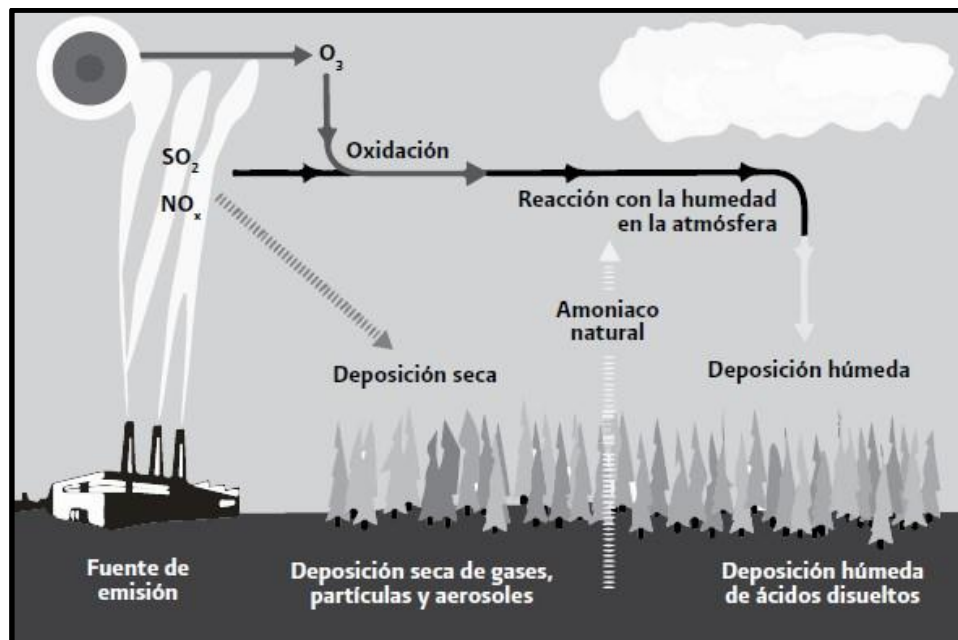
La deposición es uno de los mecanismos más importantes de remoción de partículas ambientales y de otros contaminantes de la atmósfera puede ser húmeda o seca (Instituto nacional de Ecología 2011).

La deposición seca es un proceso complejo, muy poco caracterizado y que parece ser controlado primordialmente por las siguientes variables: estabilidad atmosférica, rugosidad de las superficies y diámetro de la partícula. Este proceso afecta a todas las superficies expuestas, incluidas también las acuáticas. Mientras que las partículas mayores a 5 µm caen a la superficie de la tierra, principalmente por gravitación e impactación inercial, las partículas PM_{2.5} no se remueven rápidamente, sino que viajan grandes distancias antes de su eventual remoción, generalmente por deposición húmeda. La deposición húmeda se produce con la

incorporación de partículas atmosféricas y gases en las gotas que forman las nubes y con la subsecuente remoción de la atmósfera como lluvia o nieve; también se produce cuando las partículas son recogidas por las gotas de lluvia o nieve conforme estas caen (Instituto nacional de Ecología 2011).

Las partículas, entonces, pueden ser depositadas en las hojas de las plantas, los árboles, el suelo en general, las construcciones, etc. Las lluvias de gran abundancia remueven muchas de las partículas acumuladas por deposición seca en las superficies foliares; ambas deposiciones se combinan y se transfieren en conjunto al suelo, donde los constituyentes de las partículas pueden afectar a los ciclos biogeoquímicos (Instituto nacional de Ecología 2011).

Figura 1 Deposición húmeda y seca de partículas



Fuente. Comisión de Cooperación Ambiental, "Deposición ácida". Consultado 10 de noviembre, 2010 http://www.cec.org/Storage/35/2619_SOE_AcidDep_es.pdf

2.4.2. Efectos en el cambio climático

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) señala a las partículas ambientales o aerosoles como uno de los contaminantes atmosféricos con mayor impacto en el clima, a pesar de que tienen una vida media más corta que los gases de efecto invernadero (Instituto nacional de Ecología 2011).

Las partículas atmosféricas alteran la cantidad de radiación solar transmitida a través de la atmósfera terrestre. La absorción de radiación solar por partículas atmosféricas junto a la captura de radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre por parte de ciertos gases, intensifica el calentamiento de la superficie terrestre y la baja atmósfera, es el conocido efecto invernadero (concejería del medio ambiente y ordenación del territorio 2004); estos efectos negativos del material particulado sobre el clima puede acarrear consecuencias en la salud humana, la biota y otros componentes ambientales

2.5. ESTADO DEL ARTE

Por primera vez en Colombia, en la ciudad de Pamplona hacia el año 2005 se reportaron concentraciones diarias de PM_{2.5} con el fin de comprobar el cumplimiento con la normatividad Colombiana (Resolución 610 del 2010, mediante la cual se establecen niveles máximos permisibles para diferentes contaminantes del aire, incluido el material particulado PM_{2.5}), así mismo se obtuvieron proyecciones de los promedios geométricos anuales (Quijano & Orozco 2005). Mediante este estudio se logró comprobar el cumplimiento de los muestreos diarios con la norma colombiana, pero la proyección de los promedios geométricos supera ampliamente la norma internacional (EPA) lo que muestra la importancia de implementar acciones encaminadas a reducir las emisiones de PM_{2.5}.

En donde se evidenció que el material particulado PM_{2.5} se encontraba en niveles por encima de los niveles permisibles fue en Bogotá mediante un estudio realizado en el año 2007 (Gaitan et al. 2007); estos niveles sobrepasaron sus límites sobre

todo en la zona industrial de la ciudad; por el contrario los niveles de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono no demostraron ser significativos. Así mismo, este estudio logró compilar la información meteorológica necesaria para predecir los patrones de viento. Para mediciones de PM10 los valores muestreados superaron los estándares de calidad más de un 40% de los días muestreados y en la zona industrial cerca del 90% de los días.

En Medellín se realizó un estudio en conjunto entre la Universidad de Antioquia, la Alcaldía de Medellín, la Alcaldía de Itagüí y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, publicado en el año 2007 en el cual se buscaba relacionar la contaminación atmosférica con los efectos sobre la salud de la población de Medellín y su área metropolitana (Martinez et al. 2007). Mediante este estudio se comprobó con un alto grado de confiabilidad esta relación, mostrando que la contaminación atmosférica genera efectos nocivos en el sistema respiratorio, aumento de síntomas de trastornos neuro-psicológicos y una alta proporción de muertes de sus habitantes por enfermedades cardiorrespiratorias y de cáncer de pulmón.

Otro estudio realizado en esta ciudad entre el año 2008 y 2009 pudo evidenciar la relación positiva entre la contaminación del aire por PM2.5 y PM10 con la consulta en centros médicos por enfermedades respiratorias como asma, bronquitis, infecciones y rinitis (Gaviria et al. 2011). Este estudio fue realizado debido la creciente preocupación sobre los efectos adversos de la contaminación del aire sobre la salud humana, asociados al desarrollo urbanístico, al crecimiento del parque automotor y al uso de combustibles fósiles de mala calidad como el diésel. A través de este estudio se evidenció una mayor afectación a la salud humana por PM10 que por PM2.5; a su vez, se pudo determinar que las consultas por afecciones respiratorias disminuyen los fines de semana (sábados y domingos), lo que coincide con el descenso en las emisiones de PM10 y PM2.5 durante estos días.

2.6. VARIABLES METEOROLOGICAS

A continuación se da a conocer la relación entre las variables meteorológicas como radiación solar, temperatura, precipitación, velocidad y dirección del viento y humedad con el material particulado PM2.5; las cuales aportan en los procesos de transporte, transformaciones físicas y/o químicas de este contaminante.

2.6.1. Radiación solar.

El interés por las partículas atmosféricas también es debido al hecho que afectan al balance de la radiación terrestre. Los aerosoles atmosféricos influyen en el clima de la tierra, cambiando la cantidad de entrada de radiación solar y la radiación de onda larga terrestre saliente retenido en el sistema de la tierra (Agencia de Salud publica de Barcelona 2013)

Esto ocurre a través de distintos mecanismos: algunos de los efectos directos de las partículas (ya sean sólidas o líquidas aerosoles) consisten en cualquier interacción directa de la radiación con el aerosol atmosférico, ya sean por absorción o dispersión. Otros efectos, -secundarios o indirectos-, consisten en la modificación de las nubes de aerosoles atmosféricos (Agencia de Salud publica de Barcelona 2013).

Los efectos climáticos de los aerosoles son la mayor fuente de incertidumbre en las predicciones futuras del clima. En su Tercer Informe, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, señaló: Si bien los cambios de radiación debidos a gases de efecto invernadero pueden determinarse con un grado razonablemente alto de precisión, las incertidumbres relativas a los cambios de radiación debidos a los aerosoles siguen siendo grandes, y dependen en gran medida de las estimaciones de los estudios de modelos mundiales que son difíciles de verificar en el momento actual (Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climatico 2007).

2.6.2. Temperatura

La temperatura está relacionada con la energía calorífica de los rayos solares y es importante porque determina la formación de las nubes, afecta los valores de humedad atmosférica o cantidad de vapor de agua que se encuentra en el aire, e influye en la presión atmosférica, es decir, la fuerza que ejerce el peso del aire sobre la superficie terrestre (Cruz & Jimenez 2006).

La importancia de la temperatura en la dinámica atmosférica, radica en la influencia que esta genera en la movilización y limpieza de grandes cantidades de polvo, humo, y partículas suspendidas en el aire, transportándolos a través de cerros, valles y cañadas; en este proceso de limpieza del aire, también participa la lluvia que precipita al suelo las partículas suspendidas existentes. Cuando el ciclo de movimiento del aire no ocurre se tiene el riesgo de exponer a la población a respirar un aire más contaminado de lo normal debido a que el aire se encuentra estancado y la dispersión de contaminantes es prácticamente nula, impidiendo así que (Cruz & Jimenez 2006) “la dilución del contaminante llegue hasta un punto donde las concentraciones cerca del suelo sean inocuas” (Organización Panamericana de la Salud 1985).

2.6.3. Velocidad y Dirección del Viento

El viento es una masa de aire que puede presentar movimientos verticales de ascenso o descenso (convección) o en sentido horizontal (advección). Estos movimientos se dan gracias al calentamiento solar, que generan gradientes de presión horizontal creando movimientos en las masas de aire (Cruz & Jimenez 2006).

Cuando no hay presencia de nubes en el aire se presentan zonas de divergencia en superficie, lo que genera la evacuación horizontal de las masas de aire que se producen en las regiones de alta presión, pero cuando el aire presenta “alta nubosidad se presentan zonas de convergencias a bajos niveles (Ayllon 1996),

donde las masas de aire tienden a ascender. Los movimientos verticales son de gran importancia debido a la formación de fenómenos como la turbulencia que favorecen la dispersión de los contaminantes y los bioaerosoles en la atmósfera baja (Cruz & Jimenez 2006).

La velocidad del viento es un factor determinante en la concentración de los contaminantes y los bioaerosoles; presentando una relación inversa con la velocidad del viento, es decir que “en presencia de velocidades de viento muy bajas condiciones atmosféricas estables se impiden la dispersión de los contaminantes (Organización Panamericana de la Salud 1985) aumentando así su concentración; en “condiciones turbulentas y de fuertes corrientes verticales, favorecen la dispersión de los contaminantes (Font tullet n.d.) disminuyendo de esta manera los efectos adversos que puedan tener en la salud (Cruz & Jimenez 2006).

2.6.4. Precipitación

La precipitación se origina al elevarse el aire húmedo y enfriarse de manera adiabática hasta casi su punto de rocío, el diámetro de las gotas de agua es del orden de 0.5 a 2.5 mm, y se originan gracias a las velocidades de caída por adhesión que van dando origen al aumento en el diámetro de las gotas. La importancia de este factor meteorológico en la contaminación del aire, radica en la capacidad de esta para lavar la atmósfera, arrastrando con ella las partículas de contaminantes y depositándolas en el suelo, evitando de esta forma que estas permanezcan suspendidas en el aire y lleguen a afectar la salud de las personas (Cruz & Jimenez 2006).

3. METODOLOGIA

De forma general se presenta La metodología que se aplicó para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

Figura 2 . Metodología a seguir en el proyecto



Fuente. Autores.

A continuación se da a conocer las actividades específicas que se realizaron en el desarrollo de cada etapa de la metodología.

3.1. PREPARACIÓN DEL MUESTREO

3.1.1. Calibración del equipo

La calibración fue realizada por la corporación de la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB) con equipos patrones especializados.

- Se realizó la curva de calibración del flujo volumétrico de operación de los muestreadores URG-3000 ABC respecto al tiempo de muestreo.
- Se compararon las concentraciones extra-domiciliarias de PM2.5 medidas con el URG-3000 ABC con las medidas por el muestreador Partisol (estación centro de la CDMB).
- Se hicieron mediciones de los posibles cambios de flujo volumétrico con el tiempo de operación en las bombas personales TUFF.
- Se hizo una correlación de las concentraciones extra-domiciliarias de PM2.5 medidas con los diferentes equipos de muestreo.

El proyecto contaba con dos equipos muestreadores URG-3000 ABC y 9 bombas personales Casella TUFF; la comparación se realizó con los datos provistos por la autoridad ambiental, que cuenta con un muestreador Partisol para PM2.5 (Thermo Scientific). La calibración de los equipos se llevó a cabo durante el primer mes de ejecución del proyecto.

3.1.2 Operación del equipo y toma de muestras

Inicialmente el equipo se desmontaba y se preparaba para la limpieza, una vez removidos los residuos de los porta filtros se procedía a ensamblar los filtros nuevos, para este procedimiento era necesario tener en cuenta que la manipulación de los filtros debía hacerse con guantes de nitrilo; también fue importante el uso de pinzas de material inerte, de manera que se pudiera prevenir la contaminación de las muestras, de la misma forma se tuvo especial cuidado en el transporte de las muestras hacia el lugar de almacenamiento, en el cual, se debían mantener

refrigeradas. Se hizo el respectivo registro de las anomalías presentadas en el proceso de muestreo.

3.1.3 Preparación del filtro

Los filtros utilizados fueron de membrana de Teflón; éstos fueron pre - pesados y etiquetados según el procedimiento propuesto en el PM2.5 Chemical Speciation Sampler Evaluation Study (EPA 1998) Después de esto se utilizaron en los sitios de muestreo.

Una vez tomadas las muestras, se mantuvieron refrigeradas y se enviaron al laboratorio Estatal de Higiene de Wisconsin donde se realizaron los respectivos análisis físicos y químicos de caracterización, incluyendo el pesaje.

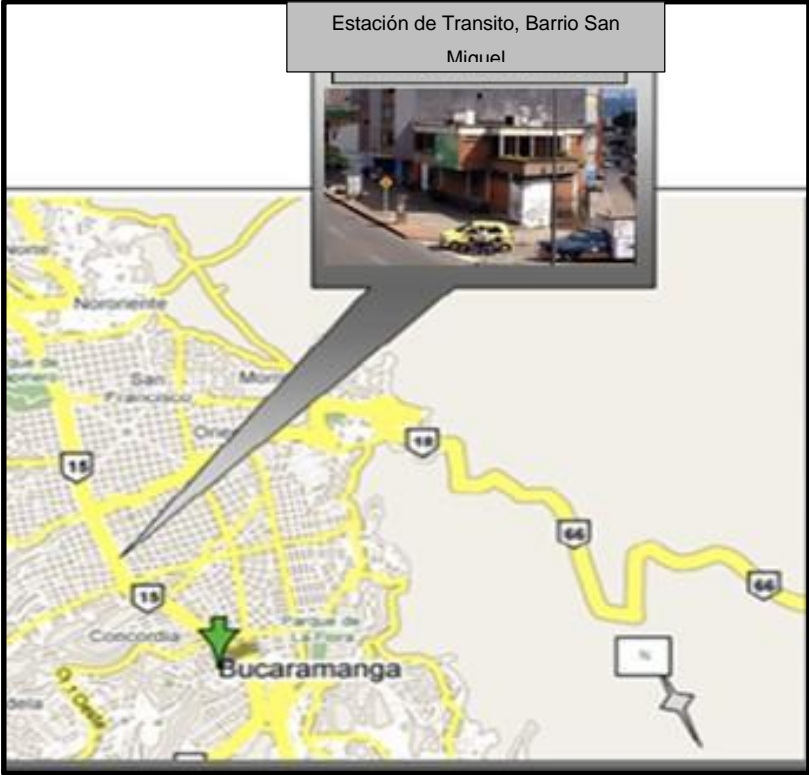
3.2 CAMPAÑA CUATRIMESTRAL DE MUESTREO DE MATERIAL PARTICULADO PM 2.5 A NIVEL EXTRA-DOMICILIARIO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO SELECCIONADOS.

