

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN LA  
CONCENTRACIÓN DE PST Y PM<sub>10</sub> EN INMEDIACIONES DE LA UNIVERSIDAD  
SANTO TOMÁS SEDE LOMA LINDA.



ANGIE MAGALY BUITRAGO MORENO

JOSE MIGUEL TEJEIRO MAHECHA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

INGENIERÍA AMBIENTAL

VILLAVICENCIO

2019

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN LA  
CONCENTRACIÓN DE PST Y PM<sub>10</sub> EN INMEDIACIONES DE LA UNIVERSIDAD  
SANTO TOMÁS SEDE LOMA LINDA.

ANGIE MAGALY BUITRAGO MORENO  
JOSE MIGUEL TEJEIRO MAHECHA

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero Ambiental

Asesora:

YURY TATIANA CÁRDENAS HERNÁNDEZ

Ing. Química

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

INGENIERÍA AMBIENTAL

VILLAVICENCIO

2019

## **AUTORIDADES ACADÉMICAS**

**P. JUAN OBALDO LOPEZ SALAMANCA O.P.**

Rector General

**P. MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO O.P.**

Vicerrector Académico General

**P. JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO O.P.**

Rector Sede Villavicencio

**P. FERNANDO CAJICÁ GAMBOA O.P.**

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN**

Secretaria de División Sede Villavicencio

**YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRAN**

Decano Facultad de ingeniería ambiental

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

**NATALIA MOSQUERA BELTRÁN**  
Decano de Facultad Ingeniería Ambiental

---

**YURY TATIANA CÁRDENAS**  
Directora Trabajo de Grado

---

**VERONICA DUQUE PARDO**

Jurado

---

**CARLOS DAVID GOMEZ ORTIZ**

Jurado

Villavicencio, febrero 2019

## **Agradecimientos**

Agradecemos a todos los docentes que han hecho parte de nuestro proceso como profesionales en especial a nuestra directora Yury Tatiana Cárdenas Hernández quien nos motivó a trabajar en la línea de investigación de calidad del aire, brindando sus conocimientos y experiencia en la noble tarea de la enseñanza. Por toda la orientación, esfuerzo, dedicación, paciencia y sobre todo su tiempo.

De forma especial también agradecemos a nuestras compañeras, Dayana Fernanda Cubillos, Diana Marcela Huertas y Claudia Paola Páez, personas con quienes hemos compartido durante toda la carrera momentos de alegrías, frustraciones y algo de angustia. Además de aprender de sus virtudes, como el compañerismo, la entrega y creatividad.

A nuestros amados padres, sin los cuales esto no hubiese sido posible, por formarnos como personas con valores como el respeto, responsabilidad y honestidad; por su apoyo económico y moral, su confianza y sobre todo su esfuerzo por sacarnos adelante.

Por último y el más importante, a nuestro señor Dios y creador quien es sustento de nuestra familia y de nosotros.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Resumen.....	10
Abstract.....	11
Introducción .....	12
1. Definición del problema .....	14
1.1. Formulación del problema.....	14
1.2. Hipótesis .....	16
2. Objetivos.....	17
2.1. Objetivo General.....	17
2.2. Objetivos Específicos.....	17
3. Justificación .....	18
4. Alcance del proyecto.....	19
5. Antecedentes.....	21
6. Marco Referencial.....	23
6.1. Material particulado (PST Y PM <sub>10</sub> ).....	23
6.1.1. Tamaños de partícula y principales fuentes de generación de material particulado. 23	
6.1.2. La meteorología y sus parámetros.....	24
6.1.2.1. Temperatura.....	25
6.1.2.2. Viento.....	25
6.1.2.3. Precipitación.....	25
6.2. Marco conceptual.....	25
6.3. Marco legal .....	27
7. Metodología .....	30
7.1. I Parte. Obtención de la información .....	30
7.1.1. Recolección de la información cartográfica.....	30
7.1.2. Levantamiento de datos.....	30
7.1.2.1. Método de muestreo para la recolección de PST y PM <sub>10</sub> .....	31
7.1.2.2. Calibración del equipo Hi-Vol.....	31
7.1.2.3. Procedimiento de muestreo de las partículas suspendidas totales (PST).....	36

7.1.2.4.	Cambio de filtro.....	37
7.1.2.5.	Manejo y transporte de muestras.....	37
7.1.2.6.	Pesaje de los filtros.....	38
7.1.3.	Determinación de la concentración de partículas suspendidas totales (PST). .....	38
7.1.4.	Procedimiento de muestreo de las partículas suspendidas menores o iguales a 10 micras (PM <sub>10</sub> ). .....	40
7.1.5.	Determinación de la concentración de las partículas suspendidas menores a 10 micras (PM <sub>10</sub> ). .....	41
7.1.6.	Base de datos.....	41
7.2.	II Parte. Procesamiento de la información.....	42
7.2.1.	Diagrama de correlación.....	42
7.2.1.1.	Recolección de datos.....	42
7.2.1.2.	Representación de los datos.....	42
7.2.1.3.	Medición de correlación.....	43
7.2.1.3.	Interpretación del diagrama.....	45
7.3.	Parte III. Dirección de los vientos y contaminantes.....	46
7.3.1.	Software libre R y su paquete Openair.....	46
7.3.2.	Rosa de los vientos.....	47
8.	Resultados.....	48
8.1.	Fase I. Obtención de la información.....	48
8.1.1.	Recolección de información cartográfica.....	48
8.1.2.	Base de datos.....	50
8.1.3.	Diagramas de correlación.....	52
8.3.	Parte III. Dirección de los vientos y contaminantes.....	58
8.3.1.	Rosa de los vientos y rosa de contaminantes.....	58
8.3.2.	Software libre R y su paquete Openair.....	63
8.3.2.1.	Resumen estadístico básico de material particulado (PM <sub>10</sub> y PST). .....	63
8.3.2.1.1.	La Gráfica de Calendario PM <sub>10</sub> .....	64
8.3.2.1.2.	La Gráfica de Calendario PST.....	65
	Conclusiones.....	67
	Recomendaciones.....	68
	Referencias.....	69

**Tabla de figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Fuentes generadoras de material particulado .....	24
Figura 2. Kit de calibración .....	32
Figura 3. Instalación del kit de Calibración en el equipo .....	32
Figura 4. Curva de calibración - flujo volumétrico - PM <sub>10</sub> y PST .....	35
Figura 5. Equipo Muestreador de Alto Volumen.....	36
Figura 6. Muestreo de PM <sub>10</sub> .....	41
Figura 7. Obtención del diagrama de correlación.....	43
Figura 8. Obtención del coeficiente de correlación en SPSS.....	44
Figura 9. Tipos de correlaciones.....	45
Figura 10. Fuentes de emisiones fijas y Móviles en inmediaciones de la Universidad Santo Tomas de Aquino.....	49
Figura 11. Diagrama de PM <sub>10</sub> y Temperatura.....	53
Figura 12. Diagrama de PM <sub>10</sub> y Temperatura.....	54
Figura 13. Diagrama de PM <sub>10</sub> y Velocidad del Viento.....	55
Figura 14. Diagrama de PST y Precipitación.....	56
Figura 15. Diagrama de PST y Temperatura .....	57
Figura 16. Diagrama de PST y Velocidad del Viento .....	57
Figura 17. Rosa del contaminante PM <sub>10</sub> . Adaptado.....	59
Figura 18. La rosa del contaminante PST. Adaptado. ....	60
Figura 19. Rosa de los vientos con la dirección de donde vienen, Adaptado por: Buitrago, Tejeiro,2018, a partir del software ArcGis 10.3, bajo la licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.....	61
Figura 20. Rosa de los vientos con la dirección hacia donde se dirigen, Adaptado por: Buitrago, Tejeiro,2018. a partir del software ArcGis 10.3, bajo la licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.....	62
Figura 21. Gráfico de calendario para PM <sub>10</sub> .....	65
Figura 22. Gráfica de Calendario PST.....	66

**Lista de ecuaciones**

	<b>Pág.</b>
Ecuación 1. Caudal actual o real (m <sup>3</sup> /min) .....	33
Ecuación 2. Presión de estancamiento (mm Hg) .....	34
Ecuación 3. Relación de presiones según la temperatura ambiente.....	34
Ecuación 4. Diferencia porcentual (%).....	34
Ecuación 5. Tiempo de duración de cada muestreo (Horas) .....	38
Ecuación 6. Temperatura promedio (°C) .....	39
Ecuación 7. Caudal estándar (m <sup>3</sup> /min).....	39
Ecuación 8. Volumen de muestro (m <sup>3</sup> ).....	39
Ecuación 9. Volumen total de aire muestreado, en unidades de volumen estándar, m <sup>3</sup> .....	40
Ecuación 10. Concentración másica de material particulado suspendido total, µg/m <sup>3</sup> .....	40
Ecuación 11. Recta de regresión.....	44

## Resumen

En el presente proyecto se realizó una investigación descriptiva de tipo correlacional en la ciudad de Villavicencio, ya que se determinó el grado de influencia de las condiciones meteorológicas en la concentración de PST y PM<sub>10</sub>, mediante diagramas de correlación arrojados por SPSS y la recolección diaria de material particulado durante dos meses (16 de mayo hasta el 15 de julio de 2018) en época de lluvia, utilizando el equipo muestreador HI-Vol; en simultáneo con la velocidad del viento (m/s), temperatura (°C) y precipitación (mm), registrados por la estación de monitoreo del SVCA de la ciudad, situada en la dispensadora de combustible Montealegre–Distracom.

Los niveles de contaminación de PM<sub>10</sub> se presentan entre los intervalos de 16.65 a 47.58 ug/m<sup>3</sup>, mostrando una asociación negativa baja con la precipitación ( $r=-0.21$ ) y la velocidad del viento ( $r=-0,2$ ) y positiva muy baja con la temperatura ( $r=0.02$ ), asimismo, los niveles de contaminación de PST se presentaron entre los intervalos de 4.15 a 71.01 ug/m<sup>3</sup>, mostrando una asociación negativa baja con la precipitación ( $r=-0,25$ ), negativa muy baja con la velocidad del viento ( $r=-0.1$ ) y positiva muy baja con la temperatura ( $r=0.04$ ). Es decir, que la relación entre las condiciones meteorológicas (Velocidad del viento (m/s), temperatura (°C) y precipitación(mm)) y el material particulado (PST y PM<sub>10</sub>) no tienen una influencia significativa, ya que el grado de correlación es muy bajo.

Al igual, se estableció de donde vienen y posiblemente hacia donde se dirigen los contaminantes desde la zona de estudio, a través del análisis de datos hecho por medio de la rosa de los vientos realizada mediante el programa WRPLOT View-Freeware y la rosa de contaminantes por el software libre R y su paquete Openair, obteniendo también de este último programa, un calendario donde se muestra la magnitud de la concentración de material particulado (PST y PM<sub>10</sub>) en cada uno de los días muestreados y un resumen estadístico básico de los datos de contaminación captados, dando como resultado que el arrastre de partículas suspendidas por el viento provienen del Sur y se dirigen al Norte de la ciudad.

**Palabras Claves:** PM<sub>10</sub>, PST, Variables meteorológicas, coeficientes de correlación.

### Abstract

In this project performed a descriptive investigation and its type was correlational, in Villavicencio city, the degree of influence on meteorological conditions in the concentration of PST and PM<sub>10</sub> was determined, this was realized through correlation diagrams, those diagrams were obtained for SPSS and the daily recolection of particulate material in rainy times, during two months (May 16th to July 15th, 2018), in this process a sampler equipment HI- Vol was used. The velocity of the wind (m/s), the temperature (°C) and the precipitation (mm) it registered through the monitoring station of the SVCA of Villavicencio City, which is in the dispenser of fuel denominated Montealegre-Distracom.

The levels of contamination of PM<sub>10</sub> are presented between the intervals of 16.65 to 7.58 ug/m<sup>3</sup>, so showing a negative association with the precipitation ( $r=-0.21$ ) and the velocity of the wind ( $r=-0,2$ ), and a positive association very low with the temperature ( $r=0.02$ ). Equally, the levels of contamination of the PST, are presented between the intervals of 4.15 to 71.01 ug/m<sup>3</sup> so showing a negative association low with the precipitation ( $r=-0,25$ ), and negtive very low with the velocity of the wind ( $r=-0.1$ ) and a positive very low with the temperatura ( $r=0.04$ ), in other words, the relationship between meteorological conditions (wind speed (m/s), temperature (°C) and precipitation (mm)) and particulate matter (PST and PM<sub>10</sub>) do not have a significant influence, since the degree of Correlation is very low.

With the investigation could establish where it comes from the contaminants and what place the contaminants go since the studied area through analysis of data that could realized with the Rose of the winds used with the program WRPLOT view-freeware and the rose of contaminants for the software free R and its package openair, obtaing a calendar which show us the magnitude of the concentration of particulate material (PST y PM<sub>10</sub>) and a abstract basic statistic of the contaminant data that captured, and this give us the result that drag of particles suspended by the wind, they come from the sur and they go to the North of the city.

**Key Words:** PM<sub>10</sub>, TSP, meteorological variables, Correlation coefficients.

## Introducción

En Colombia, la contaminación atmosférica se ha constituido en uno de los principales problemas ambientales (Minambiente, 2010). Uno de estos es el material particulado, siendo uno de los más estudiados a nivel mundial (Suarez, 2012).

Las actividades humanas, como la industria y el movimiento vehicular, se consideran las principales fuentes de emisión de material particulado que, en conjunto con factores meteorológicos y topográficos, hacen que el comportamiento del material particulado varíe temporalmente de manera irregular en la atmósfera (Harrison, 2006).

En el sur- oriente de la ciudad Villavicencio, Meta donde se encuentra ubicada la Universidad Santo Tomas de Aquino campus Loma Linda, es una de las zonas más industrializadas con sector urbano, encontrándose fuentes de emisión fijas como el Molino de Arroz Roa, la Maderera El Vergel y la Procesadora de Arroz Montecarlo. Además, la vía Villavicencio-Acacias es de las más transitadas del municipio siendo esta una fuente de emisión móvil relevante, trayendo consigo problemas de contaminación atmosférica por material particulado y de salud pública (Cormacarena, 2015).