3.2.1 Selección del sitio

El punto de muestreo ubicado en la comuna 6 del barrio San Miguel, en la diagonal 15 con carrera 17 se caracteriza por un gran flujo vehicular y altas concentraciones de material particulado PM10. Este punto es catalogado como zona residencial según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Bucaramanga.

La estación centro de la CDMB, ubicada en la carrera 15 con calle 34, fue seleccionada para la calibración y estandarización del flujo de los equipos por ser un punto fijo de medición de material particulado PM2.5 y PM10, así mismo, esta estación de muestreo se usó como referencia para la toma de datos meteorológicos. Esta zona se clasificó como una zona comercial según el POT.

Figura 3 Punto de Muestreo



Fuente: Grupo de Investigación en Aerosoles, Universidad de la Salle, 2007; Mapa: Google Earth

3.2.2 Descripción del equipo

El equipo utilizado fue el URG-3000 ABC, muestreador de partículas de volumen medio.

Figura 4 Referencia del equipo URG-3000 ABC



Fuente: Autores

El URG-3000 ABC permite la medición simultánea de diferentes parámetros de la calidad del aire. El muestreador está diseñado para acomodar componentes adicionales de muestreo tales como denuders anulares y filtros de espuma de poliuretano (PUF), haciéndolo un muestreador ideal para diferentes escenarios. (URG Corporation, 2014).

El URG - 3000 ABC recolecta 8 muestras simultáneamente, 4 de PM_{2.5} y 4 de PM₁₀.

Figura 5 Características del equipo URG- 3000 ABC.

Bomba de muestreo interna	Sí
Tipo de muestreo	Programable
Número de puertos	8
Flujo	8 L/min

Fuente: Autores

3.2.3 Monitoreo

La campaña de muestreo se realizó durante cuatro meses de forma continua; los filtros se remplazaron cada sexto día y una vez al mes se tomó un blanco estático. Este blanco estático consiste en instalar los filtros en el muestreador por unos minutos y removerlos para su posterior análisis. El propósito de estos blancos era estimar el nivel de contaminación por manipulación de los filtros. Este equipo tiene una capacidad de 4 filtros de material particulado PM2.5, al mes se recolectaron 20 filtros, dando un total en los cuatro meses de 80 filtros para ser analizados en el laboratorio. Además de los blancos, los cuales se retiraron cuatro filtros una vez al mes, por lo tanto se recolectaron 16 filtros para blanco durante la campaña de muestreo.

3.3 CAMPAÑA CUATRIMESTRAL DE MUESTREO DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5 A NIVEL INTRA-DOMICILIARIO EN UN NUMERO DETERMINADO DE VIVIENDAS EN LA ZONA DE INFLUENCIA DE LOS PUNTOS DE MUESTREO SELECCIONADOS

3.3.1 Selección del sitio y vista previa a los hogares seleccionados

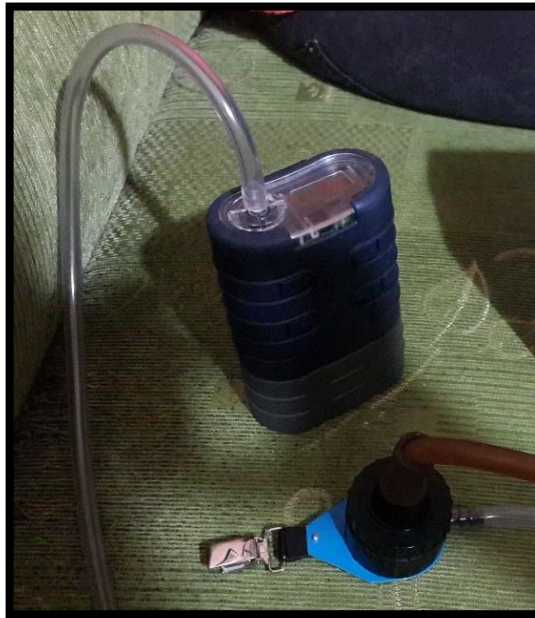
Las viviendas de muestreo seleccionadas están ubicadas en la zona de influencia en dirección radial de los muestreadores fijos en el barrio San Miguel, como el punto es catalogado zona residencial según el POT de Bucaramanga, esto facilita la realización de muestreos intra-domiciliarios.

Para la realización del muestreo de material particulado PM2.5 a nivel intra-domiciliario, se hizo una reunión con la comunidad del barrio San Miguel con el objetivo de explicarles el proyecto, mostrarles el importante papel que desempeña la comunidad para la toma de muestras y el impacto que pueden tener los resultados de este estudio; en esta reunión se les informo los requerimientos de cuidado que debían tener con el equipo y la frecuencia en que se realizaría los muestreos intra-domiciliarios.

3.3.2 Descripción del equipo

El equipo utilizado fue las Bombas TUFF, muestreadores personales.

Figura 6 Referencia Bombas TUFF.



Fuente: autores

Las bombas TUFF están diseñadas como una unidad robusta, sobre-moldeada de caucho que permiten el uso en entornos duros de monitoreo. Ofrece un amplio rango de caudal de 3 L/min a 4.5 L/min. Ideales para la medición de diferentes características de la calidad del aire que van desde la medición de plomo y amianto hasta polvo, gases y vapores.

El muestreador personal TUFF se ha diseñado ergonómicamente para la comodidad del usuario con una pantalla fácil de leer y LEDs de alarma de alta intensidad para la indicación de fallos. La batería tiene alta duración y permite la carga completa en menos de 3 horas. (CASELLA, 2014).

Figura 7 Características de las Bombas TUFF

Bomba de muestreo interna	Sí
Tipo de muestreo	Manual
Número de puertos	1
Flujo	3 – 4.5 L/min

Fuente: Autores

3.3.3 Monitoreo

Se realizaron muestreos fijos intra-domiciliarios de 24 horas durante dos días en cada vivienda, con un promedio de 10 viviendas por semana durante cuatro meses y se determinaron las actividades cotidianas que se realizaban en cada casa las cuales podían afectar la calidad del aire, este diagnóstico se realizó por medio de una encuesta.

Cada equipo tiene una capacidad de 1 filtro de material particulado PM2.5, teniendo en cuenta que al mismo tiempo permanecen funcionando 4 equipos mientras que los otros se cargan, se recolectarán 64 filtros al mes, dando un total en los 4 meses un promedio de 256 filtros para ser analizados en el laboratorio.

3.4 EVALUACION DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LAS CONCENTRACIONES AMBIENTALES DE PM 2.5 DURANTE CUATRO MESES EN UNA ZONA DE ALTO TRAFICO VEHICULAR DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

La variación temporal pretende establecer el impacto sobre las concentraciones de material particulado PM2.5 en la zona monitoreada por el muestreador URG 3000 ABC ubicada en la Dirección de Tránsito, por cambios estacionales y por consiguiente variables climáticas y meteorológicas, cambios en actividades que se realizaron a lo largo de los meses de muestreo en donde se tuvo un registro de las fechas para observar las variaciones en el comportamiento de actividad comercial,

época escolar, períodos vacacionales, época lluviosa, tráfico vehicular, obras civiles, día sin carro etc. A su vez se consultaron los datos meteorológicos de la zona almacenados por la estación centro de la red de monitoreo de calidad del aire de la CDMB. Finalmente se utilizó un método estadístico de regresión lineal simple para hallar si existe una correlación entre los parámetros meteorológicos y las concentraciones extras de PM2.5.

3.5 DETERMINACION DE LOS NIVELES DE EXPOSICION INTRA-DOMICILIARA A PM2.5 POR 24 HORAS EN MÁS DE CIENTO VIVIENDAS UBICADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO

La masa total de PM2.5 recolectada en los filtros se determinó mediante análisis gravimétrico utilizando balanzas de precisión (± 0.001 mg). Los filtros debieron ser acondicionados con anterioridad a una temperatura constante de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad de $35 \pm 3\%$ de humedad relativa, por un mínimo de 24 horas. Esta medición se realizó en los filtros de membrana de teflón, ya que permite determinar con mayor exactitud la concentración de material particulado PM2.5 a la que se expondría el individuo a nivel intra- domiciliario.

Una vez se obtuvo las concentraciones intra-domiciliarias de PM2.5, se procedió a evaluar los factores que puedan afectarlas tales como tipo de fuentes intra-domiciliarias, variables climatológicas, actividades domésticas (si hay fumadores, cocina a nivel de hogar o como negocio, actividades productivas especiales, estado de la vivienda, mascotas). Esta información se recolectó por medio de encuestas.

3.6 CORRELACION DE LOS NIVELES DE EXPOSICION INTRADOMICILIARIA A PM2.5 CON LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN EL INTERIOR DE LAS VIVIENDAS EN ESTUDIO EN EL PERIODO DE MUESTREO

En una primera fase se realizaron inspecciones y cuestionarios para evaluar las actividades que se desarrollaban en el interior de las viviendas como condiciones físicas y potenciales fuentes emisoras de contaminantes. Dentro de estas variables que se midieron se encuentran la extensión medida en m² de la zona social principal de la vivienda (sala-comedor) donde se ubicó la bomba, la presencia de puntos de ventilación medida con el número de ventanas disponibles, el tiempo diario medido en horas en la cual dichas fuentes de ventilación permanecían abiertas. Dentro de las variables de potenciales fuentes internas emisoras de contaminantes se registró la presencia de actividades económicas al interior de la vivienda y el tipo de actividad, el tiempo diario medido en horas en el cual se desarrolló dicha actividad, la presencia y tipo de mascotas, el tipo de combustible usado para cocinar, el tiempo promedio diario en horas que se utilizó y la presencia de humo de cigarrillo dentro de la vivienda medida como promedio diario de cigarrillos o tabacos fumados al interior de la vivienda entre otras.

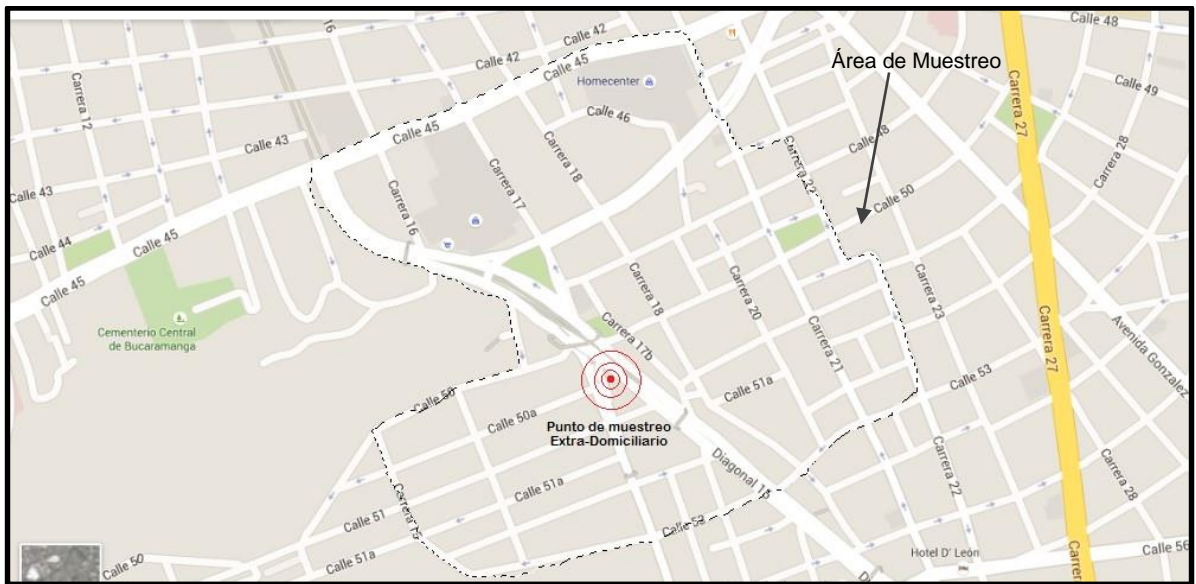
4 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados del proyecto describiéndolos y analizándolos de manera individual con el fin de dar cumplimiento de los objetivos propuestos.

4.1 DETERMINACION DE LOS NIVELES DE EXPOSICION DE PM 2.5 A NIVEL INTRA-DOMICILIARIO

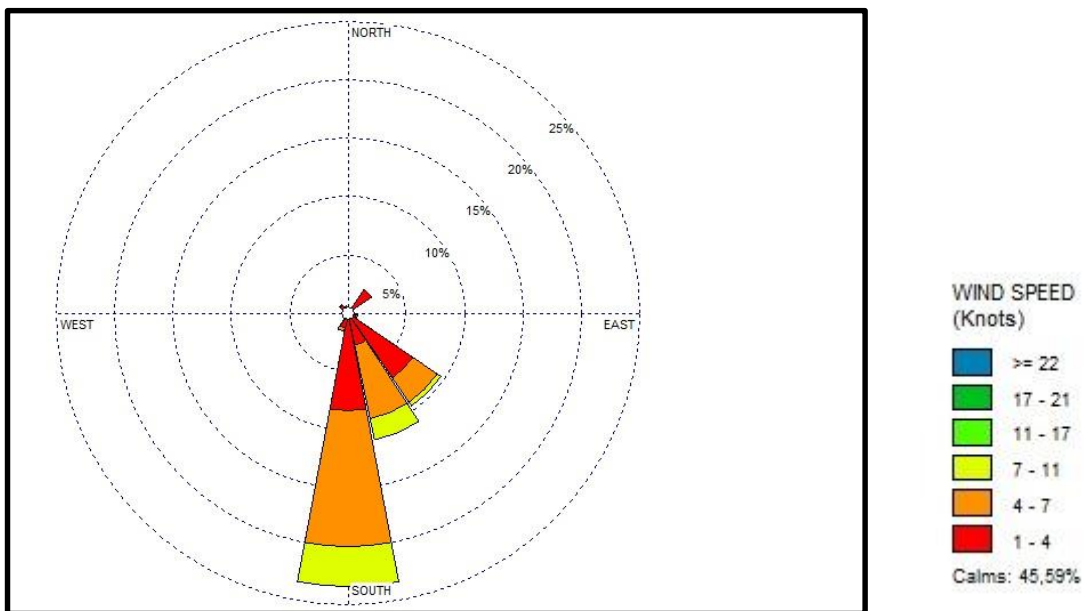
Para la determinación de la concentración de Pm 2.5 a nivel intradomiciliario se hizo un monitoreo diario en 124 viviendas escogidas en dirección radial al punto de muestreo extra-domiciliario, en cada vivienda se realizaron dos días de muestreo para obtener de cada uno una muestra, esto debido a la necesidad de obtener como mínimo un dato de cada vivienda obteniendo de esta manera 267 filtros, de los cuales 17 fueron descartados por presentar deterioro, unos por manipulación a la hora de colocarlos y retirarlos en el portafiltros de las bombas personales Casella TUFF, y otros a la hora del pesaje en el laboratorio Estatal de Higiene de Wisconsin, Estados Unidos.

Figura 8 Área de muestreo barrio San Miguel



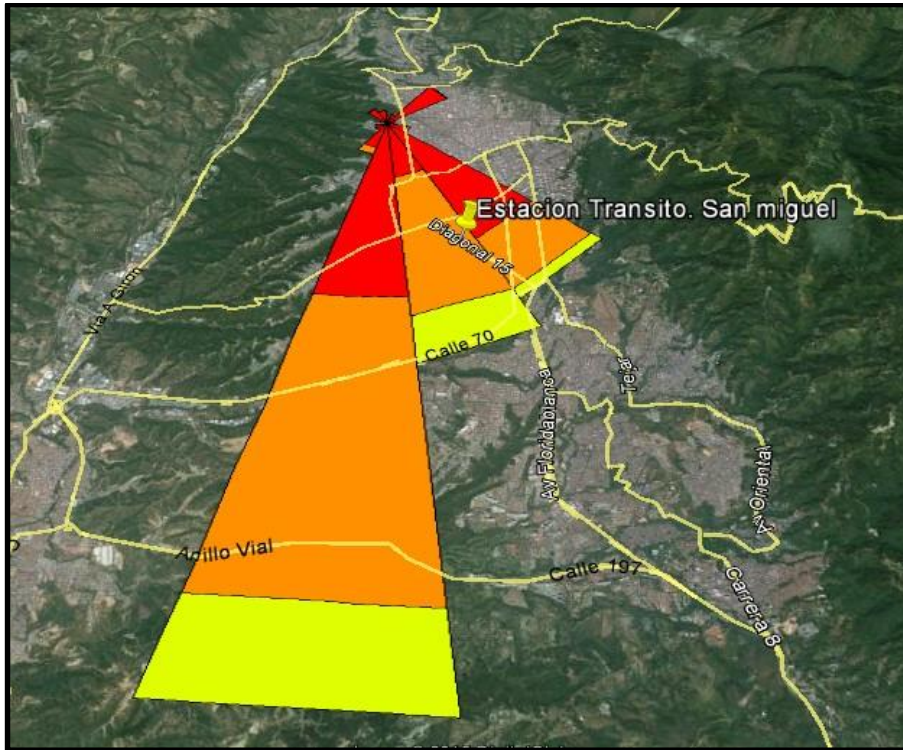
Fuente. Autores

Figura 9 Rosa de los vientos



Fuente. Autores

Figura 10 Fotografía Rosa de los vientos en el área de muestreo



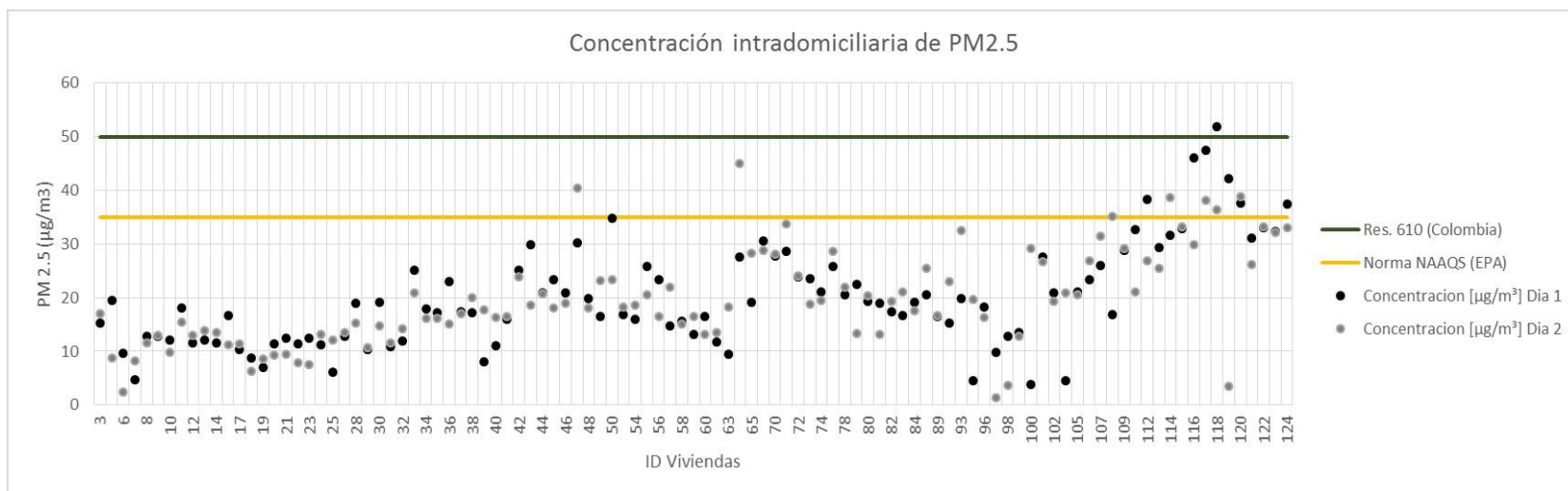
Fuente. Autores

La rosa de los vientos es utilizada para observar la distribución de la dirección del viento y su intensidad, esta herramienta es útil para analizar cómo se ven afectadas las concentraciones de PM_{2.5} con respecto al viento.

En la rosa de los vientos se observa que la dirección del viento que predomina es sur – occidente presentando una velocidad de 4 a 7 m/s en gran parte de la zona y una máxima de 7 a 11 m/s, los vientos son procedentes de la zona centro de la ciudad la cual se caracteriza por ser altamente comercial, la velocidad del viento influye de gran manera en la dispersión del material particulado

Las concentraciones de PM2.5 se determinaron utilizando parámetros importantes como el peso neto, el flujo de la bomba el cual se calibraba todos los días con un calibrador de flujo patrón para dejarlo en 3 L/ min debido a que este caudal es el necesario para que la bomba trabaje 24 horas, también se tuvo en cuenta el tiempo de operación de la bomba y finalizando se hizo un ajuste para condiciones estándar ya que el muestreo se hizo a condiciones locales y la normatividad trabaja con condiciones estándar de temperatura y presión.

Gráfica 1 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5.



Fuente. Autores.

En la gráfica se observa las concentraciones intra-domiciliarias de PM2.5 correspondientes a los dos días de muestreo por cada vivienda identificada con un ID correspondiente al orden en que se efectuó el muestreo, se registraron concentraciones muy similares ya que las actividades realizadas eran semejantes en los dos monitoreos, las viviendas con concentraciones más altas se encuentran ubicadas en el sector en donde de acuerdo a la rosa de los vientos se presentan las velocidades más bajas indicando así una mala dispersión de los contaminantes, además estas viviendas están ubicadas muy cerca de talleres de mecánica de motos y de vías principales donde se da un alto tráfico vehicular, fuente emisora de material particulado,

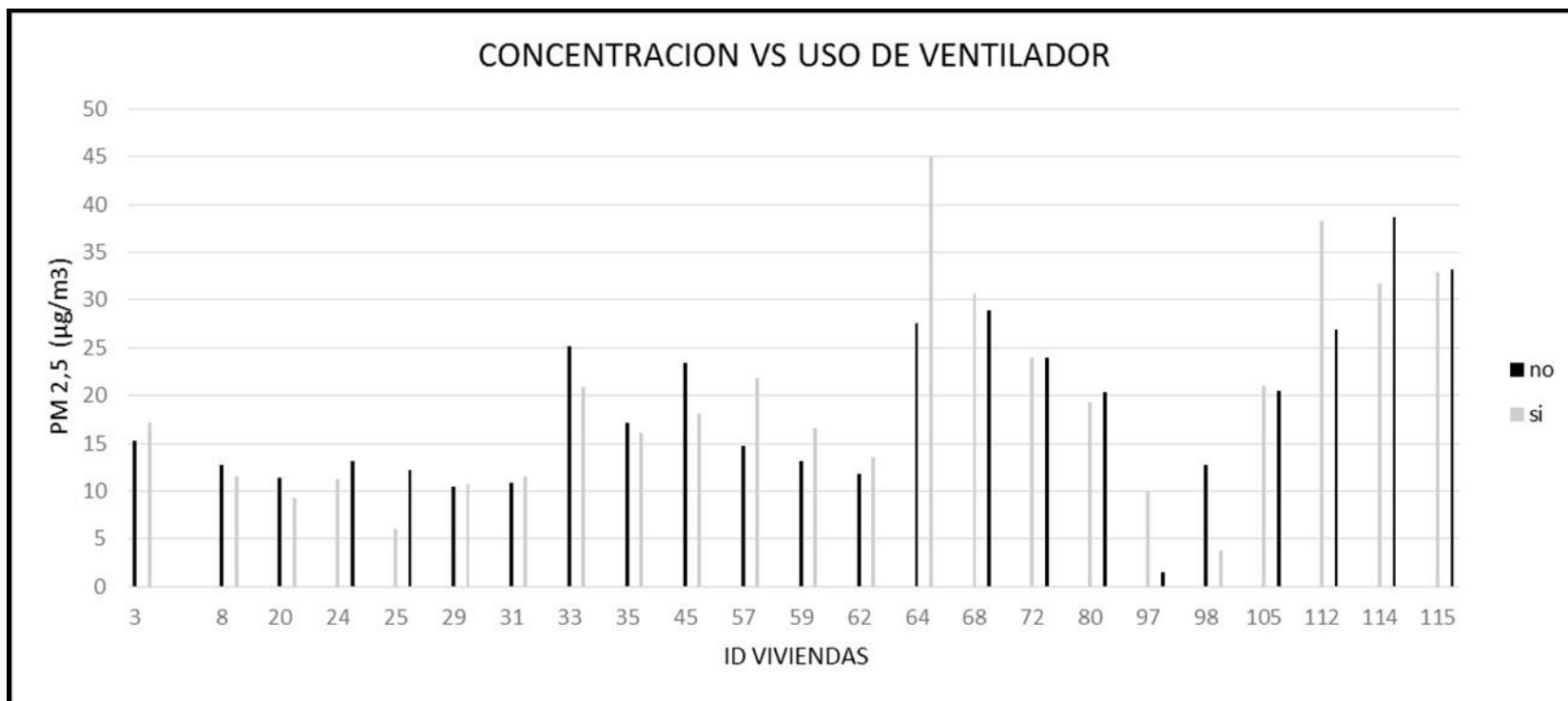
La EPA ha establecido estándares nacionales de calidad de aire ambiental para algunos contaminantes atmosféricos entre ellos el material particulado PM2.5 en donde estipula que para un tiempo de exposición de 24 horas el nivel permisible es de 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual. Según la resolución colombiana 610 del 2010 los niveles máximos permisibles son de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para un tiempo de 24 horas y de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual.

De acuerdo a la norma internacional y a la norma colombiana (Resolución 610) de contaminación atmosférica, las concentraciones determinadas cumplen en su gran mayoría con el nivel de exposición permitido, lo que indica una calidad del aire moderada.

4.2 CORRELACION DE LOS NIVELES DE EXPOSICION INTRADOMICILIARIA A PM 2.5 CON LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS AL INTERIOR DE LAS VIVIENDAS.

Las viviendas escogidas abarcan aproximadamente 35 manzanas en dirección radial al punto de muestreo extra domiciliario, repartidas en el barrio san miguel y la concordia. Se realizaron las inspecciones y cuestionarios evaluando las actividades que se realizaban en el interior de las viviendas. De igual manera se identificaron fuentes externas que pudieran afectar los niveles de exposición de PM2.5 de los habitantes, y se verifico si existían áreas que permitieran la ventilación, como balcones, ventanas o puertas. De las diferentes actividades realizadas en las viviendas, Según la literatura las actividades que influyen en la concentración de PM2.5 al interior de cada vivienda fueron las siguientes.

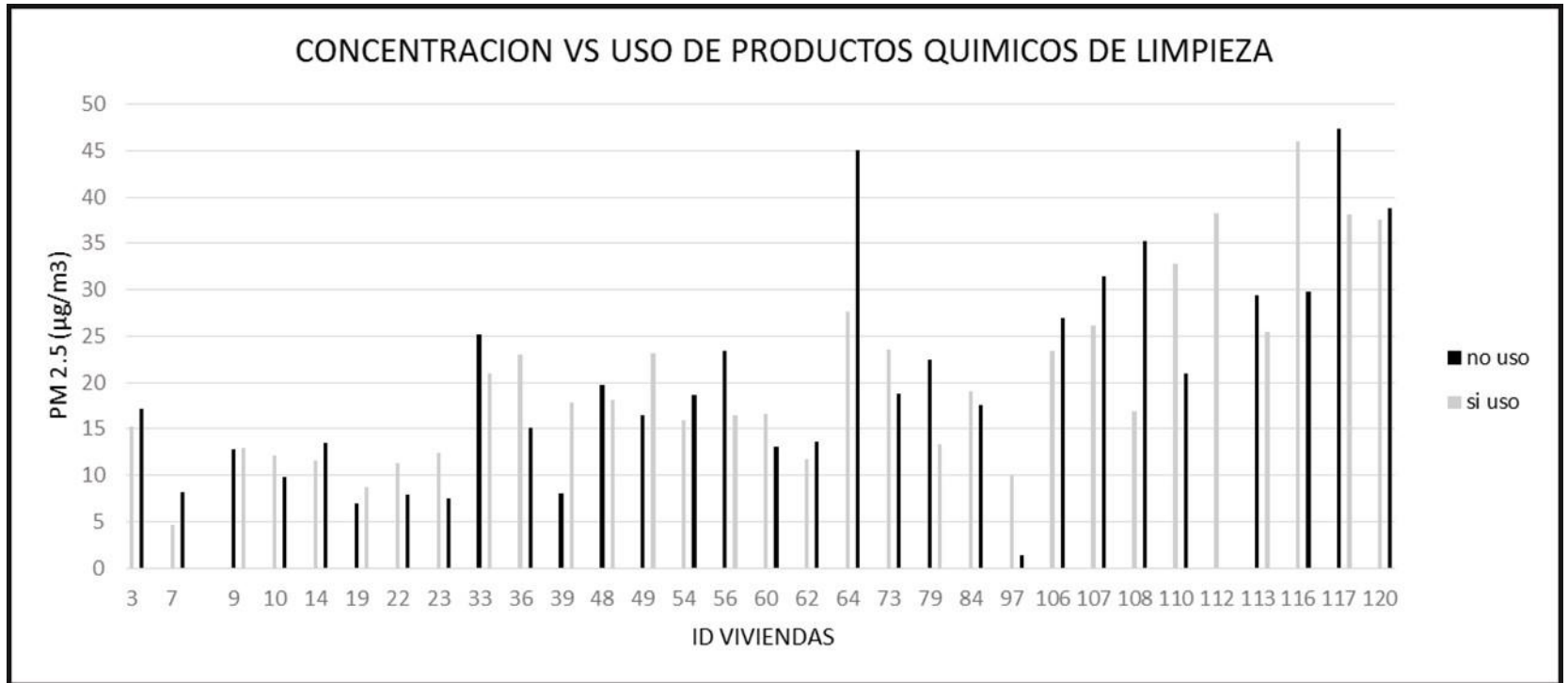
Gráfica 2 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5 y uso de ventilador.



Fuente. Autores

El uso del ventilador contribuye con la dispersión del material particulado lo que favorece la disminución de las concentraciones de PM2.5 en el interior de las viviendas por las corrientes de aire que este provoca, En la gráfica se observan las concentraciones de las viviendas en los dos días de muestreo, cuando se utilizó el ventilador y cuando no, evidenciando que no hay una relación clara de esta actividad con las concentraciones pudiendo ser un motivo de esto el tiempo de uso del ventilador y la ubicación de este respecto a la bomba de muestreo.