El aporte que pueden realizar los diversos estudios enfocados a contaminantes como y PST, teniendo en cuenta el monitoreo, análisis y relación con variables que influyen en su comportamiento (precipitación, velocidad y dirección de vientos, entre otras), es fundamental para el desarrollo de las ciudades, la protección de la población, promover los vínculos interinstitucionales y contribuir al entendimiento de temas de importancia científica como la contaminación atmosférica (González, 2012). Por lo tanto, el proyecto daría un aporte ya que Villavicencio, aunque tiene un sistema de Vigilancia de Calidad del Aire no tiene suficientes estudios sobre el grado de influencia de las condiciones meteorológicas en la concentración del contaminante PST y PM<sub>10</sub>, por lo que se realiza una investigación descriptiva de tipo correlacional mediante diagramas de correlación. Asimismo, se aportó con la dirección hacia la que posiblemente se dirigen los contaminantes desde la Universidad Santo Tomas sede Loma Linda,

para el periodo de tiempo transcurrido entre el 16 de mayo y 14 de julio del 2018, debido a la falta de investigaciones referentes al tema en la ciudad de Villavicencio.

## 1. Definición del problema

### 1.1. Formulación del problema

Limitar la contaminación atmosférica es un desafío que debe enfrentar en el mundo entero, puesto que es una problemática que causa consecuencias globales por la destrucción de determinados componentes atmosféricos (caso de la destrucción del ozono estratosférico) (IPCC, 2007) y a escalas locales y regional en las que el deterioro de la calidad del aire puede tener repercusiones negativas sobre los ecosistemas, e incluso sobre la salud humana.

Según el CONPES, (2008) “la contaminación del aire, debida principalmente al material particulado, afecta la salud de 80 millones de personas en América Latina y el Caribe”. En Colombia, 6000 muertes y 7400 nuevos casos de bronquitis crónica al año son atribuibles a la calidad del aire en exteriores.

La Organización Mundial de la Salud, en sus informes más recientes sobre los efectos de la contaminación atmosférica en la salud, indica claramente que entre los contaminantes con mayor impacto está el material particulado en suspensión PM<sub>10</sub>, por lo que es de los más analizados (Querol, 2018). El Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2017 es el último que considera al contaminante PST como contaminante criterio debido a la entrada en vigencia de la Res. 2254/2017 sin embargo, no quiere decir que PST no sea un contaminante de importancia debido a que son partículas dispersas en el aire que no sedimentan en periodos cortos, sino que permanecen suspendidas debido a su tamaño y densidad (IDEAM, 2017), sumado a que algunos elementos traza presentes en su composición pueden inducir efectos negativos en la salud, clasificados como cancerígenos para los humanos tales como el V, Pb y Cd, por lo que es necesario un seguimiento al mismo (Minambiente, 2010).

Las pruebas relacionadas con el MP ponen de manifiesto la peligrosidad del contaminante PM<sub>10</sub> por su capacidad de ingresar al sistema respiratorio humano; no obstante, en Colombia existen carencias en el estudio de este contaminante y solo las principales ciudades del país (Bogotá, Medellín, Cali, Bucaramanga) cuentan con redes de vigilancia relativamente sólidas para

PM<sub>10</sub> (Costa, Saldarriaga, Lozano, & Suarez, 2007) además de los pocos estudios relativos al análisis de fuentes, dinámica y relación con variables meteorológicas (González, 2012).

En el caso de Villavicencio hay estudios anteriores realizado por La Corporación Para El Desarrollo Sostenible Del Área De Manejo Especial La Macarena (Cormacarena) en la que reveló, que aumentó el nivel de contaminación del aire para el 2015 en Villavicencio, los datos se obtuvieron en seis puntos de gran flujo vehicular de la ciudad, donde se destaca que el agente contaminante que incremento en la capital es el PM<sub>10</sub>, actualmente Cormacarena cuenta el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), el cual está en funcionamiento desde el mes de diciembre del 2016 en tres puntos de medición ubicados en la Estación Esmeralda – determina concentraciones generales de fondo del área urbana de Villavicencio, Estación Cofrem – determina concentraciones más altas debido a las fuentes móviles de la ciudad, Estación Catumare – determina las concentraciones más altas debido a las fuentes industriales de la ciudad midiendo PM<sub>10</sub>, NOX y O<sub>3</sub> (Cormacarena, 2016).

Conjuntamente a este monitoreo por las entidades ambientales, los aporte que pueden realizar los diversos estudios enfocados a otros contaminantes como es el PST y otros gases que no son no son los contaminantes de mayor impacto teniendo en cuenta los monitoreo, análisis espacio-temporal y relación con variables que influyen en su comportamiento (precipitación, velocidad y dirección de vientos, radiación solar, entre otras), podría ser fundamental para el desarrollo de las ciudades, la protección de la población y contribuir al entendimiento de temas de importancia científica como la contaminación atmosférica (González, 2012).

Problemáticas, que se ven agravadas por las características del área de estudio, meteorológicas como la baja velocidad y constancia del viento que no permite la dispersión del contaminante, promediando 3.16 km/h durante el periodo de captación y el conflicto de uso del suelo (industrial o urbano), donde se encuentran fuentes de emisión fijas como el Molino de Arroz Roa, la Maderera El Vergel y la Procesadora de Arroz Montecarlo.

Además del incremento y aglomeración de vehículos en horas pico por la ineficiencia de la infraestructura vial (vía Acacias-Villavicencio), que cuenta con dos carriles para el flujo vehicular de toda la comuna 8 que en el 2005 contó con 3705 personas (DANE, 2010). Incluyendo tres estaciones de servicio y un parqueadero aledaños al punto de muestreo, la estación De Servicios Montealegre - Distracom, Terpel y estación de servicio Montecarlos.

Contaminación evidenciada y expresada en forma de continuas quejas ante las autoridades competentes y redes sociales por la comunidad de los barrios Catumare, San Jorge, La Tigana, Montecarlo, Maranatha, entre otros; por la afectación que estaba generando principalmente el material particulado emitido por el Molino de Arroz Roa (El Tiempo, 2016), quejas recibidas de primera mano por la comunidad ya mencionada.

## **1.2. Hipótesis**

Debido a la problemática de la zona de estudio donde se evidencia el conflicto de uso del suelo (urbano e industrial) y conglomeración de fuentes de emisión fijas y móviles, se esperan concentraciones altas de material particulado (PST y PM<sub>10</sub>), donde influirían de manera importante las condiciones meteorológicas de precipitación (mm), temperatura (°C) y velocidad del viento (m/s).

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

Determinar la influencia de las condiciones meteorológicas como temperatura, precipitación, velocidad y dirección del viento; en la concentración de material particulado (PST y PM<sub>10</sub>), estableciendo posiblemente hacia donde se dirigen los contaminantes mediante muestreos en la Universidad Santo Tomás Campus Loma Linda Villavicencio/Meta.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Determinar la cantidad de material particulado (PST y PM<sub>10</sub>) por medio del equipo muestreador Hi-Vol.
- Establecer la influencia de las condiciones meteorológicas (temperatura (°C), precipitación (mm), dirección y velocidad del viento (m/s) en la concentración del material particulado PST y PM<sub>10</sub> (ug/m<sup>3</sup>), por medio de diagramas de correlación.
- Analizar la rosa de los vientos y de contaminantes del material particulado (PST y PM<sub>10</sub>) mediante el programa WRPLOT View-Freeware y el software libre R.

### 3. Justificación

La concentración de los contaminantes se reduce al dispersarse en la atmósfera, proceso que depende de las condiciones meteorológicas como la temperatura, la velocidad del viento, precipitación. etc.; estas, generan fenómenos de dispersión de los contaminantes, puesto que provocan acumulación en zonas próximas a las fuentes de emisión o transporte a zonas más o menos alejadas (Gobierno de Aragón, 2014). Según la Organización Panamericana de la Salud (2006), “la meteorología se usa para predecir el impacto ambiental de una nueva fuente de contaminación del aire y para determinar el efecto de las modificaciones de las fuentes existentes en la calidad del aire”.

Por consiguiente es necesario determinar y correlacionar las principales variables meteorológicas con las concentraciones de material particulado (PST y PM<sub>10</sub>), identificando las posibles direcciones hacia las que se dirigen los contaminantes desde el área de estudio, específicamente desde el punto de captación de datos meteorológicos; ya que estos en especial PM<sub>10</sub> es considerado como uno de los contaminantes del aire más importantes en términos de sus posibles efectos sobre la salud, como el aumento en la mortalidad de origen cardíaco y respiratorio, reducción de los niveles de la capacidad pulmonar en niños y adultos asmáticos y enfermedades crónicas de obstrucción pulmonar (Trujillo & Torres, 2015).

Los mayores niveles de contaminación se presentan en las zonas urbanas y grandes centros industriales, teniendo en cuenta que en nuestro país cerca del 74 % de la población habita en estas zonas (OPS,2005). Por lo que las inmediaciones de la Universidad Santo Tomás Campus Loma Linda, es una de las zonas urbanas con mayor actividad industrial siendo fuente significativa de emisiones fijas y móviles representadas por el sector molinero, maderero y parque vehicular; por ende, es significativo tomar la universidad como punto de referencia, para realizar la toma de datos de material particulado (PST y PM<sub>10</sub>) y a partir de este, determinar hacia donde se dirigen estos contaminantes definiendo las zonas expuestas. Ya que alrededor se cuenta con instituciones educativas como el Colegio Josse Owens, Colegio comunal Albert Einstein, el Colegio Getsemaní y el Instituto Educativo Catumare y sus sedes donde los estudiantes pasan un promedio de seis horas al día viéndose posiblemente afectados por estas concentraciones de material particulado.

#### 4. Alcance del proyecto

El proyecto se realizó en el municipio Villavicencio-Meta, situado en el pie de monte de la Cordillera Oriental de Colombia, exactamente en la Universidad Santo Tomás sede Loma Linda localizada en la dirección: Carrera 48 N° 19 - 05 Sur Vía Acacias.

La investigación realizada fue correlacional, ya que este tipo de investigación permite medir el grado de relación entre dos o más variables y permite analizar cómo se vinculan diversos fenómenos entre sí, como es el objetivo en este caso con las condiciones meteorológicas y las concentraciones de PST y PM<sub>10</sub> (Muñoz, 2011), relaciones que puede ocasionar altas y bajas concentraciones de material particulado que en algunos casos pueden llegar a ser peligrosos dependiendo del tiempo de exposición.

La investigación se realizó con base en la información de material particulado obtenido de 54 muestreos de una duración de 24 horas hechos con el equipo de alto volumen Hi-Vol., durante dos meses (16 de mayo hasta el 15 de julio del 2018 ) en época de lluvia, 30 muestreos para PST utilizando filtros de fibra de vidrio y 24 para PM<sub>10</sub> usando filtros de microfibra de cuarzo, tomados en la Universidad Santo Tomás sede Loma Linda y los datos meteorológicos con un resolución diaria (temperatura (°C), precipitación (mm), dirección y velocidad del viento (m/s)) arrojados por la estación meteorológica Catumare perteneciente a Cormacarena durante el mismo periodo de tiempo, entre el 16 de mayo y el 15 de julio del 2018, situada en la dispensadora de combustible Montealegre- Distracom a 113 m del equipo muestreador Hi-Vol, distancia con una incertidumbre de más o menos 0.81m, obtenida de varias lecturas arrojadas por la herramienta regla de Google Earth, que mide la distancia lineal entre dos punto en el mapa.

Datos necesarios para el desarrollo de análisis estadísticos procesados en programas como SPSS, que por medio de diagramas de correlación y su interpretación se puedo conocer que tanto influye cada una de las condiciones meteorológicas (temperatura (°C), precipitación (mm) y velocidad del viento (m/s)) en la concentración de material particulado tanto para PST como para PM<sub>10</sub>.

El software R y su paquete OpenAir que con el uso de los comandos Summary, CalendarPlot y pollutionRose, se obtuvo un resumen estadístico básico de los datos trabajados, un calendario donde se muestra claramente la magnitud de la concentración de material particulado (PST y PM<sub>10</sub>) en cada uno de los días muestreados y la rosa de contaminantes que junto con la rosa de vientos obtenida del programa WRPLOT View, nos permitió identificar las zonas de donde vienen y hacia donde se dirigen los contaminantes, programas que son de uso libre y fueron la base para el desarrollo del proyecto.

## 5. Antecedentes

En Dublín se desarrolló un estudio en donde las concentraciones de PM<sub>10</sub> disminuyeron con un aumento en la tasa de precipitación, velocidad del viento y temperatura. Esta correlación negativa entre el PM<sub>10</sub> y la temperatura se atribuyó al aumento de la densidad del tráfico y a la calefacción doméstica durante el invierno (Keary, McManus, & Lee, 1998). También, se examinó en la ciudad de Elazığ (Turquía) la relación entre cinco parámetros meteorológicos tales como la velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, radiación solar y presión atmosférica con las partículas suspendidas totales (PST) durante el invierno, obteniendo correlaciones extremadamente bajas entre las variables estudiadas (Akpınar, Oztop & Akpınar, 2008).

Asimismo, se realizó un estudio en la ciudad de Kaohsiung (Taiwán) donde se obtuvieron débiles correlaciones negativas entre los niveles de MP y la velocidad del viento, lo que sugiere que, las bajas velocidades del viento restringen la dispersión y aumentan las concentraciones de MP. Lo que muestra una clara relación entre las condiciones meteorológicas y la concentración y dispersión del MP (Jim & Lee, 2004).

De acuerdo con los resultados del informe anual del estado de la calidad del aire en Colombia 2011-2015, analizados mediante el lenguaje de programación R y su paquete openair; se obtuvieron en cuanto a tendencias de los contaminantes estudiados que los de mayor preocupación fueron en orden PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> (IDEAM, 2016).

Asimismo, se realizó un estudio de calidad del aire en cinco puntos de la ciudad de Manizales durante el periodo comprendido entre septiembre del 2009 y abril del 2011, obteniendo como resultado los niveles máximo de PM<sub>10</sub> en la zona centro de la ciudad con valores entre 22 ug/m<sup>3</sup> y 67ug/m<sup>3</sup> asociados principalmente al tráfico vehicular, además de reconocer como factores influyentes en los cambios de concentración las variables meteorológicas precipitación, temperatura y humedad relativa (González, 2012).

Durante un periodo comprendido entre enero 2010 y diciembre 2012 se realizó el análisis de niveles de (PM<sub>10</sub>) y su asociación con la meteorología en la ciudad de Manizales, Los mayores niveles de PM<sub>10</sub> se observaron en zonas con alta influencia vehicular con valores en un intervalo

de 18 ug/m<sup>3</sup> y 69 ug/m<sup>3</sup>. Las concentraciones de material particulado fueron influenciadas por factores meteorológicos, mostrando una asociación positiva con la temperatura ( $r = 0.40$ ), y negativa con la humedad relativa ( $r = -0.47$ ) y la precipitación ( $r = -0.38$ ) (González, Cortés, & Beatriz, 2014)

En Villavicencio, el interés por la calidad del aire se inició en el 2007 a raíz de una propuesta de investigación titulada “Análisis de la contaminación del aire en la ciudad de Villavicencio”. Proponiendo que Villavicencio debería establecer un proyecto para controlar la calidad del aire y recalando que hasta el momento no se encontraron registros de investigaciones con respecto a la contaminación del aire en la ciudad (Buitrago, 2007)

En el 2009 se elaboró una propuesta para el diseño del plan de acción local para mejorar la calidad del aire en la ciudad de Villavicencio-Meta, mencionando la falta de datos técnicos de medición, y estudios de control que ocasionalmente se hacen contratados por la industria molinera (Camacho & Guzmán, 2009).

Posteriormente, el 14 de noviembre de 2014, Cormacarena realizó un estudio previo para la contratación del siguiente objeto contractual “Realizar un estudio de monitoreo (PST - PM<sub>10</sub> – SO<sub>x</sub> – NO<sub>x</sub> – O<sub>3</sub>) y diseño del sistema de vigilancia de la red de monitoreo de Calidad de Aire del Municipio de Villavicencio” (Cormacarena, 2014).

Cormacarena invirtió dinero y esfuerzo en la implementación del Sistema de Vigilancia y Control en Villavicencio, de lo que se tienen noticia de dos estaciones de monitoreo ubicadas en las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villavicencio (EAAV) E.S.P., en el barrio La Esmeralda y en Montecarlo estará en las instalaciones de la estación de servicio Montealegre, monitoreando los contaminantes criterio PM<sub>10</sub> NO<sub>x</sub> y O<sub>3</sub> (Cormacarena, 2016), sumada a estas una tercer estación de monitoreo situada en el aeropuerto Vanguardia.

## **6. Marco Referencial**

### **6.1. Material particulado (PST Y PM<sub>10</sub>)**

El material particulado (MP) es una agrupación de partículas sólidas emitidas en la atmosfera, tales como el hollín de diésel, polvo de vías y las partículas resultantes de procesos productivos (Fang, Chang, Chu, Wu, Fu, Yang, & Chen, 2003). Estas aeropartículas se encuentran depositadas en el suelo o el aire y son fundamentales como factor contaminante en la atmosfera de cualquier sector. Cuando se encuentran en el aire es por el tamaño diminuto, tanto que su medida es el micrómetro o micra, unidad de longitud equivalente a la millonésima parte de un metro. Estas dimensiones hacen que las partículas sean ligeras, aspecto que se combina con su forma y con diversos factores de tipo climático entre los cuales está la temperatura del ambiente y los vientos (Silva, 2010).

#### **6.1.1. Tamaños de partícula y principales fuentes de generación de material particulado.**

Por otro lado, las partículas suspendidas totales (PST) se distinguen según su tamaño siendo estas inferior o igual a 100 µg. Como resultado de la contaminación por PST incluyen la reducción de la visibilidad, su deposición sobre edificios, daños a los materiales por sus propiedades corrosivas o erosivas, alteración del clima local y afectaciones al sistema respiratorio; también se encuentran las partículas respirables PM<sub>10</sub>, siendo estas las partículas con un tamaño igual o inferior a 10 µg, el pequeño tamaño de las PM<sub>10</sub> les permite entrar fácilmente a los pulmones causando efectos negativos en la salud de la población. Los efectos en salud vinculados a la exposición prolongada de este contaminante competen a un aumento en la frecuencia de cáncer pulmonar, muertes prematuras, síntomas respiratorios severos e irritación de ojos y nariz (Corpocesar, 2009).

El material particulado en este caso PST y PM<sub>10</sub> son generadas las fuentes antropogénicas o naturales llamadas partículas primarias, también puede ser producto de reacciones químicas de

ciertos gases en la atmósfera o procesos de condensación conocidas como las partículas secundarias (Figura 1) (González, 2012).

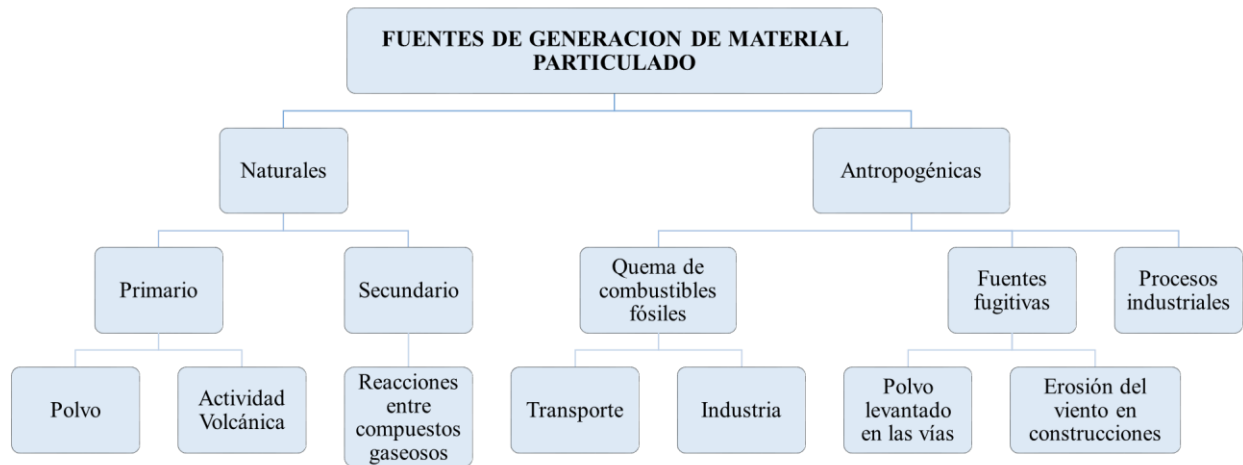


Figura 1. Fuentes generadoras de material particulado. Por, Duque, 2012

### 6.1.2. La meteorología y sus parámetros.

La meteorología es la encargada de todos los fenómenos que suceden en las capas bajas de la atmósfera en un periodo corto. La meteorología estudia los cambios atmosféricos que se producen en cada instante, utilizando parámetros como la temperatura del aire, su humedad, la presión atmosférica, el viento o las precipitaciones. El objetivo de la meteorología es predecir el tiempo que va a hacer en 24 o 48 horas y, en menor medida, elaborar un pronóstico del tiempo a medio plazo (Urrego, 2006).

Por otra parte, como la atmósfera es el entorno donde se generan y se dispersan todos los contaminantes, dependen en gran cantidad de las condiciones meteorológicas. Por ende, para desarrollar actividades como la planificación de la calidad del aire, es fundamental entender la meteorología con la contaminación del aire y su influencia en la dispersión de los contaminantes. Los planificadores emplean este conocimiento para ubicar las estaciones de monitoreo del sistema de vigilancia de calidad del aire y para desarrollar planes de implementación orientados al cumplimiento de los estándares de calidad del aire en exteriores (CEPIS, 2005).

### ***6.1.2.1. Temperatura.***

La temperatura es un parámetro que representa el calor, o transferencia de energía térmica. Definiéndola también como una medida de la energía cinética relacionada con el movimiento aleatorio de las partículas que componen el sistema. Por otro lado, Cuando se tiene una diferencia de temperatura, la energía tiende a transferirse del sistema de mayor temperatura que al de menor temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico (Urrego, 2006). En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de la temperatura es kelvin. Sin embargo, también son utilizadas otras escalas de temperatura, como la escala Celsius (o centígrada), y, en los países anglosajones, la escala Fahrenheit (Urrego, 2006).

### ***6.1.2.2. Viento.***

El viento es el desplazamiento horizontal de las masas de aire, ocasionado por las distintas presiones atmosféricas, otorgadas por las distintas temperaturas o la desigual distribución del calentamiento solar sobre la superficie terrestre (Urrego, 2006); este, presenta variaciones significativas en el tiempo y en el espacio (Benavides & Ayala, 2010) a lo que se le define como velocidad del viento. Por otro lado, la dirección del viento es hacia donde se dirige este; Por ejemplo, un viento del oeste sopla del oeste, 270° a partir del norte; un viento del norte sopla desde una dirección de 360°. Las distintas direcciones del viento están referidas a la rosa de los vientos que señala los puntos cardinales y pueden presentarse en 4, 8, 12 y 16 rumbos. (IDEAM, 2006).

### ***6.1.2.3. Precipitación.***

En meteorología, la precipitación es cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno abarca lluvia, llovizna, nieve, aguanieve y granizo. La cantidad de precipitación sobre un punto de la superficie terrestre es llamada pluviosidad, o monto pluviométrico (Perez, 2018).

## **6.2. Marco conceptual**

Calidad de aire: La calidad del aire es la representación del estado del aire, por medio de una cifra que expresa la intensidad de contaminantes presentes en la atmósfera (Urrego, 2006).

**Contaminación del aire:** Se denomina contaminación atmosférica o del aire a la presencia de uno o más contaminantes, en cantidades que sean o tiendan a ser perjudiciales a la salud de los humanos, la fauna o la flora (Ataz & Morales, 2004).

**Fuente de emisión:** Actividad, proceso u operación, realizado por los seres humanos, o con su intervención, susceptible de emitir contaminantes al aire (UNAL, 2017).

**Fuente fija:** Fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa (UNAL, 2017).

**Fuente móvil:** Es la fuente de emisión causados por los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza (UNAL, 2017).

**Presión barométrica:** También llamada presión atmosférica es la fuerza que ejerce el peso del aire sobre la superficie de la tierra, En una región específica que se encuentra al nivel del mar, la columna de aire será mayor en comparación de una región localizada a mayor elevación (Ariza, 2014).

**Presión de estancamiento:** También llamada como presión total absoluta, Este valor indica la presión total a la que está sometido un cuerpo o sistema, considerando el total de las presiones que actúan sobre él (Merino, 2014)

**Rosa de vientos:** Es una representación gráfica de 16 puntos cardinales: norte, sur, este y oeste; puntos colaterales: noreste, noroeste, sudeste y sudoeste; y, los subcolaterales que se encuentran equidistantes de los señalados (Martín, Francisco & Martín, 2005).

**WRPLOT View:** Es un software gratuito para la construcción de Rosas de Viento con datos meteorológicos. (Herrera, Magaña, & Velueta, 2017).

**ArcGIS:** Es un conjunto de productos de software en el campo de los sistemas de información geográfica, que contiene aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. (Esri, 2014).

**Diagrama de correlación o diagrama de dispersión:** Determina si existe relación entre dos variables (Roldan, 2017), como lo son en este estudio las condiciones meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y precipitación) y las concentraciones de material particulado (PST y PM<sub>10</sub>).

Diagrama de correlación o diagrama de dispersión: que es una representación en un sistema de coordenadas cartesianas de los datos numéricos observados. En el diagrama resultante, en el eje X se miden las variables independientes, y en el eje Y se mide la variable dependiente. Cada punto en el diagrama muestra la pareja de datos (X,Y) que corresponde a un tiempo determinado (Urrego, 2006).

Coefficiente de correlación de Pearson: El coeficiente de correlación de Pearson, pensado para variables cuantitativas, es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Adviértase que decimos "variables relacionadas linealmente". Esto significa que puede haber variables fuertemente relacionadas, pero no de forma lineal, en cuyo caso no proceder a aplicarse la correlación de Pearson. Por ejemplo, si las gráficas de correlación tienen forma de U invertida o de forma exponencial. En estos casos no es conveniente utilizar la correlación de Pearson (Viridiana, 2017).

Covariación: Relación existente entre dos magnitudes o series estadísticas, de manera que todo aumento o disminución de una de ellas se traduce en un aumento o disminución de la otra (Viridiana, 2017).

### **6.3. Marco legal**

Colombia se ha sumado a múltiples reuniones internacionales sobre el medio ambiente, en el cual se ha desarrollado una infinidad de decretos, leyes o normas sobre el cuidado, manejo, vigilancia y prevención a cualquier eventualidad negativa para los seres vivos, en especial el ser humano, teniendo como base la constitución política de Colombia del 1991 la cual en el artículo 79,80 y 366 hablan sobre el derecho de gozar un ambiente sano, sobre el manejo de los recursos para un desarrollo sostenible y obtener bienestar general para sus ciudadanos.

La normatividad para la medición de material particulado en Colombia se rige por la resolución vigente y actualizada de 2254 del 2017, para contaminantes criterio que incluye el material particulado menor o igual a 10 micras (PM<sub>10</sub>), resolución de la que se excluyó las partículas suspendidas totales (PST) regida por la ya derogada resolución 610 del 24 de marzo de 2010, perdiendo validez normativa pero importante como ejercicio práctico durante el desarrollo

del proyecto (Resolución 0610, 2010) (Tabla 1), de igual forma establecen la concentración a condiciones de referencia y el tiempo de exposición bajo los cuales se debe declarar por parte de las autoridades ambientales competentes los estados excepcionales de Prevención, Alerta y Emergencia (Resolución 2254, 2017) (Tabla 2), normatividad necesaria para comparar los resultados adquiridos sobre la concentración de los contaminantes PST y PM<sub>10</sub> con los niveles máximos permisibles.

A través de la resolución 650 de 2010 se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire el cual establece las directrices, metodologías y procedimientos necesarios para llevar a cabo las actividades de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en el territorio nacional (Minambiente, 2010). Este protocolo está compuesto por dos manuales: Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire y Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire. Protocolo modificado por la resolución 2154 de 2010 con el fin de introducir algunos cambios que facilitarían su comprensión y aplicación práctica por parte de las autoridades ambientales y los usuarios (Minambiente, 2010) normatividad utilizada para establecer lineamientos necesarios para el correcto desarrollo de la investigación como el tiempo de duración de la toma de muestras (2 meses).