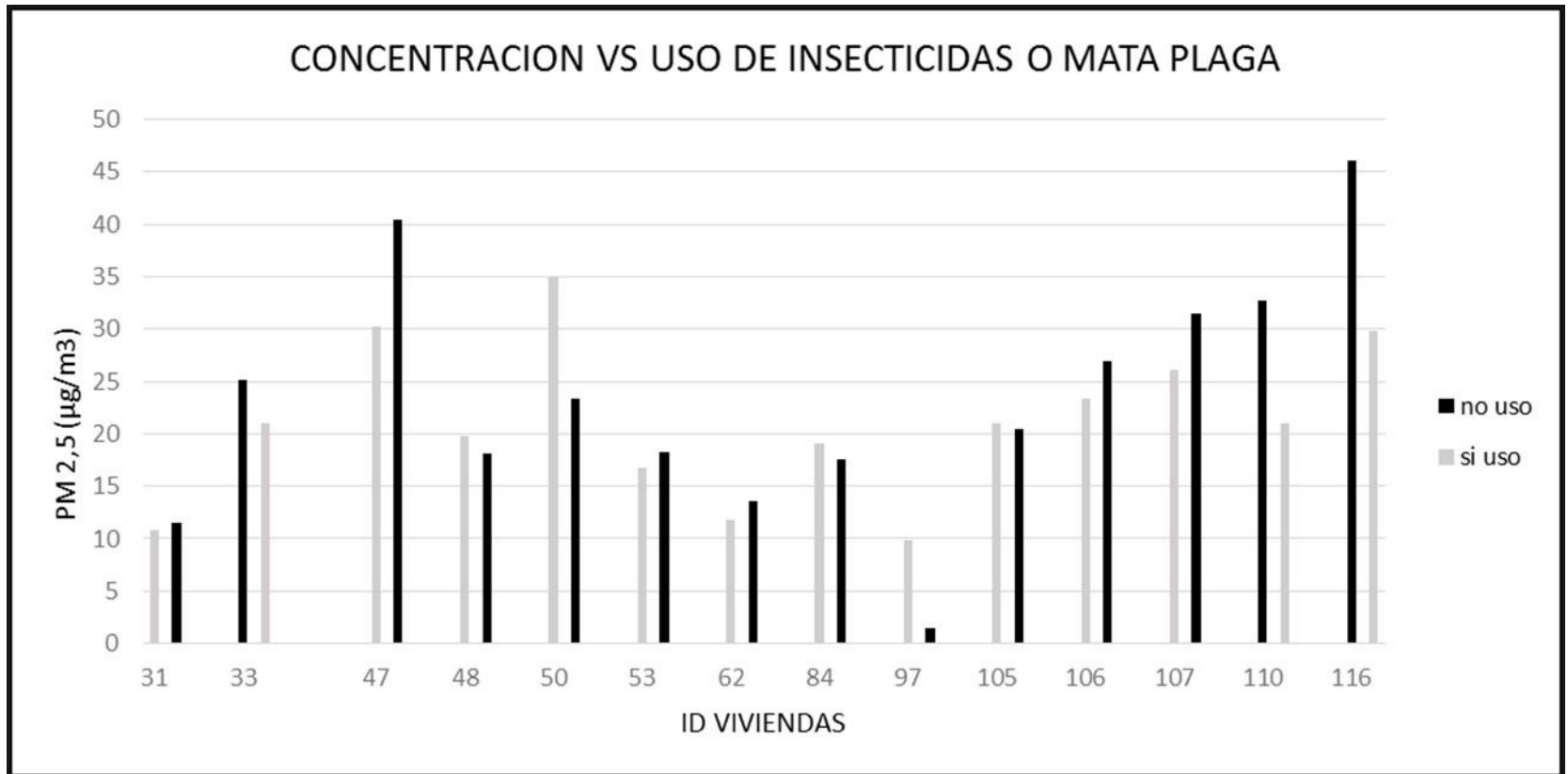
Gráfica 3 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5 y uso de productos de limpieza.



Fuente. Autores

Algunos de los productos para la limpieza contienen elementos químicos (COVs) que en las condiciones adecuadas pueden condensar y depositarse sobre el material particulado son fuente de material particulado (Barraza et al. 2014) por lo que se espera un claro aumento en las concentraciones de PM2.5, lo que no se evidencia en los resultados pues no hay una tendencia de aumento en los días que se usaron dichos productos.

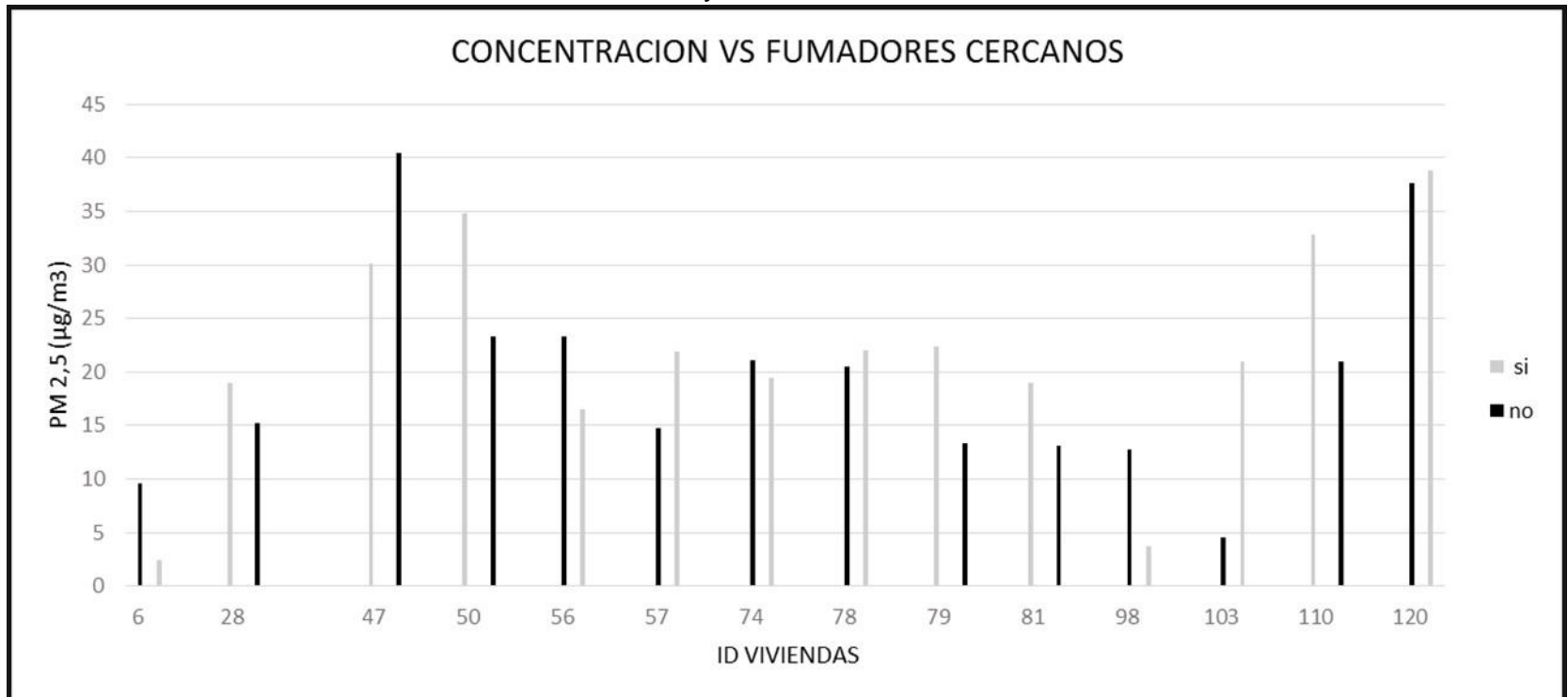
Gráfica 4 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5 y uso de insecticidas y/o mata plagas.



Fuente. Autores

Los insecticidas y pesticidas son contaminantes orgánicos, el tamaño de sus partículas oscila de 0.5 – 10 µm (García alvear 2006) por ende se espera encontrar un aumento en la concentración en los días en que se usaron, dicho aumento no se pudo observar claramente en los resultados obtenidos.

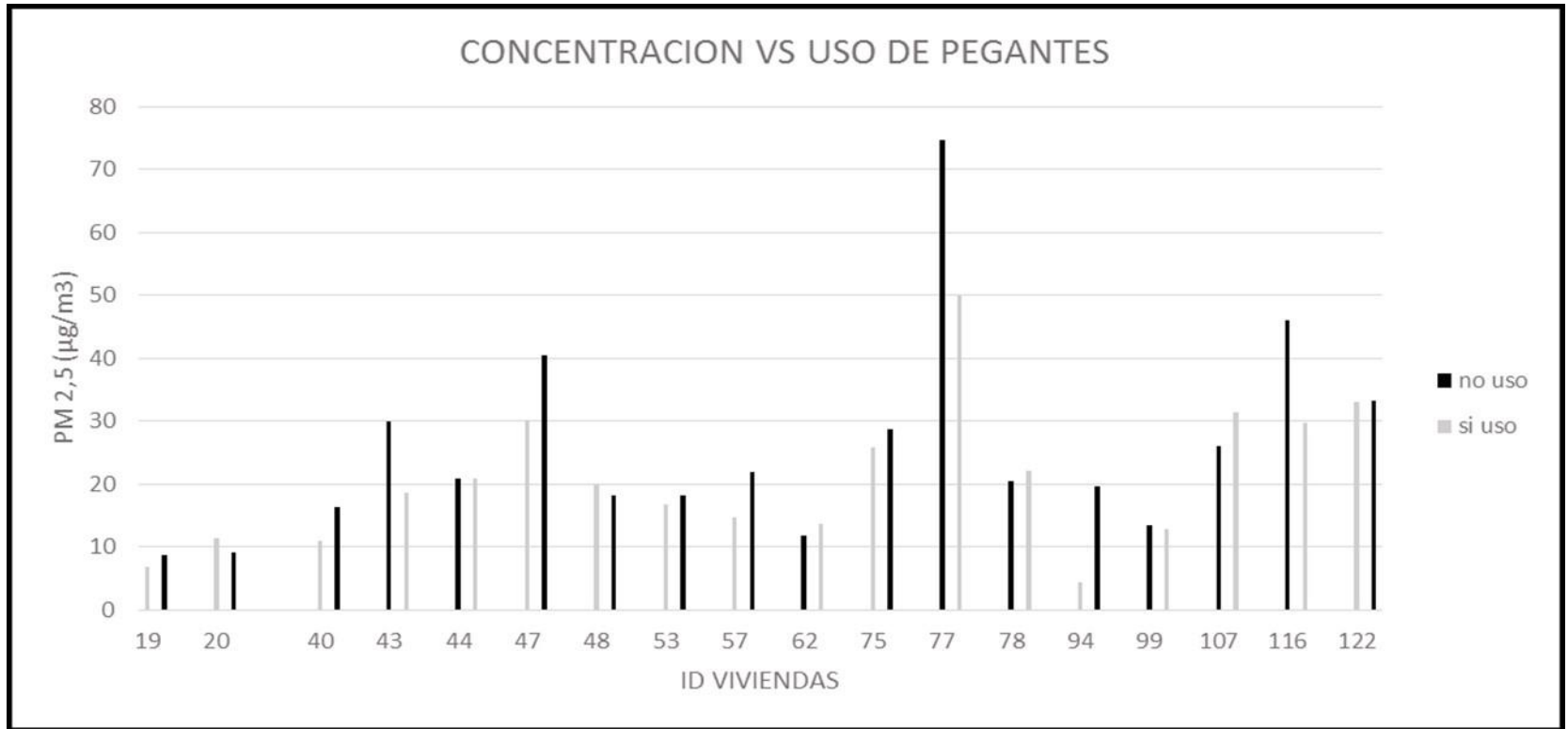
Gráfica 5 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5 y fumadores cercanos.



Fuente. Autores

Las partículas de humo de tabaco tienen un diámetro de 0.01-1µm (García alvear 2006). En lugares donde hay presencia de fumadores la contaminación por PM2.5 es 8 veces mayor que en lugares donde no hay (Nerín et al. 2010), en los resultados no se observa claramente una tendencia de este aumento de concentración en los días donde hubo presencia de fumadores, quizás porque no se fumaba dentro de la vivienda en donde estaba la bomba de muestreo, o la frecuencia con que se fumaba no era la suficiente para incrementar la concentración de PM2.5.

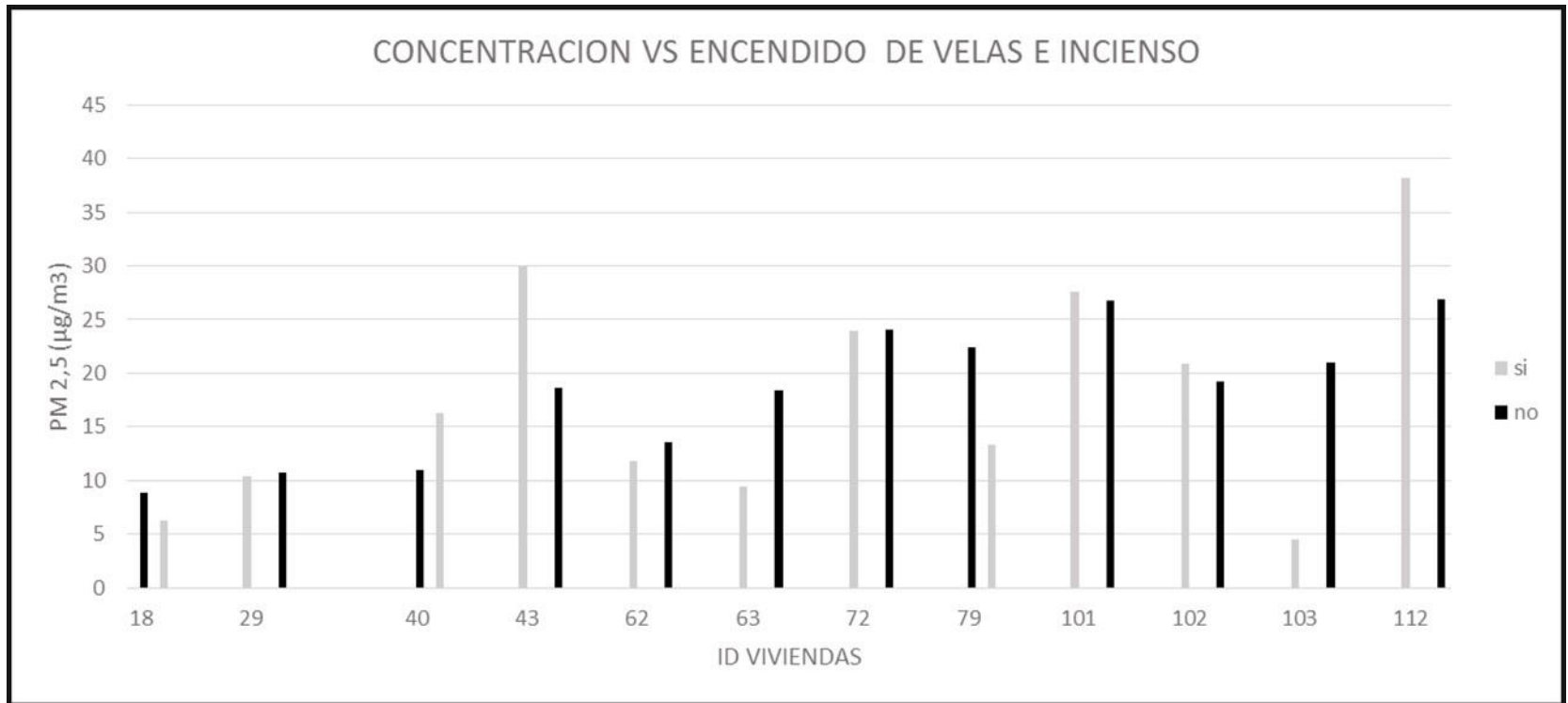
Gráfica 6 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5 y uso de pegantes.



Fuente. Autores

La mayoría de los adhesivos tienen compuestos orgánicos que en el proceso de utilización y de secado se volatilizan (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo España n.d.), es por esto que las concentraciones de PM2.5 tienden a aumentar cuando se utilizan estos pegantes. En la gráfica no se ve una influencia del uso de estos pegantes en las concentraciones.

Gráfica 7 Concentración Intradomiciliaria de PM2.5 y encendido de velas y/o incienso.