Tabla 1. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio

Contaminante	Nivel Máximo Permissible ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Tiempo de Exposición
PST	100	Anual
	300	24 horas
PM <sub>10</sub>	50	Anual
	75	24 horas

*Nota:* Resolución 610 de 2010 y 2254 del 2017, son aplicables al proyecto. Adaptado de “Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible” Resolución 610 de 2010 y 2254 del 2017, por Tejeiro, Buitrago, 2018.

Tabla 2. Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia

Contaminante	Tiempo de Exposición	Estados Excepcionales		
		Prevención ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Alerta ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Emergencia ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
<b>PST</b>	24 horas	375	625	$\geq 875$
<b>PM<sub>10</sub></b>	24 horas	155-254	255-354	$\geq 355$

*Nota:* Resolución 610 de 2010 y 2254 del 2017 son aplicables al proyecto. Adaptado de “Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible” Resolución 610 de 2010 y 2254 del 2017, por Tejeiro, Buitrago, 2018.

Tabla 3. Normatividad calidad de aire aplicada en Colombia

Constitución política de Colombia	
<b>Artículo 79</b>	Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.
Calidad del aire y niveles permisibles	
<b>Resolución 610 de 2010</b>	Por la cual se establecen los niveles máximos permisibles a condiciones de referencia, derogada por la resolución 2254 del 2017.
<b>Resolución 650 de 2010.</b>	Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire”
<b>Resolución 2154 de 2010</b>	Por la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones
<b>Resolución 2254 de 2017</b>	Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones

*Nota:* Descripción de la normatividad jurídica en calidad del aire. Adaptado de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

## **7. Metodología**

### **7.1. I Parte. Obtención de la información**

#### **7.1.1. Recolección de la información cartográfica.**

Se llevó a cabo una identificación de las fuentes de emisión fijas y móviles situadas a 400 m alrededor de la entrada principal de la Universidad Santo Tomás sede Loma Linda, ubicada en las coordenadas latitud: 4°06'31.7"N, longitud: 73°39'18.4"W, con el fin de representar un panorama general de la contaminación por material particulado. Para su identificación, se realizó un plano en ArcGIS de la zona de interés, mediante el conocimiento propio del área de estudio y la recolección de información cartográfica sobre los principales focos de emisión, por medio de la observación de una imagen obtenida desde Google Earth Pro (Figura 9).

#### **7.1.2. Levantamiento de datos.**

La toma de datos se realizó en la entrada principal de la Universidad Santo Tomás Sede Loma Linda, en las coordenadas latitud: 4°06'31.7"N y longitud: 73°39'18.4"W, donde se ubicó el equipo muestreador Hi-Vol y permitió obtener las concentraciones de material particulado PST y PM<sub>10</sub> en ug/ m<sup>3</sup>, situado a 113 m la estación meteorológica Catumare perteneciente a Cormacarena, que hace parte integral de la estación de monitoreo del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) de Villavicencio/Meta ubicada en las coordenadas latitud: 4°06'29.5"N y longitud: 73°39'21.6"W, que proporcionó los datos meteorológicos (dirección y velocidad del viento (m/s), temperatura (°C) y precipitación (mm)), en simultaneo con la recolección del material particulado.

### ***7.1.2.1. Método de muestreo para la recolección de PST y PM<sub>10</sub>.***

Para determinar la concentración de las aeropartículas (PST y PM<sub>10</sub>) se siguió el método de referencia utilizando el equipo de muestreo de alto volumen Hi-Vol., el cual consta principalmente de un motor o bomba de succión, un filtro, un portafiltros, un registrador del flujo, un programador de tiempo de muestreo y una estructura de aluminio que funciona como protección general de las partes (Minambiente, 2008), adicionando un cabezote para la recolección de PM<sub>10</sub> que consta de 9 boquillas de aceleración para incrementar la velocidad del aire entrante y enviar las partículas contra una placa de colisión en una zona de fraccionamiento, donde son separadas las partículas más grandes y alojadas en la cuña de almacenamiento, para posteriormente ser transportados por unos tubos de venteo hacia una pantalla contra insectos, con la finalidad de pasar a través del filtro.

La medición de PST y PM<sub>10</sub> se toma de forma individual con un muestreador que arrastra aire ambiente a una velocidad de flujo constante hacia un cabezote de forma especial, donde el material particulado se separa por inercia en uno o más fracciones dentro del intervalo de tamaño de PM<sub>10</sub> y PST (Minambiente, 2008). Cada partícula dentro del intervalo de tamaño de PST y PM<sub>10</sub>, se recolectan en un filtro distinto, utilizando un filtro de fibra de vidrio para PST y filtros de microfibra de cuarzo para las PM<sub>10</sub> (Balcarce, 2009).

### ***7.1.2.2. Calibración del equipo Hi-Vol.***

La calibración del equipo para PM<sub>10</sub> y PST se fundamentó en la posición del dispositivo de control de flujo, que permitió una aspiración de aire en el rango de 1.02 a 1.24 m<sup>3</sup>/min para PM<sub>10</sub> y para PST de 1.1 a 1.7 m<sup>3</sup>/min, a condiciones estándar (Minambiente, Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire., 2008). La calibración se realizó con la ayuda de un kit de calibración (Figura 2), el cual es un sistema de resistencia de flujo variable que consiste en un tubo metálico con un par de discos de orificios críticos que permiten obtener varias aberturas al girar uno de los discos (Minambiente, 2008).

Para comenzar, se registró en el formato de calibración de Excel, el lugar de calibración, la fecha, el responsable de la calibración y la identificación de los equipos. Después se registró la temperatura en grados °K, °F y °C; continuando con la presión barométrica (mm Hg) y la elevación (msnm).



Figura 2. Kit de calibración, por: Tish ambiental, 2015

Antes de proceder con los datos, se instaló el kit de calibración y se verificó que no se presentaran fugas, revisando el correcto ajuste de cada una de las partes del kit y la presencia de succión al generar un vacío en el momento de cubrir con un objeto plástico los orificios de entrada del aire (Figura 3), después se tomó el manómetro para confirmar que la columna de agua sea cero y se procedió a conectarlo por medio de un conducto negro a la toma de presión del orificio de calibración ubicando las medidas 4, 7 y 10 (mm), tomando la caída de presión en pulgadas de agua y registrándolo en la columna Sampler H<sub>2</sub>O (Tabla 4). Del mismo modo, se conectó el conducto transparente al manómetro y al orificio de medición del equipo, incorporando los datos arrojados en la columna Orifice H<sub>2</sub>O que es la presión en el calibrador y es necesaria para hallar la presión de estancamiento (Pf).



Figura 3. Instalación del kit de Calibración en el equipo, por: Tejeiro, Buitrago, 2018

Tabla 4. Calibración del Hi - Vol alto volumen

Sitio		Calibración Orifice							
<b>Ubicación:</b>	Universidad Santo Tomas sede Loma Linda	<b>Marca:</b>	TISCH						
<b>Dia:</b>	15/05/2018	<b>Modelo:</b>	TE-6070V						
<b>Técnico:</b>	Buitrago Angie, Tejeiro Miguel	<b>Serial:</b>	1024						
<b>Muestreador:</b>	PM10V_01	<b>Pendiente Act (m):</b>	1.03794						
<b>Serial #:</b>	P8838 PM10	<b>Intercepto Act (b):</b>	0.00410						
<b>Temp (degF):</b>	77.0	<b>Elevation (mt):</b>	446						
<b>Ta (deg K):</b>	298	<b>SL Press (in Hg):</b>	29.92						
<b>Ta (deg C):</b>	25	<b>Pa (mm Hg):</b>	760						
Número	Orifice H <sub>2</sub> O	Qa (m <sup>3</sup> /min)	X(Qa/(Ta) <sup>1/2</sup> )	Sampler H <sub>2</sub> O	Pf (mmHg)	Y (Po/Pa)	Qr (m <sup>3</sup> /min)	% Diff	
1	1.900	0.828	0.048	20.800	38.819	0.949	1.133	0.37	
2	2.150	0.881	0.051	13.800	25.755	0.966	1.168	0.33	
3	2.400	0.931	0.054	7.900	14.744	0.981	1.188	0.28	
				m =	5.3101757				
				b =	0.6946221				
				r =	0.9994762				

*Nota:* Datos incorporados en la tabla de Excel de calibración adquiridos por Blamis Dotaciones Laboratorio para calibrar el equipo Hi-Vol., 2017.

Por consiguiente, después de obtener los datos de presión utilizando el manómetro se registraron en el formato de calibración en Excel otorgado por Blamis dotaciones laboratorio (Tabla 4), para calcular las siguientes ecuaciones; comenzando con determinar el caudal real del calibrador (Qa) mediante la expresión:

$$Qa = \frac{1}{m * \sqrt{(\Delta H (\frac{Ta}{Pa})) - b}}$$

*Ecuación 1.* Caudal actual o real (m<sup>3</sup> /min)

Dónde:

$\Delta H$  = Presión en el calibrador (pulg de H<sub>2</sub>O) (Orificio H<sub>2</sub>O)

M = Pendiente

B = Intercepto

Ta = Temperatura ambiente (°K)

Pa = Presión atmosférica ambiente (mm Hg)

Además, se halló Pf (mm Hg) mediante la ecuación 2.

$$Pf = 25,4 * \frac{(\Delta H \text{ Pulg H2O inicial} + \Delta H \text{ Pulg H2O final})}{(2 * 13,61)}$$

*Ecuación 2.* Presión de estancamiento (mm Hg)

Dónde:

$\Delta H$  Pulg H<sub>2</sub>O = Presión indicada por el manómetro

Pf = Presión de estancamiento (mm Hg)

Después se procede a determinar la relación entre la presión de radio (Po) y la presión atmosférica del sitio (Pa) y se calcula por la ecuación 3.

$$\frac{Po}{Pa} = \frac{1 - Pf}{Pbarom}$$

*Ecuación 3.* Relación de presiones según la temperatura ambiente

Dónde:

Pf = Presión de estancamiento (mm Hg)

Pa = Presión atmosférica (mm Hg)

Po = Presión de radio (mm Hg)

Po/Pa = Relación de presiones según la temperatura ambiente

Finalizando, se procede a calcular la diferencia porcentual entre los caudales Qr y Qa, usando la ecuación 4. Este % de diferencia debe dar valores inferiores a  $\pm 4\%$ .

$$\% \text{ dif} = ((Qr - Qa)/Qa) * 100$$

*Ecuación 4.* Diferencia porcentual (%)

Dónde

Qa = Caudal actual o real (m<sup>3</sup> /min)

Qr = Caudal de aire (m<sup>3</sup> /min)

Finalizando con la calibración del equipo se determinó la pendiente (m), siendo la sumatoria de X que es igual al caudal actual o real en m<sup>3</sup> /min (Qa) sobre la temperatura en °K elevado a la 1/2 como aparece en la Tabla 4. Continuando con el eje de intersección (b) obtenida con la función intersección eje y la sumatoria de las columnas de caudal de aire (Qr) y X. Terminando con el coeficiente de correlación (r) por medio de la sumatoria de Qr y Po/Pa cuyo resultado debe ser 1 o aproximarse a 1 para que la calibración este correcta, representada en la figura 4.

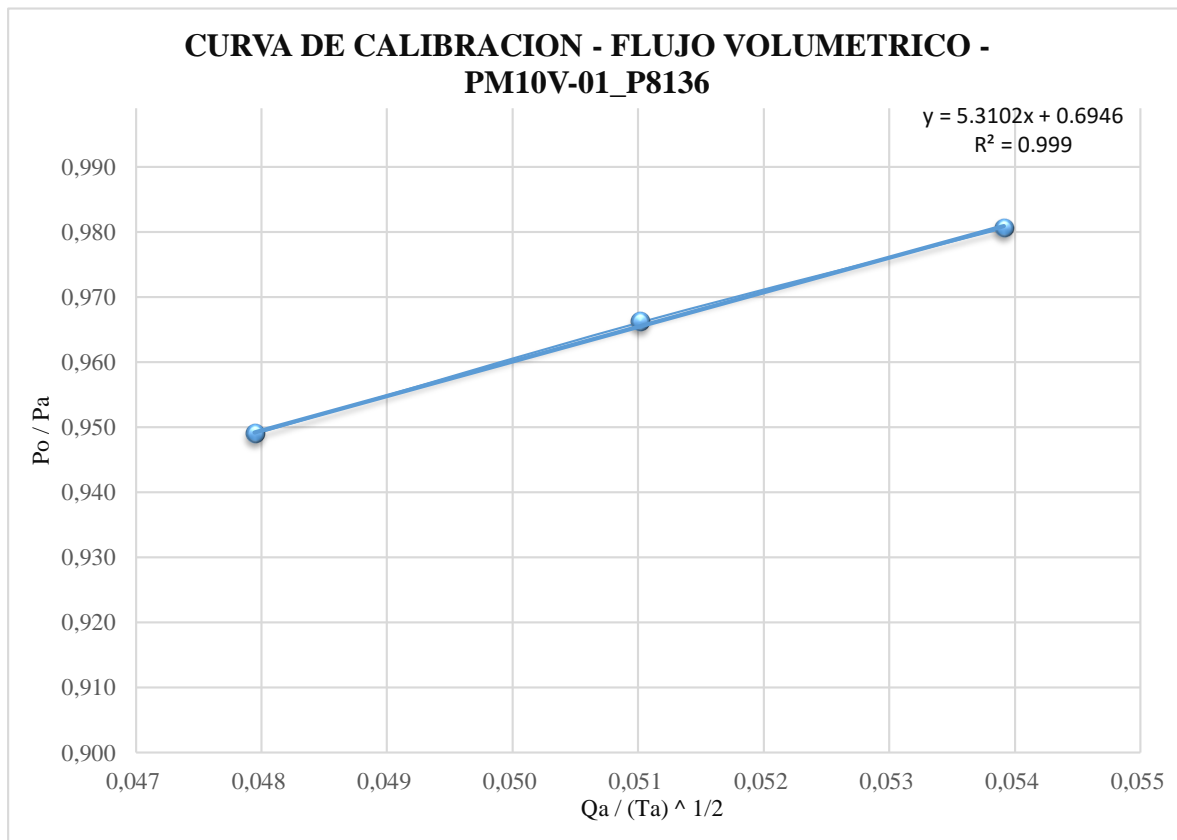


Figura 4. Curva de calibración - flujo volumétrico - PM<sub>10</sub> y PST, por Buitrago, Tejeiro 2018