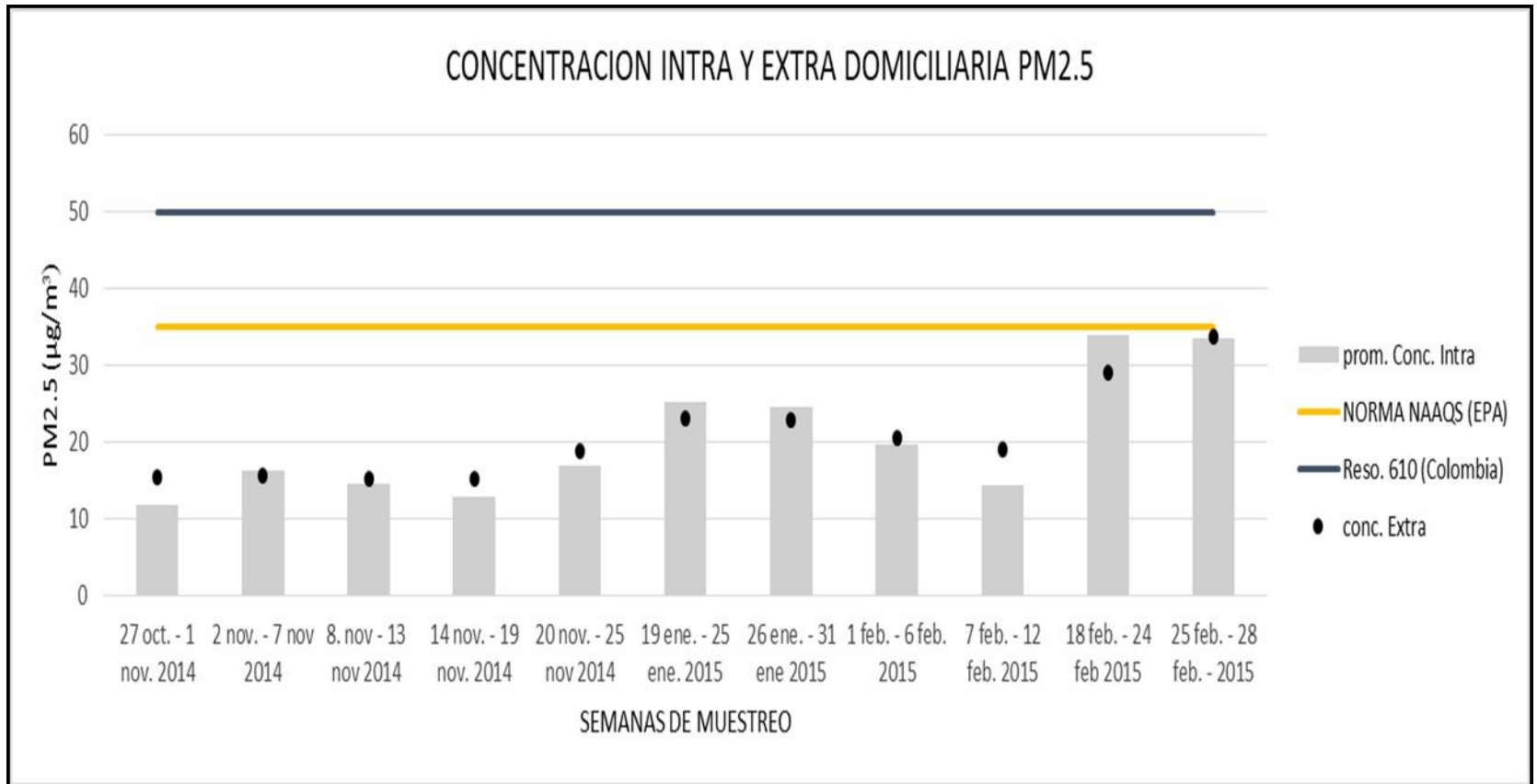
Fuente. Autores

La quema de velas e inciensos está relacionada a procesos de combustión por lo tanto es una fuente generadora de material particulado, claramente no se halla una relación consecuente del aumento de las concentraciones por el encendido de estos elementos, posiblemente a que se quemaron pocas velas e inciensos y la ubicación de estos respecto a la bomba de muestreo.

De acuerdo a los resultados de las gráficas se observa que no hay una influencia directa entre las concentraciones de PM_{2.5} y las actividades realizadas al interior de la casa posiblemente a que se obtuvieron pocas muestras y adicionalmente no se pudo realizar una caracterización del PM, lo que hubiera podido servir como base para identificar las principales fuentes; y por lo tanto los datos no son tan representativos. En Las concentraciones de las viviendas no se presentan diferencias cuando se realizó la actividad y cuando no, por esto no hay una relación clara entre estos parámetros.

No se encontraron fuentes principales de contaminación interior, como utilizar carbón o leña y quema de madera considerados los contaminantes más importantes en espacios interiores (Chen et al. 2006) por lo que posiblemente la contaminación al interior de las viviendas se debe a la infiltración del aire contaminado del exterior principalmente por el tráfico vehículos.

Gráfica 8 Concentración Intra y Extra-domiciliaria de PM2.5.



Fuente. Autores

Debido al clima que se presenta en la ciudad (tropical) la mayoría de las viviendas permanecían con las ventanas y puertas abiertas lo que permitía una buena ventilación, es por esto que se presentó un equilibrio entre los niveles de concentración de PM2.5 intra y extra – domiciliario como se observa en la gráfica 8.

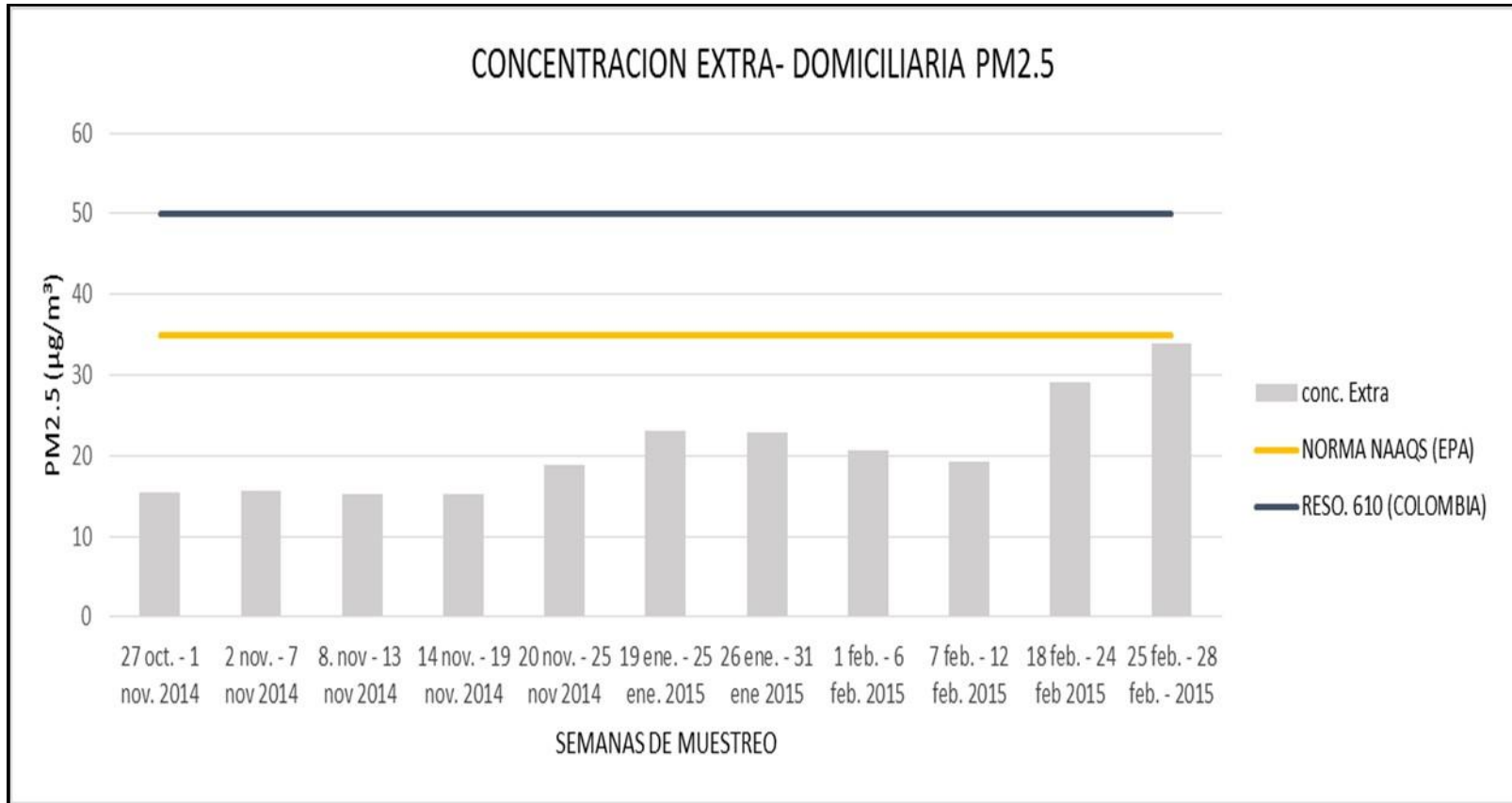
Por otro lado en las viviendas con las concentraciones más altas de PM2.5 son las que colindan con la fábrica de productos alimenticios La Victoria y las que están cerca de dos vías principales con alto tráfico vehicular a comparación del resto de viviendas, teniendo en cuenta que no se presentaron actividades interiores importantes lo que puede sugerir que la contaminación al interior de las viviendas proviene de la contaminación del aire exterior, lo que concuerda con un estudio realizado en escuelas de primaria de Barcelona donde el 53% de la contaminación al interior de la estructura provenía del exterior principalmente del tráfico vehicular (Amato et al. 2014).

Según los promedios semanales de concentración intra-domiciliaria de PM2.5 y las concentraciones extra-domiciliarias halladas semanalmente no sobrepasan los límites máximos permisibles por las normas tomadas como referencia (NAAQS de la EPA y la resolución 610 de Colombia).

4.3 EVALUACION DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LAS CONCENTRACIONES AMBIENTALES DE PM2.5 EN LA ZONA DE MUESTREO.

Las concentraciones extra-domiciliarias de PM2.5 se tomaron con el URG 3000 ABC cada seis días en promedio consecutivamente, se obtuvieron 16 muestras de las cuales en 5 periodos comprendidos entre el 26 de noviembre al 18 de enero y del 13 al 17 de febrero no presentan datos debido a que el equipo medidor presentó inconvenientes a la hora de tomar las muestras.

Gráfica 9 Concentración Extra domiciliaria de PM2.5.

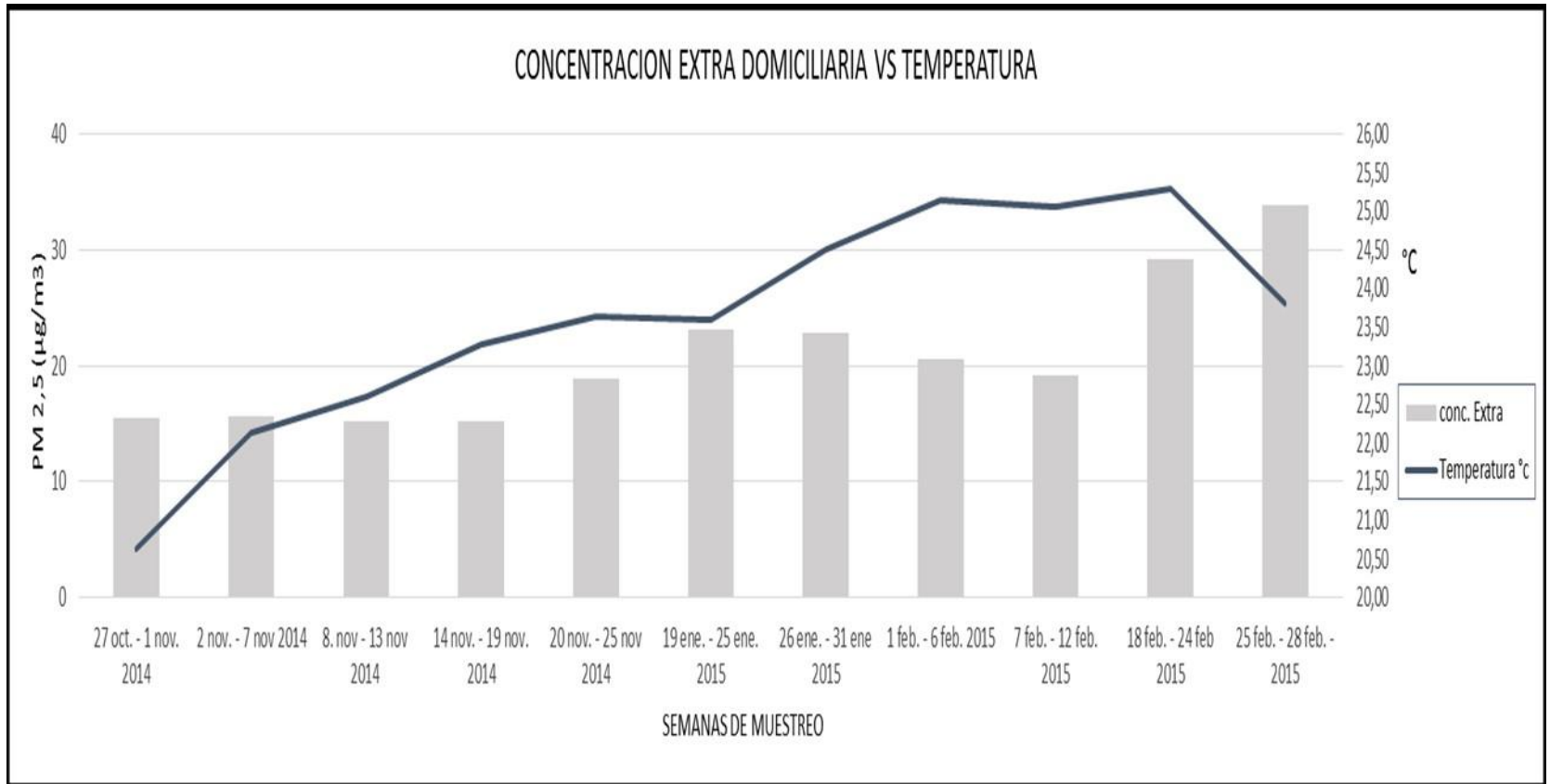


Fuente. Autores

A lo largo de los meses de muestreo se evidenció que la época escolar fue la que predominó, siendo esta el tiempo en donde se realizan las actividades cotidianas de los habitantes, tiempos laborales y comercio habitual. Por otro lado en el mes de diciembre no se recogieron datos debido a daños en el equipo muestreador y al cierre de la estación de Tránsito por vacaciones del personal, impidiendo así el ingreso al punto de muestreo, por esta razón no es posible determinar una relación directa entre las concentraciones y el cambio de actividades que realizan los habitantes ya que diciembre al ser temporada de vacaciones la actividad comercial aumenta y por tanto el tráfico vehicular quien es una de las principales fuentes emisoras de PM2.5.