### 7.1.2.3. Procedimiento de muestreo de las partículas suspendidas totales (PST).

En el procedimiento para recolectar la muestra de PST se utilizó el equipo Hi –Vol y un cabezote triangular distinto al de PM<sub>10</sub> (Figura 5), para su muestreo se ejecutaron los siguientes pasos:

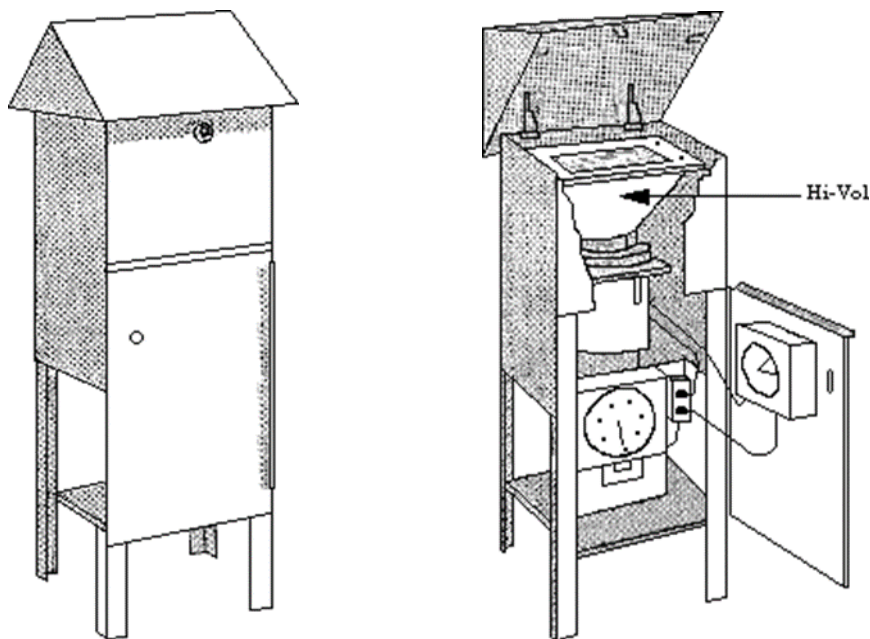


Figura 5. Equipo Muestreador de Alto Volumen. Por: Redaire, 2018

Se procedió a registrar en la tabla de Excel, el número y punto del muestreador, los datos de pendiente (m) e intercepto (b) tomados en la calibración del equipo, las condiciones estándar de presión barométrica (P<sub>barom</sub>) y temperatura ambiente (T<sub>amb</sub>). Por consiguiente, se tomó el número y el día de la semana que se realiza el muestreo (Anexo 1) (Redaire, 2018).

Continuando, con el registro e instalación del filtro numerado y pesado previamente con la superficie rugosa hacia arriba y posteriormente colocado con una pinza, evitando así tocarlo con las manos. Luego se ajustó el portafiltros apretando firmemente los tornillos de sujeción con el propósito de evitar escapes de aire, programando el timer para un período de 24 horas (período tomado como referencia según las normas establecidas para calidad del aire). Antes de finalizar se anotó la fecha y lectura inicial en horas del registrador de tiempo y del tiempo acumulado inicial en horas de funcionamiento del Hi – Vol (Anexo 1) (Redaire, 2018).

Para finalizar se prendió el equipo, accionando manualmente el timer (colocarlo en "ON") y esperando 2 minutos a que se estabilice para registrar la lectura de presión inicial ( $\Delta H$  Pulg H<sub>2</sub>O) conectando el manómetro al orificio de medición del equipo. Una vez terminado el tiempo programado de muestreo se realizó el cambio del filtro para la siguiente captación de PST (Redaire, 2018).

#### **7.1.2.4. Cambio de filtro.**

Al llegar al sitio de muestreo para hacer el cambio de filtro, el equipo estaba apagado y se debió realizar lectura final del contador de tiempo anotando fecha y hora final del muestreo, esto para verificar que el equipo funcionó el tiempo programado, seguido de prender el equipo y esperar 2 minutos a que se estabilice para registrar la presión final ( $\Delta H$  Pulg H<sub>2</sub>O) conectando el manómetro al orificio de medición del equipo.

Posteriormente se abría o apartaba la cabeza del equipo retirando el filtro usado y doblarlo en 2 partes con la superficie impactada hacia adentro, de manera que no se tocara esta área y se identifique fácilmente el número del filtro. El filtro fue guardado en un sobre para su traslado al laboratorio, finalmente se continuaba el proceso de muestreo de material particulado a partir de la limpieza del equipo (Redaire, 2018).

Al proceder con el cambio de filtro, se debió realizar lectura final del contador de tiempo anotando fecha y hora final del muestreo, esto para verificar que el equipo funcionó el tiempo programado, seguido de poner en funcionamiento el equipo y esperar 2 minutos a que se estabilice para registrar la presión final ( $\Delta H$  Pulg H<sub>2</sub>O) conectando el manómetro al orificio de medición del equipo.

Posteriormente se abría o apartaba la cabeza del equipo para retirar el filtro usado y doblarlo en 2 partes con la superficie impactada hacia adentro, de manera que no se tocara esta área y se identifique fácilmente el número del filtro guardado en un sobre manila para su traslado al laboratorio, finalmente se continuaba el proceso de muestreo de material particulado a partir de la limpieza del equipo (Redaire, 2018).

#### **7.1.2.5. Manejo y transporte de muestras.**

En el transporte de muestras, fue importante tomar precauciones para eliminar la posibilidad de destrucción accidental y/o acción física y química sobre la muestra. Situaciones que podía afectar

la integridad de las muestras como temperaturas extremas, precipitación, vientos fuertes y el manejo físico de muestras por personas ajenas al proyecto que carecen de las nociones de cuidado que se le debe dar (Minambiente, 2010), consideraciones prácticas que fueron tomadas en cuenta al guardar los filtros dentro de sobres de manila y bolsas Simplot, procurando la menor alteración posible y el transporte de las muestras al laboratorio en menos de 24 horas.

#### ***7.1.2.6. Pesaje de los filtros.***

Los filtros se pesaron en una balanza que tiene una exactitud de 6 unidades. Estos pesos se registraron en la tabla datos y resultados del estudio de PST y PM<sub>10</sub> (Anexo 1). Para el pesaje de los filtros en la balanza digital se inició tarando el equipo y procediendo a colocar el filtro con ayuda de unos guantes y pinzas, verificando que el filtro este bien situado para que no altere su peso al entrar en contacto con las paredes de la balanza. Por consiguiente, antes de registrar el peso se esperó 1 minuto para que se estabilice el equipo, finalizando con el retiro del filtro utilizando nuevamente las pinzas para no contaminarlo y posteriormente fueron almacenados dentro de sobres de manila (Clemente Elio, 2018).

#### **7.1.3. Determinación de la concentración de partículas suspendidas totales (PST).**

La concentración de partículas suspendidas totales se determinó mediante la relación de la masa de partículas colectada y el volumen de aire que fue succionado por el equipo durante el tiempo de muestreo de 24 horas. Las unidades utilizadas para presentar los datos de concentración de partículas suspendidas son  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ya que permite hacer una comparación directa con los valores límites establecidos en las normas de calidad de aire colombianas a condiciones estándar (Redaire, 2018).

Para determinar la concentración de PST, se realizaron cálculos en la tabla datos y resultados del estudio de PST y PM<sub>10</sub> (Anexo 1), donde se inició hallando el tiempo de duración de cada muestreo según la ecuación 5.

$$\text{Horas muestreo} = \text{Tiempo, horas Final} - \text{Tiempo, horas Inicial.}$$

*Ecuación 5. Tiempo de duración de cada muestreo (Horas)*

Luego se registró la temperatura final del muestreo en °C y halló la temperatura promedio mediante la ecuación 6.

$$T_p = +\text{PROMEDIO (Temperatura inicial: Temperatura final)}$$

*Ecuación 6. Temperatura promedio (°C)*

Dónde:

T<sub>p</sub> = temperatura promedio (°C)

Además, se utilizó el Q<sub>a</sub> = caudal actual o real (m<sup>3</sup>/min) obtenido inicialmente en el proceso de calibración con los datos de temperatura (T<sub>a</sub>) y presión ambiente (P<sub>a</sub>), para hallar el Q<sub>std</sub> = caudal estándar (m<sup>3</sup>/min) a condiciones de temperatura y presión estándar mediante la ecuación 7.

$$Q_{std} = Q_a * \frac{P_{barom}}{760 \text{ mmHg}} * \frac{298 \text{ }^\circ\text{K}}{(Temperatura promedio + 273)}$$

*Ecuación 7. Caudal estándar (m<sup>3</sup>/min)*

Dónde:

P<sub>barom</sub> = Presión barométrica

Q<sub>a</sub> = Caudal actual o real (m<sup>3</sup>/min)

Q<sub>std</sub> = Caudal estándar (m<sup>3</sup>/min)

De igual forma se halló el Volumen de muestreo (m<sup>3</sup>) según la ecuación 8:

$$\text{Volumen de muestreo (m}^3\text{)} = (Q_{std} * \text{Horas muestreo}) * 60$$

*Ecuación 8. Volumen de muestro (m<sup>3</sup>)*

Dónde:

Q<sub>std</sub> = Caudal estándar (m<sup>3</sup>/min)

A partir de determinar la velocidad de flujo referencia promedio o caudal estándar se procedió a calcular el volumen total de aire muestreado, como:

$$V = Q_{std} * t$$

*Ecuación 9.* Volumen total de aire muestreado, en unidades de volumen estándar, m<sup>3</sup>

Dónde:

Q<sub>std</sub> = Caudal estándar o velocidad de flujo referencia promedio, m<sup>3</sup>/min

t = Tiempo de muestreo, min.

V = Volumen total de aire muestreado

Finalmente se calculó la concentración de material particulado como:

$$PST = (W_f - W_i) * 10^6 / V$$

*Ecuación 10.* Concentración másica de material particulado suspendido total, µg/m<sup>3</sup>

Dónde:

PST = Concentración de las partículas suspendidas totales, µg/m<sup>3</sup>

W<sub>i</sub> = Peso inicial del filtro limpio, g

W<sub>f</sub> = Peso final del filtro expuesto, g

V = Volumen de aire muestreado, en unidades estándar, m<sup>3</sup>

#### **7.1.4. Procedimiento de muestreo de las partículas suspendidas menores o iguales a 10 micras (PM<sub>10</sub>).**

El procedimiento de muestreo de partículas menores o iguales a 10 micras, se realizó mediante un muestreador de alto volumen adaptado con un cabezote que permitió seleccionar a las partículas por su tamaño (Figura 6) (Minambiente, 2010), El procedimiento es similar al muestreo de partículas suspendidas totales (PST) a excepción del ya mencionado cabezote y tipo de filtro,

puesto que para PST se utilizan filtros de fibra de vidrio y para PM<sub>10</sub> se utilizan filtros de microfibras de cuarzo (Balcarce, 2009).

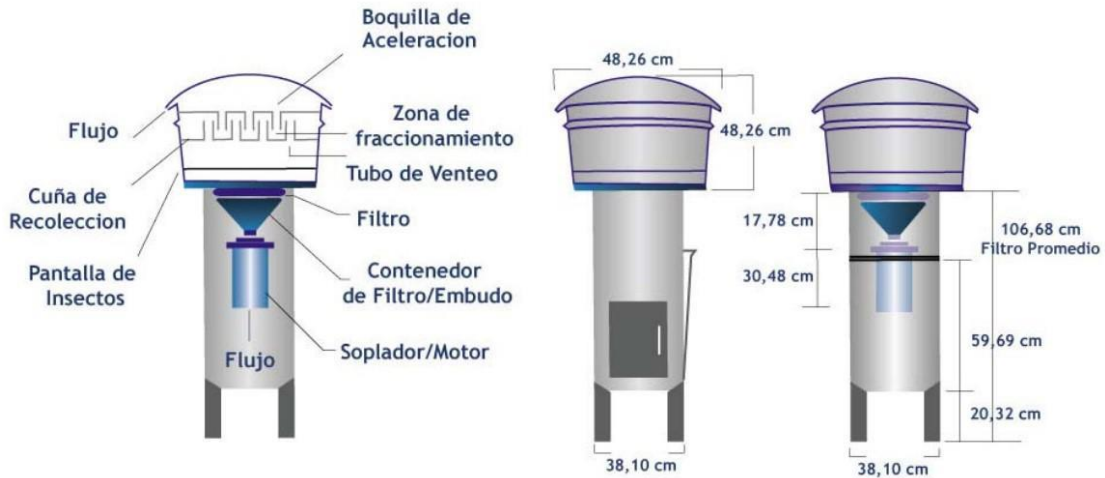


Figura 6. Muestreo de PM<sub>10</sub>, por: Protocolo para la vigilancia y seguimiento del módulo aire del sistema de información ambiental. IDEAM 2008.

#### 7.1.5. Determinación de la concentración de las partículas suspendidas menores a 10 micras (PM<sub>10</sub>).

La concentración de partículas suspendida menores o iguales a 10 micras (PM<sub>10</sub>) se halló de forma similar a la determinación de la concentración de partículas suspendidas totales (PST), a excepción del tipo del filtro, puesto que el filtro de microfibras de cuarzo es usado para capturar las partículas más pequeñas, utilizando un flujo de aire entre 1.1 m<sup>3</sup> /min y 1.24 m<sup>3</sup> /min, sin embargo, el procedimiento matemático fue igual.

#### 7.1.6. Base de datos.

Una vez hecha la medición diaria de PM se registraron los datos en una tabla de Excel (tabla 6); ya que los filtros fueron pesados después de las 24 h de la recolección, complementando la base de datos una vez se solicitó y entregó la información meteorológica arrojada con una resolución

diaria por la estación de monitoreo Catumare perteneciente a Cormacarena que hace parte SVCA de la ciudad.

La base de datos tiene las variables de velocidad y dirección del viento m/s, temperatura °C y precipitación en mm, registradas por año, mes y día, al igual que la concentración de material particulado PST Y PM<sub>10</sub> que están en ug/ m<sup>3</sup>.