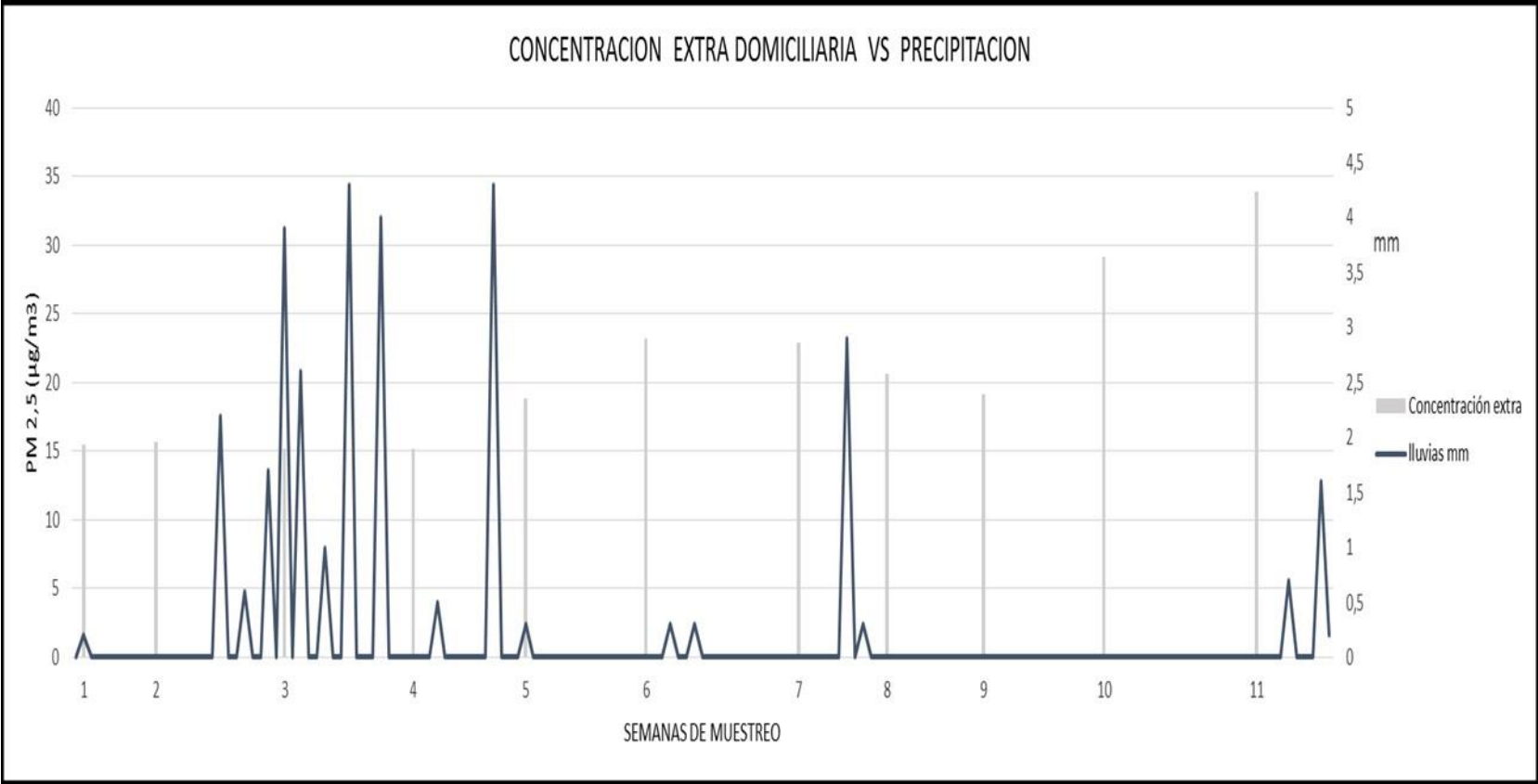
A continuación se muestra la relación que se presenta entre las variables meteorológicas de la zona con la concentración extra domiciliaria de PM2.5.

Gráfica 10 Concentración Extra domiciliaria de PM2.5 y temperatura.



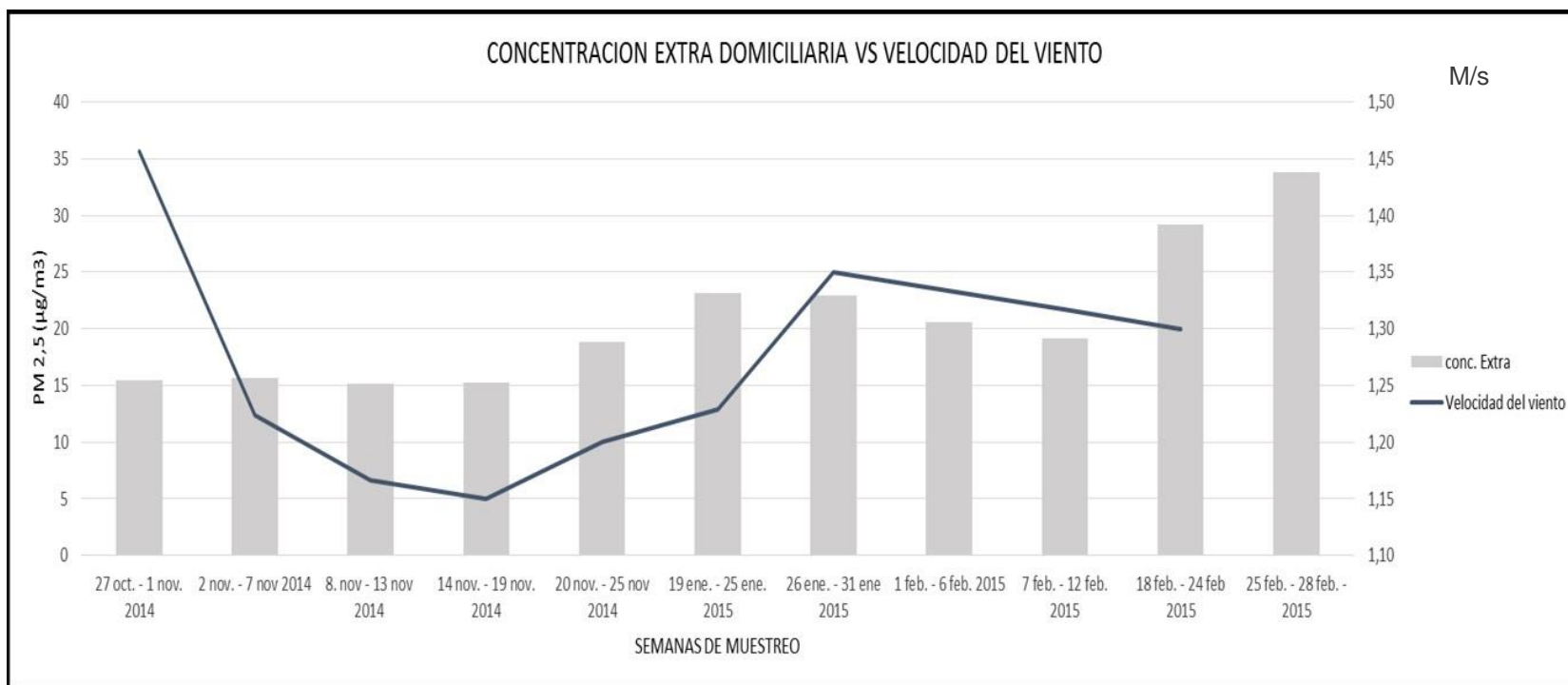
Fuente. Autores

Gráfica 11 Concentración Extra domiciliar de PM2.5 y precipitación.



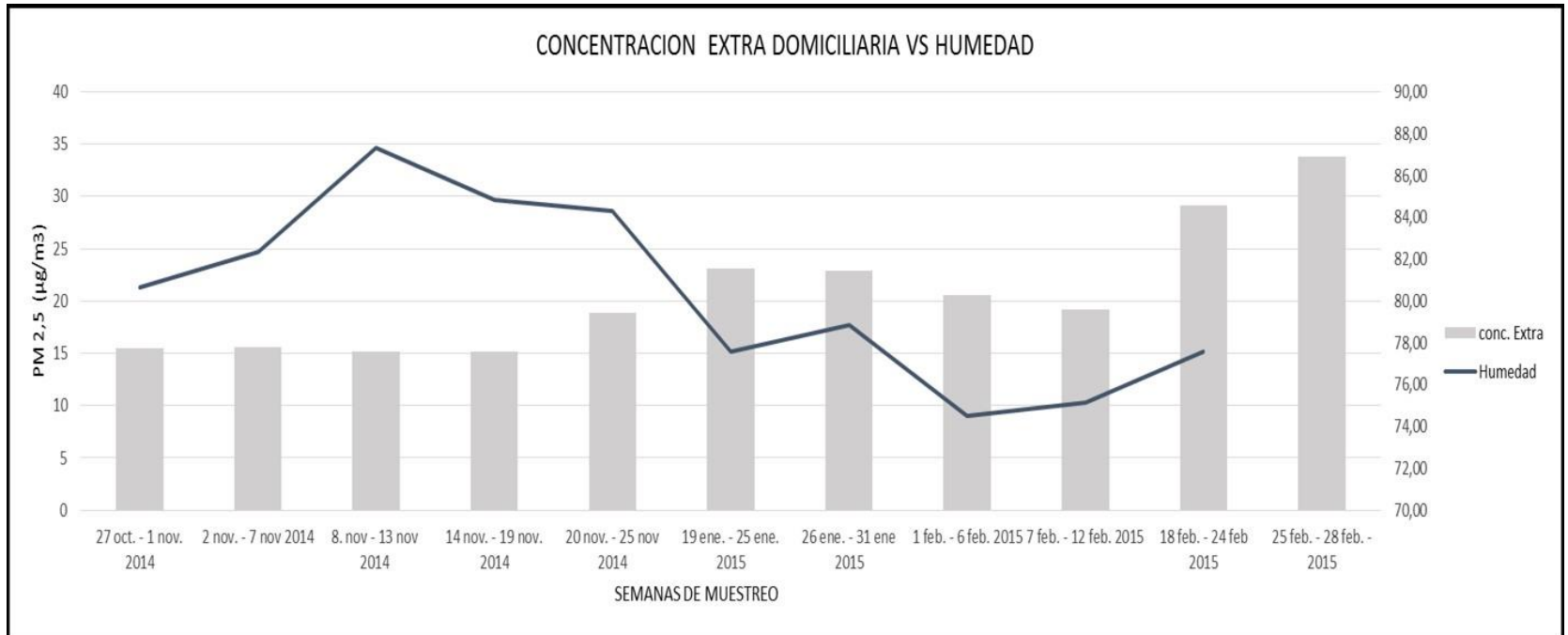
Fuente. Autores

Gráfica 12 Concentración Extra domiciliaria de PM2.5 y velocidad del viento



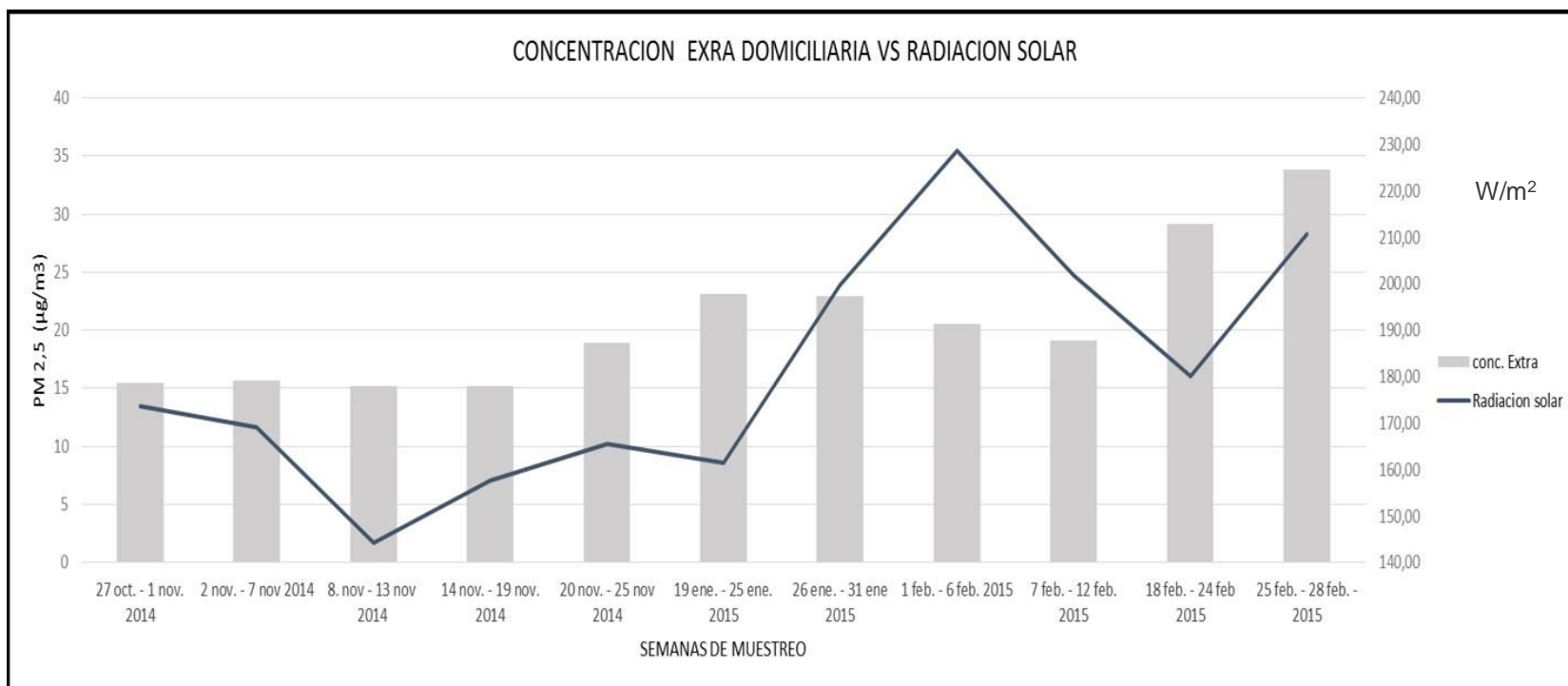
Fuente. Autores

Gráfica 13 Concentración Extra domiciliaria de PM2.5 y humedad.



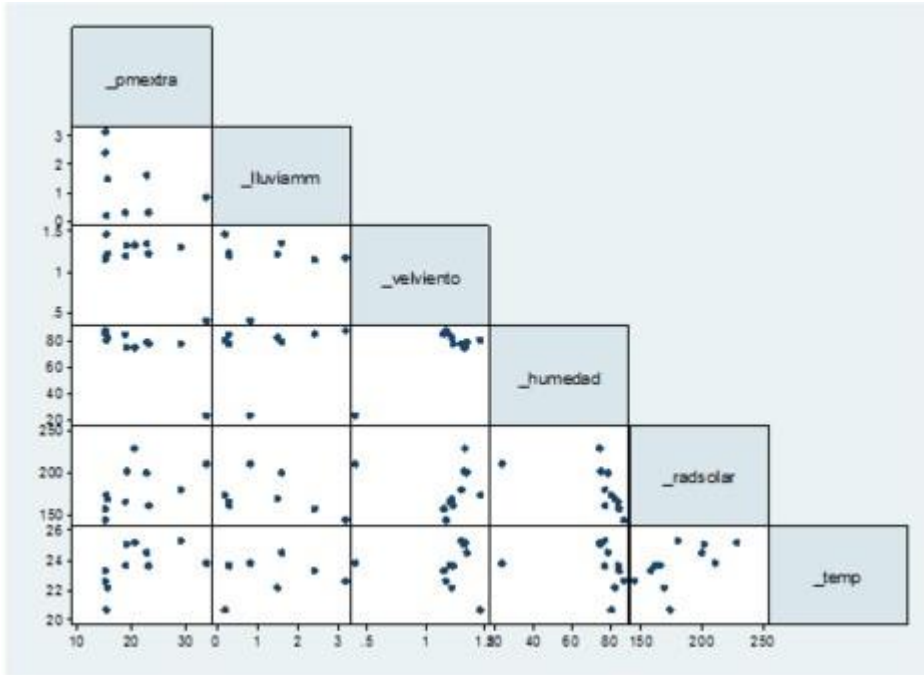
Fuente. Autores.

Gráfica 14 Concentración Extra domiciliaria de PM2.5 y radiación solar.



Fuente. Autores.

Figura 11 Correlación estadística variables meteorológicas y concentración PM2.5



Fuente. Autores.

La Figura 11 muestra gráficamente los análisis de correlación entre las variables meteorológicas y la concentración de PM2.5 a nivel extra-domiciliario, por medio de una simple regresión lineal.

Las únicas correlaciones estadísticas significativas son:

Material particulado Vs. Lluvia (mm) $R^2 = -0,62$ ($p < 0.05$)

Material particulado Vs humedad $R^2 = -0,79$ ($p < 0.05$)

Los resultados estadísticos muestran una correlación negativa fuerte (-0.62, -0.79 para lluvia y humedad respectivamente) es decir una relación inversa entre las variables y la concentración con un intervalo de confianza en la prueba estadística del 95%. A medida que aumenta la lluvia y la humedad, disminuye la concentración de material particulado por procesos de lavado del contaminante en la atmósfera lo

cual coincide con Chan “La lluvia es el mejor camino para remover los contaminantes del aire” (Chan & Yao 2007) y al aumentar la humedad disminuye la resuspension de partículas a la atmosfera por tanto se tiene un comportamiento logico en la conducta del PM2.5 con estas dos variables metereológicas.

La velocidad del viento no presentó una relación significativa en el modelo estadístico con la concentración, a pesar de que se esperaba que al aumentar la velocidad del viento la concentración disminuiría pues se presenta mayor dispersión del contaminante lo que según Song Yu (Song et al. 2006) afirma ,” una velocidad del viento alta, es causa dominante de la reducción de los niveles de contaminación”.

De la misma manera, la temperatura y la radiación solar no indican una relación clara con las concentraciones de PM2.5 de acuerdo al índice de correlación, teóricamente se espera que la temperatura influya de manera directa con la concentración ya que promueve la resuspensión de partículas, Según un análisis de datos de PM2.5 hecho en la ciudad de México afirma que hay una relación directa entre la temperatura y las concentraciones de PM 2.5 (Cruz et al. 2001). Por otro lado la radiación solar tiene una relación directa con el material particulado por reacciones fotoquímicas que se dan entre este y los rayos solares.

5 CONCLUSIONES

El nivel de PM_{2.5} intra domiciliarios durante 24 horas a los que están expuestos los habitantes de las viviendas muestreadas, en promedio es de 20,34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual cumple con el nivel máximo permisible que rige la norma colombiana de calidad de aire (Resolución 610 de 2010).

En la zona de estudio no se encontró una relación entre la contaminación por PM_{2.5} y las actividades al interior de la vivienda; como fumadores, labores de confección, uso de pegantes etc, las cuales se consideran importantes fuentes emisoras de material particulado, el hecho de que se hayan hecho solo dos muestreos por vivienda influye en que los datos no son suficientes para hallar una clara correlación entre estas actividades y las concentraciones. Además de la falta de caracterización fisicoquímica del PM interior; sin embargo, al caracterizar el PM exterior se puede lograr un mejor entendimiento de que podría ocurrir a nivel interior.

Las concentraciones internas y externas son similares con un valor de 20,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, debido a la buena ventilación se sugiere un equilibrio tanto en el ambiente interno como en el externo lo que se traduce en que la contaminación interior era provocada principalmente por la infiltración del aire contaminado exterior a causa del tráfico vehicular e industrias cercanas.

La contaminación por PM_{2.5} es afectada por variables meteorológicas como la precipitación y la humedad con una correlación inversa de -0,72 y -0,79 respectivamente se encontró que al aumentar estas variables disminuye la concentración del contaminante por procesos de lavado y resuspensión.

Las variables meteorológicas como la temperatura, la velocidad del viento y la radiación solar no tuvieron una influencia en la concentración ya que su índice de correlación no fue significativo por lo tanto no se notaron los cambios en las concentraciones. Sin embargo en los resultados obtenidos en la rosa de los vientos se observa una relación entre las velocidades del viento y las concentraciones, pues

en la zona donde se presentaron bajas velocidades se registraron los valores mas altos de concentracion de PM2.5.

6 RECOMENDACIONES

Incrementar el número de muestras realizando mediciones cada hora Para hallar resultados más precisos sobre las variables meteorológicas y su influencia sobre las concentraciones de PM2.5 tal vez es recomendable, pero poco factible por temas presupuestales.

Se recomienda realizar un estudio más detallado de las actividades que se hacen a nivel intra domiciliario, seleccionando en la zona las viviendas donde se realicen estas actividades y otras donde no lo hagan teniendo en cuenta la ventilación habitual, también es necesario realizar más muestreos durante un periodo de tiempo más prolongado para obtener muestras representativas y poder hallar si hay o no una influencia de estas actividades con la contaminación por PM2.5 y caracterizar el PM2.5 recolectado a nivel interior.

Para disminuir la alta densidad del tráfico vehicular conocida como la principal fuente de PM2.5, se recomienda el uso de transporte público o bicicleta como medio de movilización.

7 ANEXOS

Anexo 1 Registro de inspección en físico

REGISTRO DE INSPECCIÓN FÍSICA DE LA VIVIENDA									
Código casa	Barrio:		Número Residencia		Municipio de Sancti Spiritus				
Fecha visita (dd/mm/aaaa)	Hora:		AM PM		Inspector:				
1. Tipo vivienda	2. No. de pisos vivienda		4. Hay garaje adjunto a vivienda?		Sí No				
<input type="checkbox"/> Casa unifamiliar <input type="checkbox"/> Casa multifamiliar <input type="checkbox"/> Casa inquilinato <input type="checkbox"/> Edificio < 5 pisos <input type="checkbox"/> Edificio > 5 pisos <input type="checkbox"/> Otro:	<input type="checkbox"/> 3. Piso en el cual se encuentra la vivienda		<input type="checkbox"/> 5. La puerta de entrada de la vivienda está directamente conectada al garaje?		Sí No				
6. Cuántos cuartos hay en cada piso de esta unidad de vivienda (casa o apartamento)? Nota: No cuenta baños, porches, balcones o halls.					Piso 1: Piso 2: Piso 3: Total:				
7. En cuál piso los residentes de esta vivienda pasan la mayoría de su tiempo despiertos?					Piso 1: Piso 2: Piso 3:				
Material predominante:									
8. Paredes			9. Pisos			10. Techo			
<input type="checkbox"/> Ladrillo <input type="checkbox"/> Bahareque <input type="checkbox"/> Madera <input type="checkbox"/> Otro:			<input type="checkbox"/> Baldosa o tabletas <input type="checkbox"/> Cemento <input type="checkbox"/> Tierra <input type="checkbox"/> Otro:			<input type="checkbox"/> Teja o cielo raso <input type="checkbox"/> Cafa <input type="checkbox"/> Zinc <input type="checkbox"/> Planche			
11. Tipo estufa			12. Tipo Horno			13. Número Mascotas dentro de la vivienda			
<input type="checkbox"/> Gas propano <input type="checkbox"/> Gas natural <input type="checkbox"/> Leña/carbón			<input type="checkbox"/> Gas propano <input type="checkbox"/> Eléctrico <input type="checkbox"/> Mecánicas <input type="checkbox"/> No hay			<input type="checkbox"/> Perro <input type="checkbox"/> Gato <input type="checkbox"/> Aves <input type="checkbox"/> Otro: Peces			
Características del espacio de monitoreo dentro de la vivienda									
14. Lugar:		15. Volumen (m ³)		16. % Humedad en superficies:		17. Limpieza: Buena Regular Mala			
<input type="checkbox"/> Sala <input type="checkbox"/> Comedor <input type="checkbox"/> Sala/Comedor <input type="checkbox"/> Otro: <input type="checkbox"/> Terraza		<input type="checkbox"/> Ancho <input type="checkbox"/> Largo <input type="checkbox"/> Alto		<input type="checkbox"/> 18. No. ventanas:		<input type="checkbox"/> m x <input type="checkbox"/> m Total: m ² % abierto: 100			
		20. Fuentes adicionales de PM (especificar)		19. Medidas: m x m Total: m ² % abierto: 100 internas / externas					

Anexo 2 Tabla de muestreo Intradomiciliario

MUESTREO INTRA - DOMICILIARIO				
Dirección	No. Casa	Fecha	No. Filtro	Concentración de PM2.5 (µg/m3)
CRA 17 # 50 - 32 2 PISO apto 02	3	29/10/2014	8	15,304
		30/10/2014	13	17,108
CLL 50 # 16-43	5	31/10/2014	18	19,442
		01/11/2014	21	8,731
CII 50a # 16-68	6	31/10/2014	19	9,586
		01/11/2014	25	2,405
CLL 50 # 16-47	7	31/10/2014	20	4,671
		01/11/2014	22	8,219
cII 50 # 16-75	8	03/11/2014	27	12,73
		04/11/2014	31	11,498
CLL 49 # 16-04	9	03/11/2014	28	12,78
		04/11/2014	33	12,967
CLL 49 # 16-36 301	10	03/11/2014	29	12,133
		04/11/2014	32	9,83
CII 50A # 16-84	11	03/11/2014	30	18,028
		04/11/2014	34	15,413
CII 50A # 16-62	12	05/11/2014	35	11,62
		06/11/2014	38	13,05120087
CrA 16 # 50A-37	13	05/11/2014	36	12,02091068
		06/11/2014	39	13,81986168
CLL 49 # 16-36 apto 101	14	05/11/2014	37	11,63574144
		06/11/2014	40	13,49734531
CII 51 # 16-65	15	07/11/2014	41	16,74296322
		08/11/2014	44	11,19722332
CLL 51 # 16-172 PISO 1	17	10/11/2014	46	10,37895186
		11/11/2014	49	11,39677482
CLL 51 # 16-110 2 PISO	18	10/11/2014	47	8,800399195
		11/11/2014	50	6,236211112
CLL 51 # 16-88	19	10/11/2014	48	6,951690851
		11/11/2014	51	8,675995476

CLL 51 # 16-130 Apto 201	20	12/11/2014	52	11,41879515
		13/11/2014	56	9,225189571
CLL 51 # 16-10 PISO 1 y 2	21	12/11/2014	53	12,48012424
		13/11/2014	58	9,381265497
Cra 16 # 51-29	22	12/11/2014	54	11,34259556
		13/11/2014	57	7,963109214
CII 51a # 16- 133 3 piso	23	12/11/2014	55	12,37669329
		13/11/2014	59	7,446409549
CII 51a # 16-19	24	14/11/2014	60	11,25133797
		15/11/2014	63	13,10250209
CII 51A # 16-27	25	15/11/2014	61	6,078028088
		16/11/2014	64	12,15033453
CII 51A #16-160	27	17/11/2014	67	12,86598429
		18/11/2014	69	13,44263775
CII 51A # 16-109	28	17/11/2014	68	19,014348
		18/11/2014	70	15,22794086
CII 51A # 16-56	29	19/11/2014	71	10,42963762
		20/11/2014	75	10,7600132
CII 51A # 16-137	30	19/11/2014	72	19,17467909
		20/11/2014	76	14,82036053
Cr 16 # 51-13 apto 202	31	19/11/2014	73	10,79724317
		20/11/2014	77	11,49716522
CII 52 # 16-20	32	19/11/2014	74	11,90423221
		20/11/2014	78	14,22222939
CII 52 # 16-18 2 piso	33	21/11/2014	79	25,1971893
		22/11/2014	82	20,94371068
CII 53 # 16-43 apto 301	34	21/11/2014	80	17,96318244
		22/11/2014	81	16,07255036
CII 52 # 16-100	35	24/11/2014	83	17,1782124
		25/11/2014	86	16,08586306
CII 53 # 16-45	36	24/11/2014	84	23,06646942
		25/11/2014	87	15,18500025
Cra 17a # 52-60	37	24/11/2014	85	17,32566549
		25/11/2014	88	16,94930625
CII 52 # 16-101	38	25/11/2014	89	17,29477114
		26/11/2014	92	20,05725004
CII 51 # 16-145	39	26/11/2014	90	8,025113313
		27/11/2014	95	17,82280684
CII 52 # 16-06	40	26/11/2014	91	11,0191581
		27/11/2014	97	16,25834229
CII 52 # 17-28	41	26/11/2014	93	16,05909332
		27/11/2014	96	16,57481979

CLL 50#15-72	42	26/11/2014	94	25,09911983
		27/11/2014	98	23,8649449
Cra 17a # 52-52	43	01/12/2014	99	29,92721115
		02/12/2014	103	18,58062208
CII 52# 17-38	44	01/12/2014	100	20,91138332
		02/12/2014	104	20,78624568
CII 52 17C-06 Piso 3	45	01/12/2014	101	23,42475147
		02/12/2014	105	18,11656027
Cra 17b # 50-20	46	01/12/2014	102	20,86866955
		02/12/2014	106	18,92287427
Cra 17b # 50-46	47	03/12/2014	107	30,17497385
		04/12/2014	111	40,49840595
Cra 17 # 52-06 piso 2	48	03/12/2014	108	19,77831382
		04/12/2014	112	18,17648036
CRA 18#48-66 casa 4	49	03/12/2014	109	16,53230484
		04/12/2014	113	23,21418011
Cra 17 # 47-117/ 46A-39	50	03/12/2014	110	34,86116185
		04/12/2014	114	23,29857614
CRA 18 # 48-30	53	08/12/2014	119	16,77045591
		09/12/2014	123	18,21550342
CRA 18 # 50-52	54	08/12/2014	120	15,98877463
		09/12/2014	126	18,66246143
CRA 18 # 50-60	55	08/12/2014	121	25,83589632
		09/12/2014	124	20,63432299
CRA 18#48-52	56	10/12/2014	122	23,37131149
		11/12/2014	128	16,54221059
CRA 18 # 48-66 casa 2 piso 2	57	10/12/2014	125	14,71067768
		11/12/2014	130	21,87440654
CLL 51 # 17B-15/ 17B-17	58	10/12/2014	127	15,62188229
		11/12/2014	131	15,02391653
Cra 18 # 48-66 casa 8	59	11/12/2014	129	13,10706263
		12/12/2014	132	16,54574803
CRA 18 # 51-151	60	15/12/2014	133	16,57727439
		16/12/2014	137	13,13351903
CLL 51 # 18-35	62	15/12/2014	135	11,74454885
		16/12/2014	139	13,60087172
Cra 20 # 50-66	63	15/12/2014	136	9,433262204
		16/12/2014	140	18,35368868
Cra 19#48-46	64	17/12/2014	141	27,62559382
		18/12/2014	145	44,98447763

CII 51#18-45	65	17/12/2014	142	19,18578624
		18/12/2014	146	28,37164915
CII 50 # 17b-44	68	19/12/2014	149	30,63825591
		20/12/2014	153	28,87169816
Cra 18 # 48-65 casa 6 piso 1	70	19/12/2014	151	27,82195624
		20/12/2014	155	28,15734534
Cra 18#48-65 casa 1	71	19/12/2014	152	28,72711082
		20/12/2014	156	33,83568196
CII 50 #18-47 1 piso	72	19/01/2015	157	23,96187482
		20/01/2015	160	24,01273558
CII 48 # 18-11 Apto 301	73	19/01/2015	158	23,60602935
		20/01/2015	161	18,79522281
CII 48 # 18-13	74	19/01/2015	159	21,14283072
		20/01/2015	162	19,44248652
Cra 21 # 52-26 Piso 2	75	22/01/2015	163	25,85064673
		23/01/2015	167	28,68275556
Cra 18 # 46-225	78	21/01/2015	166	20,48678873
		22/01/2015	170	22,02791093
CLL 51A # 18-73	79	23/01/2015	171	22,4007753
		24/01/2015	174	13,3588802
CII 51#18-17 101	80	23/01/2015	172	19,2645838
		24/01/2015	175	20,41685608
CII 52#20-29	81	23/01/2015	173	18,96977457
		24/01/2015	176	13,14510418
Cra 21A # 51A-24 Pisos 1y 2	82	26/01/2015	177	17,35252002
		27/01/2015	181	19,36811105
CII 51a#21-30	83	26/01/2015	179	16,76785123
		27/01/2015	182	21,05338639
CII 52#21-33	84	26/01/2015	180	19,13460898
		27/01/2015	183	17,50988996
CII 51#21-50	86	30/01/2015	185	20,59484441
		31/01/2015	188	25,47956843
CII 51#21-39	89	02/02/2015	191	16,53503882
		03/02/2015	195	16,72720083
Cra 20#50-29	92	04/02/2015	198	15,3142167
		05/02/2015	202	23,09170509
Cra 21#50-34	93	04/02/2015	199	19,8319279
		05/02/2015	203	32,46857449
CII 50a#21-27	94	04/02/2015	200	4,491769413
		05/02/2015	204	19,66450025
CII 48#20-30	96	09/02/2015	210	18,23063861
		10/02/2015	215	16,36005689
CLL 48 # 20-38 1 PISO	97	09/02/2015	211	9,896195372
		10/02/2015	216	1,436569774