## **7.2. II Parte. Procesamiento de la información**

### **7.2.1. Diagrama de correlación.**

La construcción del diagrama constó de cuatro fases:

#### ***7.2.1.1. Recolección de datos***

Para construir el diagrama se precisó recoger en pares los datos de las variables meteorológicas (temperatura (°C), precipitación (mm), velocidad del viento (m/s)) y la concentración del material particulado (PST y PM<sub>10</sub>), obtenidos en la primera fase del proyecto (levantamiento de datos).

#### ***7.2.1.2. Representación de los datos***

Para la representación de los datos se exporto los datos en Excel al programa estadístico SPSS tomando la opción de generador de gráficos y diagrama de dispersión simple (dos variables), introduciendo dos ejes de coordenadas donde se situó en el eje Y los valores de las concentraciones de PST y PM<sub>10</sub> (Variable dependiente) y las condiciones meteorológicas (Variable independiente) (Figura 7) generando los diagramas de correlación con una “nube” de puntos que permitió conocer si existe o no relación entre ambas variables (Tabla 7) (Roldan, 2017).

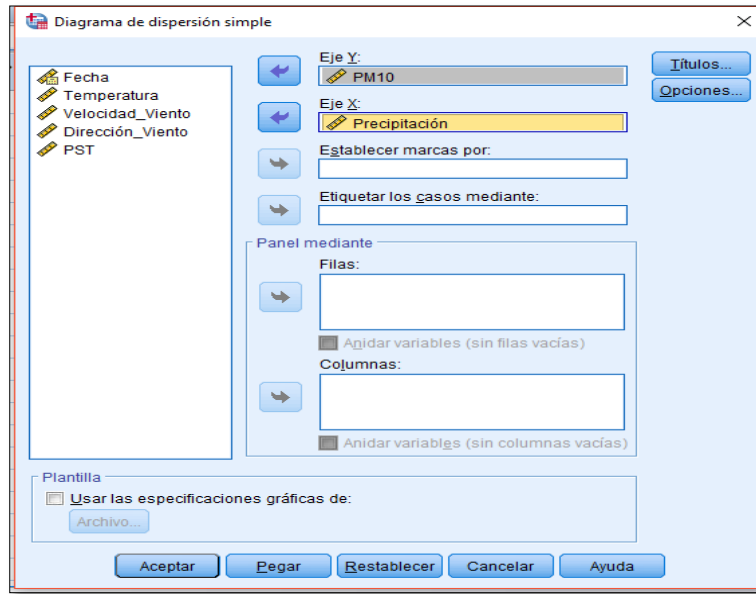


Figura 7. Obtención del diagrama de correlación, por: Buitrago, Tejeiro, 2018.

### 7.2.1.3. Medición de correlación.

Se usó el coeficiente de correlación de Pearson, ya que es un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas. Por ende, para identificar el grado de intensidad de esta posible relación entre las variables, después arrojar en el programa la gráfica de dispersión de las condiciones meteorológicas y las concentraciones de material particulado, se tiene en cuenta la distribución lineal de las variables, observando que la dispersión de los puntos tiene tendencia a formar una recta (Urrego, 2006). Donde se aplica este modelo estadístico (coeficiente de correlación lineal de Pearson ( $r$ )) y es hallado directamente por el programa SPSS (Figura 8).

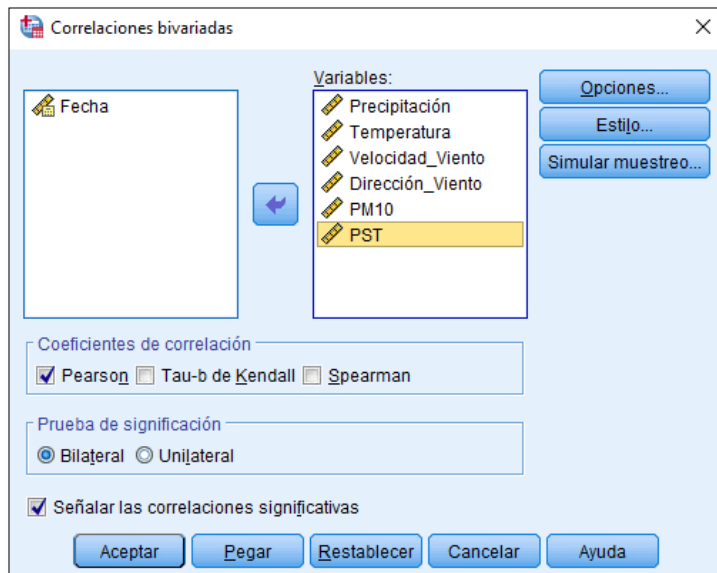


Figura 8. Obtención del coeficiente de correlación en SPSS, por: Buitrago, Tejeiro, 2018.

Después, se generó en el programa estadístico SPSS la recta de regresión que es la línea de tendencia que mejor representa a la nube de puntos y el objeto del análisis de regresión es investigar la relación estadística que existe entre una variable dependiente (Y) y una o más variables independientes (X1, X2, X3...). En este caso cuando solo existe una variable independiente, se reduce a una línea recta y su función es la ecuación 11.

$$y: a + bx$$

Ecuación 11. Recta de regresión

Dónde:

Y = Variable dependiente

A = Ordenada en el origen.

B = Pendiente de la recta de regresión

X = Variable independiente

Por otro lado, se hallaron los p-valores, que aparecen en el programa estadístico SPSS bajo el rótulo de "sig", nos ayuda a comprobar si la hipótesis es correcta o nula, para ello un valor  $p \leq 0,05$  nos lleva a rechazar la hipótesis declarando la influencia es nula y que no hay relación lineal entre la concentración de material particulado y la variable meteorológica (Rodríguez, 2007).

### 7.2.1.3. Interpretación del diagrama

Para la interpretación del diagrama se tuvo en cuenta cómo se distribuye la "nube" de puntos según el grado y tipos de correlación:

**Correlación positiva:** A un crecimiento de X (causa) corresponde un crecimiento de Y (efecto). El coeficiente es positivo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia arriba (Figura 9)

**Correlación nula:** no hay una relación aparente entre las variables (Figura 9).

**Correlación negativa:** A un crecimiento de X se observa una tendencia a disminuir de Y. El coeficiente es negativo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia abajo (Figura 9).

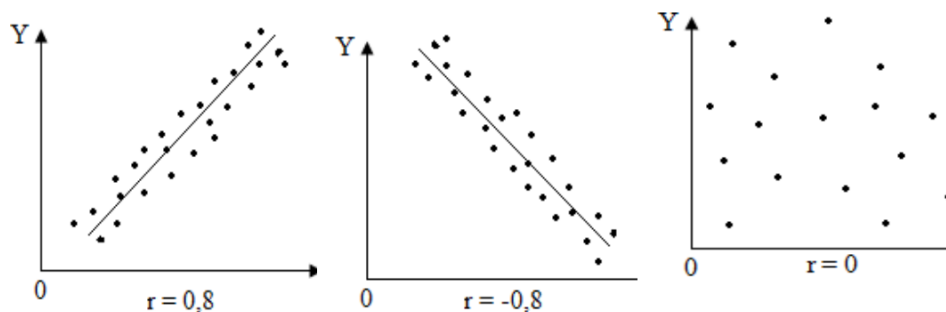


Figura 9. Tipos de correlaciones, por Roldan, 2017

También se analizó cada uno de los coeficientes de correlación donde los valores se encuentran entre los rangos  $-1$  y  $1$ . Cuanto más próximo a  $0$  sea  $r$  menor será la relación entre las variables, y cuanto más próximo a  $1$  mayor será dicha relación (Tabla 5).

Tabla 5. Valores y significados de los coeficientes de correlación

Valores	Significado
<b>-1</b>	Correlación negativa grande y perfecta
<b>-0,9 a -0,99</b>	Correlación negativa muy alta
<b>-0,7 a -0,89</b>	Correlación negativa alta
<b>-0,4 a -0,69</b>	Correlación negativa moderada
<b>-0,2 a -0,39</b>	Correlación negativa baja
<b>-0,01 a -0,19</b>	Correlación negativa muy baja
<b>0</b>	Correlación nula
<b>0,01 a 0,19</b>	Correlación positiva muy baja
<b>0,2 a 0,39</b>	Correlación positiva baja
<b>0,4 a 0,69</b>	Correlación positiva moderada
<b>0,7 a 0,89</b>	Correlación positiva alta
<b>0,9 a 0,99</b>	Correlación positiva muy alta
<b>1</b>	Correlación positiva grande y perfecta

*Nota:* Valores para el grado de influencia de las variables. Adaptado de Mario Suárez, 2015.

Se procede a interpretar la línea de tendencia por medio de la recta de regresión se observó cómo se distribuyó la “nube” de puntos, teniendo en cuenta la cercanía de los puntos a la línea ya que esto también indica si existe o no una relación entre las variables (Minitab, 2017).

### 7.3. Parte III. Dirección de los vientos y contaminantes

#### 7.3.1. Software libre R y su paquete Openair.

Haciendo uso de la base de datos obtenidos se dio paso a su procesamiento, utilizando el lenguaje y entorno de programación R, el cual es un software libre diseñado especialmente para análisis gráfico y estadístico. La cantidad de datos analizados requirieron el desarrollo de códigos en este lenguaje que permitieron automatizar varias rutinas de cálculo (Anexo 2) que fueran aplicadas a cada una de las series tomadas, utilizando especialmente el paquete Openair que proporcionó herramientas de código abierto para el análisis de información de calidad del aire (Carslaw, 2015).

El paquete Openair tiene aproximadamente 23 funciones principales. En los estudios realizados con Openair, se producen un importante número de gráficos haciéndose importante seleccionar aquellos que muestran algo particularmente útil o informativo (Garcia, 2013).

Apoyados en el software libre R se definieron herramientas como el resumen estadístico básico, útil para hacer una primera comprobación de los datos importados y disponer de una visión general y rápida del conjunto de datos mediante el comando Summary, asimismo, empleando el paquete Openair se obtuvo la gráfica de calendario que permite en un vistazo rápido, comprobar la evolución de las concentraciones, su estacionalidad, su distribución según los días de la semana mediante el comando calendarPlot y la posible dirección del material particulado (PST y PM<sub>10</sub>) con ayuda de la rosa de contaminantes que permitió relacionar la concentración de los contaminantes con la dirección y velocidad del viento (Follos, 2012), además, se exportó la rosa de los vientos realizada en WRPLOT View-Freeware a Google Earth Pro para conocer hacia qué zonas de Villavicencio/meta se dirigen los vientos desde la zona de estudio, específicamente desde la estación de monitoreo Catumare.

### **7.3.2. Rosa de los vientos**

La rosa de los vientos se llevó a cabo en el programa WRPLOT View v.8.0.2., donde se importan los datos que se encuentra en un archivo tipo .xls (Excel 97-2003) y cuenta con las columnas de Año, Mes, Día, Velocidad y Dirección del Viento.

Al abrir, el WRPLOT se cargaron los datos en la hoja de cálculo, permitiendo introducir los nombres de las columnas en las que aparece el dato solicitado, se llenó la ficha de Station Information y el ID de la estación para posteriormente proporcionar las coordenadas de latitud y longitud, creando un archivo sam que fue agregado en la pantalla principal del programa, visualizando finalmente la rosa de vientos y permitiendo exportarla al lugar exacto de la toma de datos en Google Earth Pro, mostrando de donde vienen y hacia dónde se dirigen los vientos en la ciudad, a partir de la estación de monitoreo de calidad del aire situada en el área de estudio (CUC, 2016).

## **8. Resultados**

### **8.1. Fase I. Obtención de la información**

#### **8.1.1. Recolección de información cartográfica.**

En la figura 10, se pueden observar tanto las fuentes de emisión fijas destacando el molino de arroz Roa y la maderera El Vergel, como las fuentes de emisión móviles situadas alrededor del punto de muestreo, sobresaliendo la vía Acacias-Villavicencio, además se muestra la estación de monitoreo de calidad del aire Catumare, que es parte integral de la estación de monitoreo del SVCA de la ciudad.

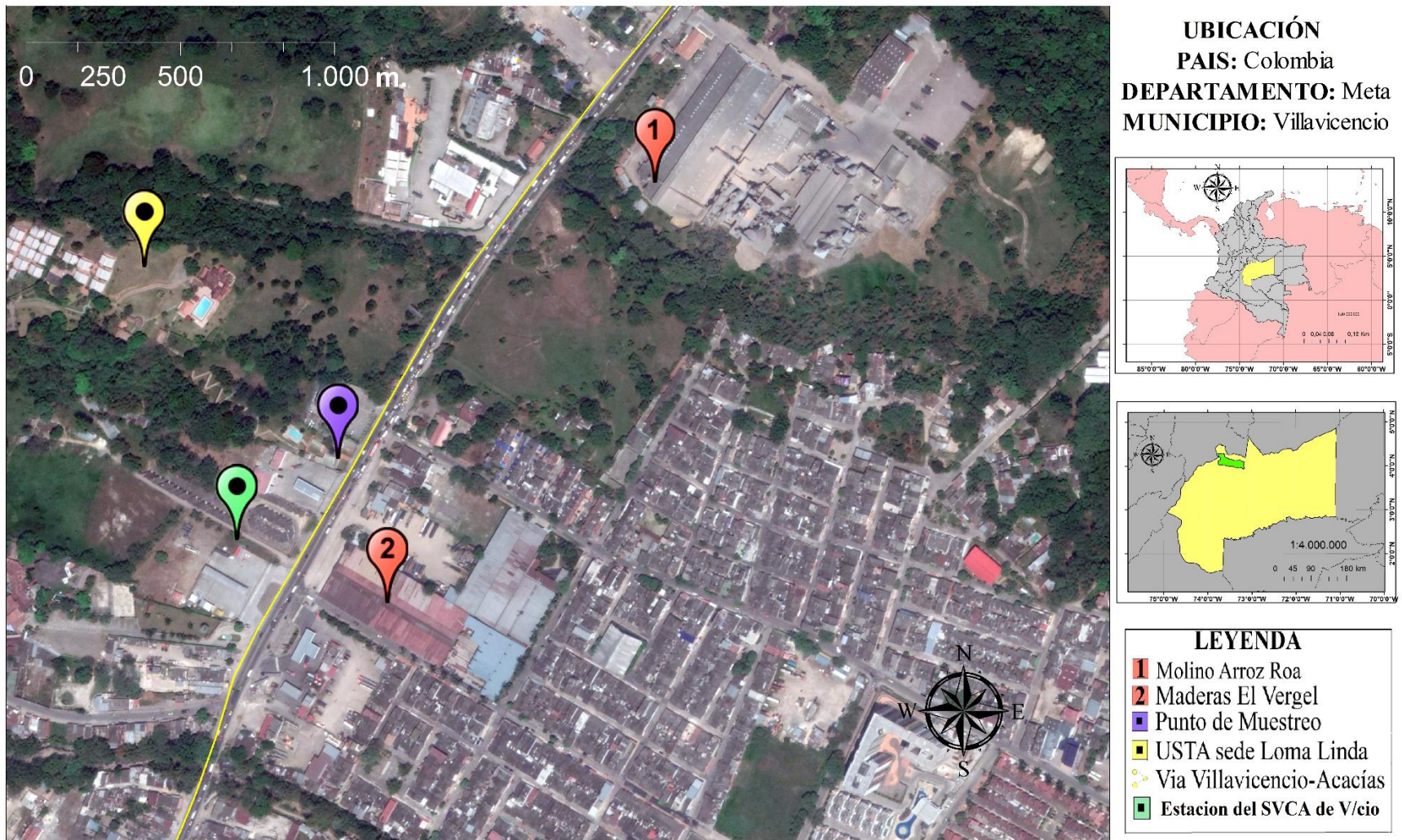


Figura 10. Fuentes de emisiones fijas y Móviles en inmediaciones de la Universidad Santo Tomas de Aquino. Por, Buitrago, Tejero, 2018, a partir del software ArcGis 10.3, bajo la licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

### 8.1.2. Base de datos.

La base de datos en Excel presenta las concentraciones del material particulado (PM<sub>10</sub> y PST) obtenidos de los procesos de captación y pesaje de los mismos, de manera diferenciada debido a que el equipo muestreador Hi-Vol capta un solo contaminante a la vez entre PM<sub>10</sub> y PST, pues necesita de una configuración distinta, como lo es el cabezote (triangular para PST y media esfera para PM<sub>10</sub>), tipo filtro (vidrio para PST y microfibras de cuarzo para PM<sub>10</sub>) y velocidad de succión adecuados (entre 1.02 a 1.24 m<sup>3</sup>/min para PM<sub>10</sub> y para PST de 1.1 a 1.7 m<sup>3</sup>/min), además de los datos meteorológicos (temperatura (°C), precipitación (mm), dirección y velocidad del viento (m/s)), registrados por la estación de monitoreo del SVCA ubicada en las instalaciones de la dispensadora de combustible Montealegre-Distracom, destacando precipitaciones máximas diarias de 35.50 mm y mínimas de 0 mm, acumulando 387.30 mm durante el periodo de captación comprendido entre el 16 de mayo y el 14 de julio del 2018, representando un periodo de precipitaciones máximas.

También se obtuvieron temperaturas diarias entre los 26.20°C y 22.10°C, promediando 23.90 °C durante los dos meses muestreados, con vientos entre 0,51 m/s y 1.8 m/s, promediando 0,88 m/s o 3.16 km/h (Tabla 6). Con respecto a los resultados estadísticos de PM<sub>10</sub> se obtuvo un promedio de las concentraciones de 29,87 ug/m<sup>3</sup> con un valor máximo registrado de 47,58 ug/m<sup>3</sup> y un mínimo de 16,64 ug/m<sup>3</sup> continuando con una desviación estándar de 8,4 ug/m<sup>3</sup>. Por consiguiente, con respecto a PST se obtuvo un promedio de concentraciones de 35,87 ug/m<sup>3</sup>, con un valor registrado máximo de 71,02 ug/m<sup>3</sup> y un valor mínimo de 4,15 ug/m<sup>3</sup> finalizando con una desviación estándar de 16,01 ug/m<sup>3</sup> (Tabla 7).

Tabla 6. Resultados estadísticos de PM<sub>10</sub> y PST

Resultados Estadísticos PM <sub>10</sub>		Resultados Estadísticos PST	
Numero de Datos (n)	24	Numero de Datos (n)	30
Promedio (X)	29,87	Promedio (X)	35,87
Valor máximo registrado (ug/ m <sup>3</sup> )	47,58	Valor máximo registrado (ug/m <sup>3</sup> )	71,02
Valor mínimo registrado (ug/m <sup>3</sup> )	16,64	Valor mínimo registrado (ug/m <sup>3</sup> )	4,15
Desviación estándar (s)	8,42	Desviación estándar (s)	16,01

Nota: Resultados estadísticos adquiridos por Excel. Adaptado por Buitrago, Tejeiro, 2018

Tabla 7. Datos condiciones meteorológicas y de las concentraciones de PST y PM<sub>10</sub> y sus resultados estadísticos

FECHA	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	DIRECCIÓN DEL VIENTO	PM <sub>10</sub> (ug/m <sup>3</sup> )	PST (ug/m <sup>3</sup> )
16/05/18	0,1	23,5	1,02	205	39,62	
17/05/18	0,4	24,7	0,97	206	37,38	
18/05/18	7,1	26,2	0,84	223	37,21	
19/05/18	2,7	23,9	0,64	166	32,29	
20/05/18	2,3	24,8	1,18	192	33,59	
21/05/18	17,5	25,5	1,8	141	30,57	
22/05/18	3,5	24,4	0,69	140	33,83	
23/05/18	35,5	25,7	0,78	119	34,16	
24/05/18	24,6	24	0,66	218	24,09	
25/05/18	6,7	23,1	0,95	162	23,73	
26/05/18	2,6	24,5	1,09	185	17,25	
27/05/18	3	24,7	1,01	188	16,65	
28/05/18	9,7	24,3	0,78	168	20,84	
29/05/18	1	22,9	1,18	161	27,05	
30/05/18	2,3	24,1	1,62	177	32,31	
31/05/18	1,3	25,5	0,8	136		48,59
1/06/18	14,6	25,4	0,8	233		47,56
2/06/18	4,6	22,9	0,93	176		30,16
3/06/18	1,1	24,4	1	172		21,57
4/06/18	25,2	25,1	0,61	155		4,16
5/06/18	2,6	23	0,88	166		12,75
6/06/18	0,3	23,6	0,78	230		23,65
7/06/18	1,7	23,6	0,75	194		34,11
8/06/18	6,6	23,2	0,8	182		47,24
9/06/18	0,9	23,9	0,76	160		44,92
10/06/18	6,4	23,7	0,64	160		49,6
11/06/18	3,7	25,1	0,97	196		52,01
12/06/18	0,4	23,2	1,02	188		28,67
13/06/18	9	24,9	0,51	217		23,07
14/06/18	15	23	0,67	158		20,67
15/06/18	14,6	24,1	0,89	172	22,75	
16/06/18	0,9	23,4	0,93	200	22,8	
17/06/18	0,7	23,7	1,09	225	18,8	
18/06/18	0,1	22,3	0,84	162	30,06	
19/06/18	0,3	22,1	0,74	182	36,15	
20/06/18	1,1	23,2	0,62	163	47,58	
21/06/18	1,3	24,3	0,61	219	45,11	
22/06/18	1,5	24	0,8	213	31,34	
23/06/18	32,7	24,1	0,76	185	21,94	
30/06/18	7,4	24	0,7	216		71,02
1/07/18	0	22,3	0,74	189		62,61
2/07/18	35,2	23,8	1	188		41,61
3/07/18	32,7	23,9	0,83	199		16,52
4/07/18	2,5	22,7	0,94	176		29,92
5/07/18	0,3	23,9	0,96	192		38,97
6/07/18	2,8	24,3	1,22	201		25,68
7/07/18	3,6	24,8	0,86	218		18,28
8/07/18	6,9	22,5	0,87	212		12,33
9/07/18	0,2	24,9	0,83	216		50,14
10/07/18	3,8	24,1	0,73	184		53,01
11/07/18	0,1	22,9	0,81	197		40,57
12/07/18	2,1	23,3	0,72	174		49,33
13/07/18	12,6	22,9	0,91	208		41,68
14/07/18	11,5	22,2	0,96	187		35,73
<b>Acumulado</b>	<b>387,3</b>					
<b>Promedio</b>	<b>7,17</b>	<b>23,9</b>	<b>0,88</b>			
<b>Mínima</b>	<b>0</b>	<b>22,1</b>	<b>0,51</b>			
<b>Máxima</b>	<b>35,5</b>	<b>26,2</b>	<b>1,8</b>			

Nota: Base de datos obtenidos durante el tiempo transcurrido entre el 16 de mayo y el 14 de julio del 2018.  
Adaptado por Buitrago, Tejeiro, 2018

### 8.1.3. Diagramas de correlación.

En la tabla 8, se ve representado el coeficiente de Pearson y el p- valor obtenidos por el programa estadístico SPSS de las condiciones meteorológicas y las concentraciones de PST y PM<sub>10</sub>; donde se presenta  $p > 0,05$  indicando que se cumple la hipótesis, aunque con los datos de correlación la influencia de las variables no es significativa. Si  $p \leq 0,05$  nos llevaría a rechazar la hipótesis declarando la influencia es nula y no se utilizaría (Rodríguez, 2007).

Tabla 8. Coeficiente de correlación de las variable PST y PM<sub>10</sub> y las condiciones meteorológicas.

		Velocidad del Viento	Temperatura	Precipitación
<b>PM<sub>10</sub></b>	Correlación de Pearson	-,201	,021	-,213
	Sig. (bilateral)	,346	,922	,318
<b>PST</b>	Correlación de Pearson	-,117	,041	-,257
	Sig. (bilateral)	,539	,831	,170

*Nota:* Coeficiente de correlación de las concentraciones de material particulado (PM<sub>10</sub> y PST) y las variables meteorológicas. Adaptado por Buitrago, Tejeiro, 2018

En el análisis de los datos de PM<sub>10</sub> y la precipitación representas en la figura 2, se observó que debido a la dispersión de los puntos y el coeficiente  $r = -0.21$  arrojado por el programa SPSS, el grado de influencia de las dos variables es baja, ya que esta entre los rangos -0,2 a -0,39 (Tabla 5), siendo un tipo de correlación negativa, donde se ve representada la inclinación de la recta de regresión estipulando que por cada milímetro (mm) que aumenta la precipitación disminuye 0,1734 ug/m<sup>3</sup> la concentración de PM<sub>10</sub>, siendo esta la variable dependiente.

Resultado semejante al obtenido en un proyecto de investigación realizado en Bogotá donde establecieron la asociación existente entre las variables meteorológicas como la temperatura, velocidad del viento y precipitación con las concentraciones de PM<sub>10</sub>, registradas en la red de calidad del aire de esta ciudad, llegando a la conclusión que no existe relación entre la precipitación y PM<sub>10</sub>, ya que arrojó un tipo de correlación nula dando un coeficiente  $r = -0.007$  (Urrego, 2006).

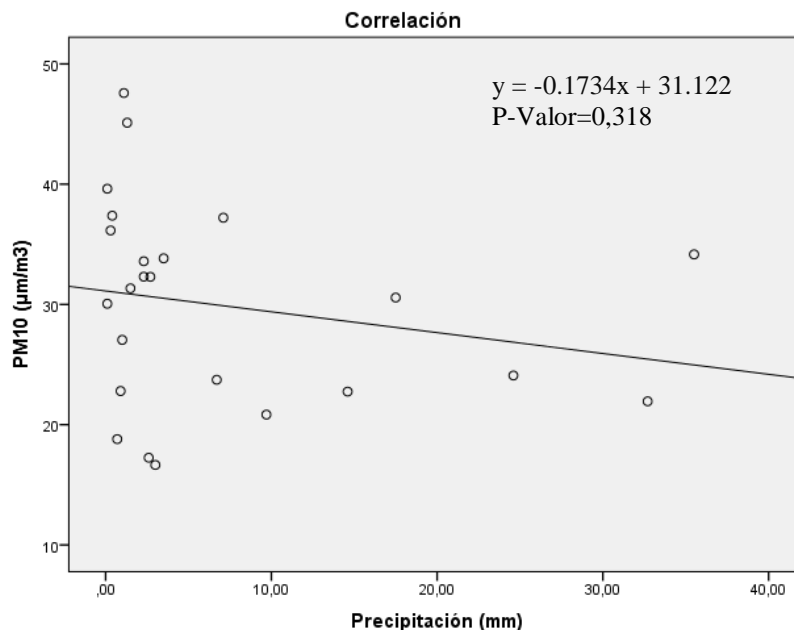


Figura 11. Diagrama de PM<sub>10</sub> y Temperatura, Buitrago, Tejeiro, 2018.

Continuando con la figura 12, donde se ve representada por medio de la nube de puntos el comportamiento de la concentración de PM<sub>10</sub> frente a la Temperatura y el coeficiente  $r = 0.02$ , determina que la correlación de estas dos variables es positiva muy baja, ya que se encuentra en el rango 0.001 a 0.19, es decir, que al ser un tipo de correlación positiva a medida de que cada grado centígrado (°C) que aumenta la temperatura incrementa un  $0.1809 \text{ ug/m}^3$  la concentración de PM<sub>10</sub>, sin embargo la poca inclinación de la línea de tendencia y lo dispersos que están los puntos alrededor de la recta de regresión demuestra la escasa relación entre las variables.

Un estudio realizado en Bogotá y ya mencionado anteriormente llegó a la conclusión que no hay relación entre las variables de Temperatura y PM<sub>10</sub> (Urrego, 2006). Por otro lado, una investigación realizada en una ciudad tropical andina y por un grupo de trabajo académico de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, evidenció que la temperatura presentaba un tipo de correlación positiva de  $r = 0.40$  refiriéndose a que un crecimiento de T corresponde a un crecimiento del contaminante; relacionando este comportamiento con la actividad fotoquímica potenciada en días con alta intensidad solar (Carlos, Duque, & Araujo, 2015). Sin embargo, el grado de relación entre las dos variables es moderada según la tabla 5.