CII 49#20-21 apto 302	98	09/02/2015	212	12,7876985
		10/02/2015	217	3,718581655
Cra 20 # 48-39 Apto 201	99	09/02/2015	213	13,5138397
		10/02/2015	214	12,83553197
CII 48 # 19-25	100	11/02/2015	218	3,908420152
		12/02/2015	222	29,2325598
CII 48#21-48	101	11/02/2015	219	27,55371501
		12/02/2015	223	26,73896086
Cra 21 # 48-21 Apto 501	102	11/02/2015	220	20,90253778
		12/02/2015	224	19,24335731
Cra 22 #48-42	103	11/02/2015	221	4,503245827
		12/02/2015	225	20,97753021
CII 50a#21-20	105	13/02/2015	227	21,06848162
		14/02/2015	229	20,47561331
Cra 22 # 47-28	106	16/02/2015	230	23,40393025
		17/02/2015	234	26,91176077
CII 48 # 21-57	107	16/02/2015	231	26,08763776
		17/02/2015	235	31,41426799
Cra 21 # 47-42	108	16/02/2015	232	16,90380546
		17/02/2015	236	35,20835709
CII 48 # 21-31 Apto 302	109	16/02/2015	233	28,75869161
		17/02/2015	237	29,23130973
Cra 21 # 47-34 piso 1	110	18/02/2015	238	32,76760545
		19/02/2015	242	21,02359287
CII 47 # 21-44	112	18/02/2015	241	38,25361503
		19/02/2015	245	26,91320735
CII 48 # 21-31 Apto 402	113	18/02/2015	239	29,36007282
		19/02/2015	243	25,52550102
Cra 22 # 46B-12 piso 1 y 2	114	20/02/2015	250	31,6707669
		21/02/2015	246	38,61113711
CII 46 # 21-02/Cra 21 # 46-01/46-03	115	20/02/2015	247	32,92072296
		21/02/2015	248	33,15032257
CII 45 # 19-64 Apto 201	116	23/02/2015	249	46,00945358
		24/02/2015	255	29,81553258
CII 45 # 19-32 Apto 201	117	23/02/2015	251	47,41157625
		24/02/2015	254	38,14516869
CII 45#19-12 3 piso	118	23/02/2015	252	51,91085302
		24/02/2015	257	36,32771173
CII 45 # 19-84 Piso 1	119	23/02/2015	253	42,27965415
		24/02/2015	256	3,458419762

CII 45 # 19-32 Apto 202	120	25/02/2015	258	37,6003514
		26/02/2015	262	38,79675802
CII 46#19-13	121	25/02/2015	259	31,02943201
		26/02/2015	265	26,19992127
CII 46 # 19-02	122	25/02/2015	260	32,96554389
		26/02/2015	263	33,24776961
CII 46#19-58	123	25/02/2015	261	32,3900857
		26/02/2015	264	32,1774158
CII 46 # 18-19	124	27/02/2015	266	37,45662333
		28/02/2015	267	33,05886709

Anexo 3 Tabla de concentraciones Extra - domiciliarias

fecha	Conc. Extradomiciliaria [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
27 oct. - 1 nov. 2014	15,4389965
2 nov. - 7 nov 2014	15,6353
8. nov - 13 nov 2014	15,17433432
14 nov. - 19 nov. 2014	15,20160745
20 nov. - 25 nov 2014	18,86994846
19 ene. - 25 ene. 2015	23,14504298
26 ene. - 31 ene 2015	22,89126497
1 feb. - 6 feb. 2015	20,57716249
7 feb. - 12 feb. 2015	19,14343391
18 feb. - 24 feb 2015	29,16364176
25 feb. - 28 feb. - 2015	33,84176356

Anexo 4 Tabla de concentración Intra -domiciliaria y uso de químicos

concentracion Vs Uso de quimicos		
casas	si uso	no uso
3	15,304	
		17,108
9		12,78
	12,967	
10	12,133	
		9,83
14	11,6357414	
		13,4973453
19		6,95169085
	8,67599548	
22	11,3425956	
		7,96310921
23	12,3766933	
		7,44640955
33		25,1971893
	20,9437107	
36	23,0664694	
		15,1850002
39		8,02511331
	17,8228068	
	18,1764804	
49		16,5323048
	23,2141801	
54	15,9887746	
		18,6624614
56		23,3713115
	16,5422106	
60	16,5772744	
		13,133519
62	11,7445489	
		13,6008717
64	27,6255938	
		44,9844776
73	23,6060293	
		18,7952228
79		22,4007753
	13,3588802	
84	19,134609	
		17,50989
97	9,89619537	
		1,43656977
106	23,4039303	
		26,9117608
107	26,0876378	
		31,414268
108	16,9038055	
		35,2083571
110	32,7676055	
		21,0235929
112	38,253615	
113		29,3600728
	25,525501	
116	46,0094536	
		29,8155326
117		47,4115762
	38,1451687	
120	37,6003514	
		38,796758

Anexo 5 Tabla de concentración Intra - domiciliaria y uso de insecticidas

concentracion Vs uso de insecticidas		
casas	si uso	no uso
31	10,7972432	
		11,497
47	30,1749739	
		40,498406
48	19,7783138	
		18,1764804
50	34,8611618	
		23,2985761
53	16,7704559	
		18,2155034
62	11,7445489	
		13,6008717
84	19,134609	
		17,50989
97	9,89619537	
		1,43656977
105	21,0684816	
		20,4756133
106	23,4039303	
		26,9117608
107	26,0876378	
		31,414268
110		32,7676055
	21,0235929	
116		46,0094536
	29,8155326	

Anexo 6 Tabla de concentración Intra - domiciliaria y fumadores cercanos

concentracion Vs fumadores cercanos		
casas	si	no
6		9,586
	2,405	
47	30,1749739	
		40,498406
50	34,8611618	
		23,2985761
56		23,3713115
	16,5422106	
57		14,7106777
	21,8744065	
74		21,1428307
	19,4424865	
78		20,4867887
	22,0279109	
79	22,4007753	
		13,3588802
81	18,9697746	
		13,1451042
98		12,7876985
	3,71858165	
103		4,50324583
	20,9775302	
110	32,7676055	
		21,0235929
120		37,6003514
	38,796758	

Anexo 7 Tabla de concentración Intra - domiciliaria y uso de pegantes

concentracion Vs uso de pegantes		
casas	si uso	no uso
19	6,95169085	
		8,67599548
40	11,0191581	
		16,2583423
43		29,9272112
	18,5806221	
44		20,9113833
	20,7862457	
47	30,1749739	
		40,498406
48	19,7783138	
		18,1764804
53	16,7704559	
		18,2155034
57	14,7106777	
		21,8744065
62		11,7445489
	13,6008717	
75	25,8506467	
		28,6827556
77		74,7267353
	49,9340879	
78		20,4867887
	22,0279109	
94	4,49176941	
		19,6645003
99		13,5138397
	12,835532	
107		26,0876378
	31,414268	
116		46,0094536
	29,8155326	
122	32,9655439	
		33,2477696

Anexo 8 Tabla de concentración Intra - domiciliaria y encendido de velas y/o incienso

concentracion Vs velas e incienso		
casas	si	no
18		8,80039919
	6,23621111	
40		11,0191581
	16,2583423	
43	29,9272112	
		18,5806221
62	11,7445489	
		13,6008717
63	9,4332622	
		18,3536887
72	23,9618748	
		24,0127356
79		22,4007753
	13,3588802	
101	27,553715	
		26,7389609
102	20,9025378	
		19,2433573
103	4,50324583	
		20,9775302
112	38,253615	
		26,9132073

Anexo 9 Tabla de concentración Intra - domiciliaria y uso de ventiladores

concentracion Vs uso de ventiladores		
casas	si	no
3		15,304
	17,108	
20		11,4187952
	9,22518957	
24	11,251338	
		13,1025021
25	6,07802809	
		12,1503345
29		10,4296376
	10,7600132	
31		10,7972432
	11,4971652	
33		25,1971893
	20,9437107	
35		17,1782124
	16,0858631	
45		23,4247515
	18,1165603	
57		14,7106777
	21,8744065	
59		13,1070626
	16,545748	
62		11,7445489
	13,6008717	
64		27,6255938
	44,9844776	
68	30,6382559	

		28,8716982
72	23,9618748	
		24,0127356
80	19,2645838	
		20,4168561
97	9,89619537	
		1,43656977
98		12,7876985
	3,71858165	
105	21,0684816	
		20,4756133
112	38,253615	
		26,9132073
114	31,6707669	
		38,6111371
115	32,920723	
		33,1503226

Anexo 10 Tabla de concentración Extra - domiciliaria y variables meteorológicas

Fecha	concentración extra	lluvias (mm)	Velocidad del viento	Humedad	Radiacion solar	Temperatura °c
27 oct. - 1 nov. 2014	15,4389965	0,2	1,46	80,67	173,67	20,63
2 nov. - 7 nov 2014	15,6353	1,5	1,22	82,33	169,22	22,13
8. nov - 13 nov 2014	15,17433432	3,16	1,17	87,33	144,27	22,6
14 nov. - 19 nov. 2014	15,20160745	2,4	1,15	84,83	157,62	23,28
20 nov. - 25 nov 2014	18,86994846	0,3	1,20	84,33	165,53	23,63
19 ene. - 25 ene. 2015	23,14504298	0,3	1,23	77,57	161,57	23,59
26 ene. - 31 ene 2015	22,89126497	1,6	1,35	78,83	199,83	24,52
1 feb. - 6 feb. 2015	20,57716249		1,33	74,50	228,67	25,15
7 feb. - 12 feb. 2015	19,14343391		1,32	75,17	201,83	25,05
18 feb. - 24 feb 2015	29,16364176		1,30	77,57	180,14	25,29
25 feb. - 28 feb. - 2015	33,84176356	0,83	0,4	23,75	210,75	23,8

8 BIBLIOGRAFIA

- Adonis, M., 1985. "El caso del centro de Santiago: Contaminación del aire en espacios interiores". *Ambiente y Desarrollo*, XI.
- Agencia de Salud pública de Barcelona, 2013. Los contaminantes atmosféricos: las partículas en suspensión (PM). *Los contaminantes atmosféricos: las partículas en suspensión (PM)*. Available at: <http://www.terra.org/categorias/articulos/los-contaminantes-atmosfericos-las-particulas-en-suspension-pm>.
- Amato, F. et al., 2014. Sources of indoor and outdoor PM2.5 concentrations in primary schools. *Science of The Total Environment*, 490, pp.757–765.
- Ayllon, T., 1996. Elementos de Meteorología y Climatología. México.
- Barraza, F. et al., 2014. Indoor PM2.5 in Santiago, Chile, spring 2012: Source apportionment and outdoor contributions. *Atmospheric Environment*, 94, pp.692–700.
- Chan, C.K. & Yao, X., 2007. Air pollution in mega cities in China.
- Chen, Y. et al., 2006. Variations in Indoor PM10 Concentrations in Sixteen Homes in Guiyang City. In *Bull Environmental Contamination and toxicology*.
- concejeria del medio ambiente y ordenacion del territorio, 2004. Efectos perjudiciales del material particulado. *Junta de andalucia*.
- Cruz, A. & Jimenez, A., 2006. *EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR MICROORGANISMOS OPORTUNISTAS Y SU RELACIÓN CON MATERIAL PARTICULADO (PM2.5 Y PM10) EN LA LOCALIDAD DE PUENTE ARANDA*. UNIVERSIDAD DE LA SALLE.
- Cruz, R.M. et al., 2001. ANÁLISIS DE DATOS DE PM2.5 REGISTRADOS CON EQUIPO TEOM EN LAS ESTACIONES AZCAPOTZALCO (AZC) Y SANTA URSULA (SUR) DE LA RED AUTOMATICA DE MONITOREO ATMOSFERICO (RAMA).
- Font tullot, I., El hombre y su ambiente atmosférico.
- G.E morales, R., 2006. *contaminacion atmosferica urbana* primera ed. S. . Universitaria, ed., santiago de chile. Available at: <https://books.google.com.co/books?id=HdeX6SWHBW8C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.
- Gaitan, M., Cancino, J. & Behrentz, E., 2007. Análisis del estado de la calidad del

aire en Bogotá.

- García alvear, N., 2006. Contaminación del aire. *Revista de la facultad de ciencias químicas. Universidad de cuenca.*, 4. Available at: <https://books.google.com.co/books?id=RC7kpeEv1IAC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.
- Gaviria, C., Benavides, P. & Tangarife, C., 2011. Contaminación por material particulado (PM_{2,5} y PM₁₀) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 29(3), pp.241–250.
- Gil, L., Cáceres, D., Quiñones, L., et al., 1997. Contaminación del aire en espacios exteriores e interiores en la ciudad de Temuco. *Ambiente y Desarrollo*, p.13: 70–8. Available at: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Contaminación+del+aire+en+espacios+interiores+y+exteriores+en+la+ciudad+de+Temuco&author=Gil+L&author=Cáceres+D&author=Quiñones+L&author=Adonis+M&publication_year=1997&journal=Ambiente+y+Desar.
- Gil, L., Cáceres, D. & Adonis, M., 1997. Influence of Atmospheric Air Pollution on Indoor Air Quality: Comparison of Chemical Pollutants and Mutagenicity Levels in Santiago (Chile). *sage journals*. Available at: <http://ibe.sagepub.com/content/6/6/320.full.pdf+html>.
- Gil, L.D. & Adonis, M.I., 1996. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Levels and Mutagenic Activities of Organic Extracts from Airborne Particles in Santiago de Chile. *sage journals*.
- Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, 2007. *CAMBIO CLIMÁTICO 2007 INFORME de SÍNTESIS* Equipo de.,
- Instituto nacional de Ecología, 2011. *Guía metodológica para emisiones PM_{2.5}*,
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo España, NTP 164: Colas y adhesivos. Tipos y riesgos higiénicos.
- Lebowitz, 1985. Respiratory symptoms and peak flow associated with indoor and outdoor air pollutants in the south west J. Air Pollut.
- Martínez, E. et al., 2007. Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud de la población Medellín y su área metropolitana. Medellín.
- Nerín, I. et al., 2010. Medición del nivel de partículas finas respirables (PM_{2.5}) como marcador del humo ambiental del tabaco en locales de hostelería de Zaragoza.

- OMS, Organización Mundial de la Salud, (Organización Mundial de la Salud), 2014. Calidad del aire (exterior) y salud. *Nota descriptiva N°313*.
- Organización Panamericana de la Salud, (Organización Panamericana de la Salud), 1985. *Programa de Vigilancia de los Serotipos y Resistencia Antimicrobiana de Streptococcus pneumoniae y Haemophilus influenzae: Manual de procedimientos*,
- Pino et al., 1998. Indoor air pollution in southeast Santiago, Chile. *Revista medica de Chile*. Available at: <http://europepmc.org/abstract/med/9699366>.
- Puigcerver, Manuel & Carrascal, M.D., 2008. *El medio atmosférico: meteorología y contaminación* Primera. Universitat de Barcelona, ed., Barcelona: Graficas Rey, S.L. Available at: <https://books.google.com.co/books?id=cPYrHVmslewC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.
- Quijano, A. & Orozco, J., 2005. Monitoreo de material particulado-fracción respirable (PM2.5 en Pamplona (Colombia)). *Revista de la facultad de ciencias básicas Bistua. Pamplona*, 3, pp.1–11.
- Song, Y., Zhang, M. & Xuhui, C., 2006. PM10 Modeling of Beijing in the winter.
- Wang, Y. et al., 2015. Experimental Investigation on Indoor/Outdoor PM2.5 Concentrations of an Office Building Located in Guangzhou. *Procedia Engineering*, 121, pp.333–340.