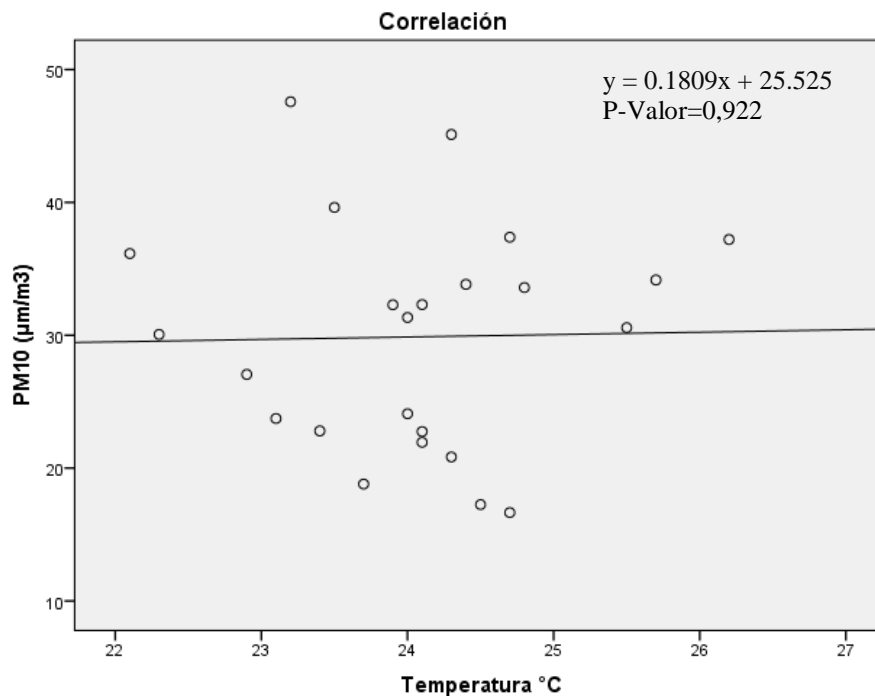


Figura 12. Diagrama de PM<sub>10</sub> y Temperatura, Buitrago, Tejeiro, 2018.

De acuerdo con la figura 13, y el dato arrojado  $r = -0.20$ , se determina que es una correlación negativa baja. Este estudio demuestra la poca relación de las variables meteorológicas en la zona de interés con PM<sub>10</sub>, ya que entre más cercano a 1 es más la relación que se tiene y ninguna de las tres condiciones meteorológicas tomadas para la investigación se aproximó. En esta grafica la recta de regresión es decadente, lo que indica que por cada m/s que aumenta la velocidad del viento disminuye un 5.7767  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  la concentración de PM<sub>10</sub>, siendo esta la variable dependiente, debido a que el viento arrastra los contaminantes a lugares más lejanos.

Por otro lado, un estudio realizado por Universidad Nacional Técnica de Atenas determino que las concentraciones más altas de PM<sub>10</sub> que oscilan entre 60 y 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en esta ciudad, correspondían a valores de velocidad del viento menores a 2 m/s, mientras que las concentraciones más bajas correspondieron a los valores del viento de más 2 m/s (Chaloulakoua, Kassomenosb, Spyrellisa, & Demokritouc, 2012).

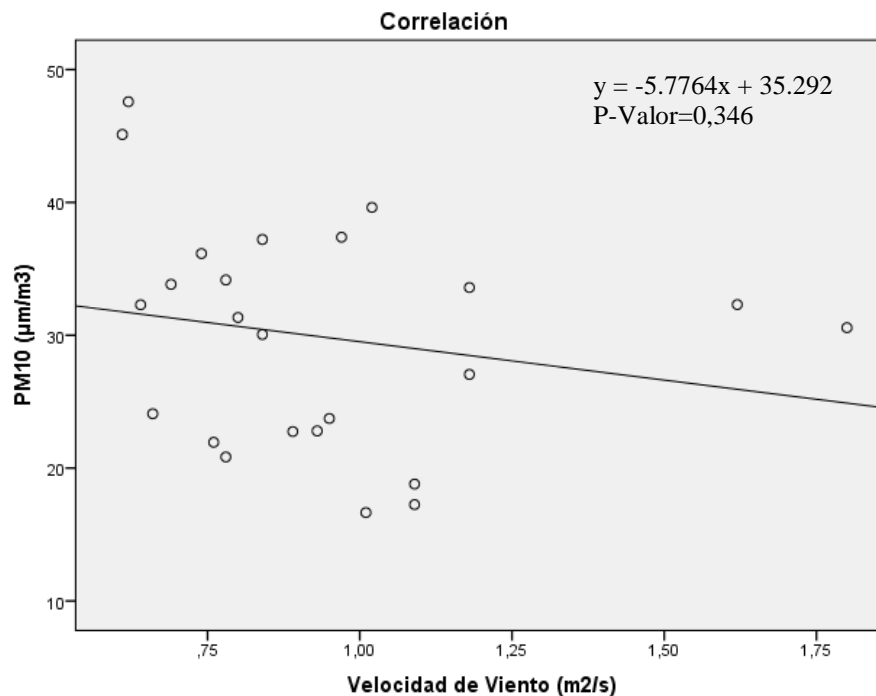


Figura 13. Diagrama de PM<sub>10</sub> y Velocidad del Viento, por Buitrago, Tejeiro, 2018.

Continuando con PST, para la figura 14, el coeficiente de correlación con respecto a la precipitación es de  $r = -0.25$ , siendo esta una correlación negativa baja y poco significativa. También se observa la inclinación decadente de la recta de regresión que por cada milímetro (mm) que aumenta la precipitación disminuye  $11,539 \text{ ug/m}^3$  la concentración de PST, siendo esta la variable dependiente. Influyendo la precipitación según los resultados más en este contaminante que en PM<sub>10</sub>. Esto podría ser debido a que las partículas de mayor tamaño al absorber humedad aumentarían su peso tendiendo asentarse en el suelo.

Si tomamos en cuenta este resultado con un estudio de monitoreo ambiental realizado en los municipios de Caldas: Filadelfia, Neira, Supía, Riosucio y La Dorada. Donde se los eventos de mayor concentración de material particulado y otros contaminantes, se registraron principalmente en semanas con poca lluvia, esto se debe a que las lluvias lavan la contaminación de la atmósfera y la ausencia de lluvias influencia la acumulación de dichos contaminantes (Giraldo, Velasco, & Zuluaga, 2017).

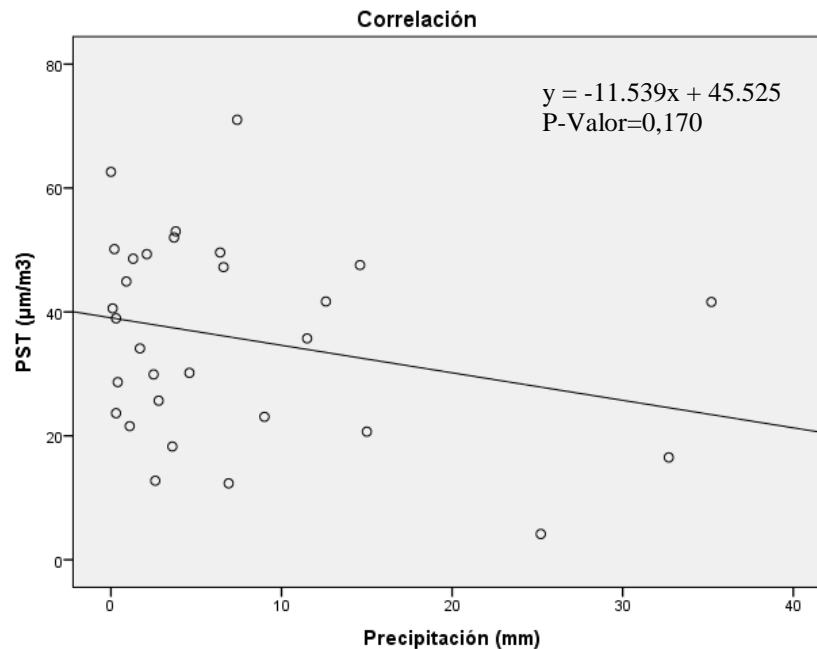


Figura 14. Diagrama de PST y Precipitación, por Buitrago, Tejeiro, 2018.

En la figura 15, se observa que la dispersión de los puntos de temperatura es aún mayor que en las gráficas de precipitación y velocidad del viento con respecto a PST, según el dato de Correlación  $r = 0.04$  siendo esta positiva muy baja e indicando que por cada grado centígrado ( $^{\circ}\text{C}$ ) que aumenta la temperatura incrementa un  $0.6934 \text{ ug}/\text{m}^3$  la concentración de PST, comportamiento que se da probablemente por la resuspensión del material particulado del suelo, que es elevado al calentarse el aire como consecuencia del incremento en la temperatura, además del aporte a la resuspensión de material particulado por el tráfico vehicular sobre la vía pavimentada Villavicencio-Acacias.

Situación similar al análisis de estudios en Bogotá, donde se asocia el MP resuspendido y las vías sin pavimentar, pavimentadas y en construcción, haciéndose pertinente mencionar que en los inventarios de emisiones se obtienen que más del 50% de las partículas suspendidas totales están asociadas a la resuspensión en vías pavimentada (Beltrán, Belalcázar, & Rojas, 2012).

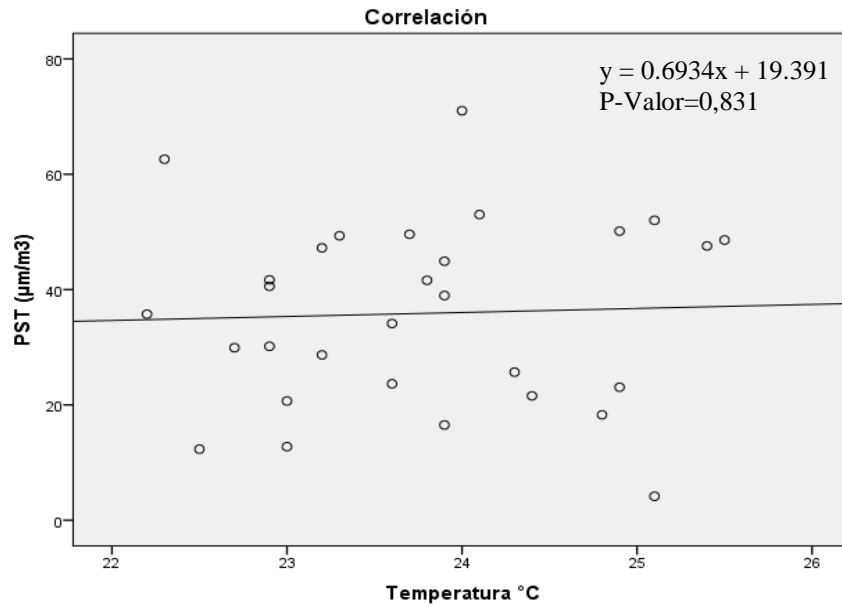


Figura 15. Diagrama de PST y Temperatura, por Buitrago, Tejeiro, 2018

Por último, en la figura 16, el coeficiente de correlación arrojado  $r = -0.11$  y la dispersión de los puntos, la Correlación es positiva muy baja. También la línea de tendencia (Recta de regresión) es decadente estipulando que por cada m/s que aumenta la velocidad del viento disminuye un 11.539  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  la concentración de PST, siendo esta la variable dependiente.

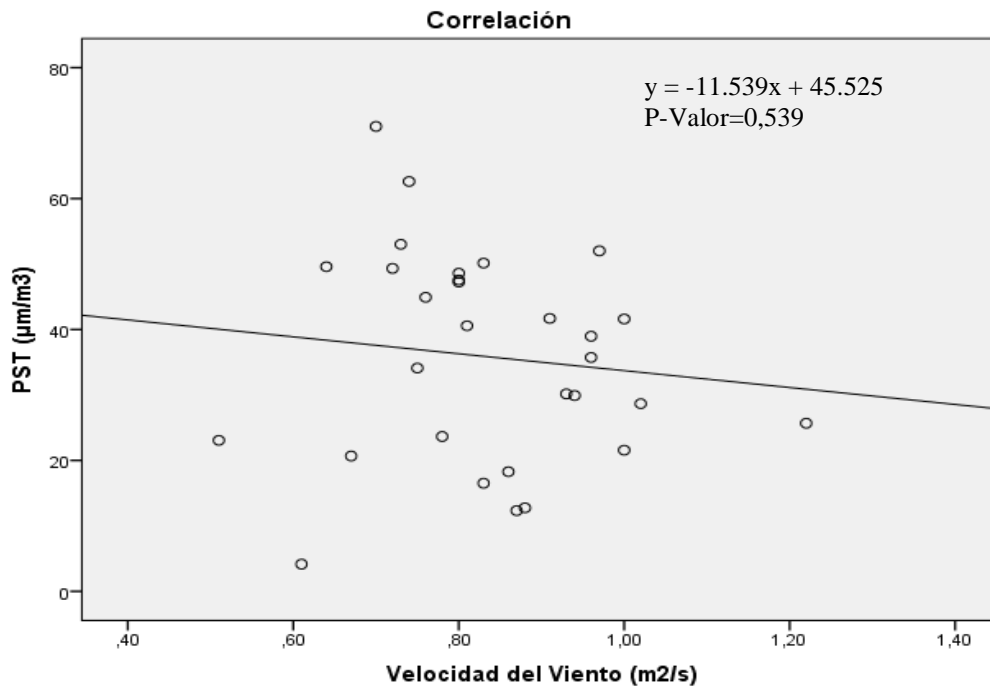


Figura 16. Diagrama de PST y Velocidad del Viento, por Buitrago, Tejeiro, 2018

Tanto las concentraciones de PST como en PM<sub>10</sub> tuvieron resultados similares con respecto a las condiciones meteorológicas. Esto podría ser debido a la alta correlación de estas dos variables; una investigación en la zona urbana de la ciudad de Riohacha de unos estudiantes de la Universidad de la Guajira, determinaron que la correlación de las partículas suspendidas totales (PST) y las partículas respirables (PM<sub>10</sub>) en seis puntos de muestreo de la ciudad oscilaban desde 0.64 a 0.90 estando en un grado de correlación positiva alta y muy alta; representando así, por medio de gráficos el incremento de PST cuando PM<sub>10</sub> aumenta (Roberto, Angulo, & Restrepo, 2013).

### **8.3. Parte III. Dirección de los vientos y contaminantes**

#### **8.3.1. Rosa de los vientos y rosa de contaminantes.**

En la figura 19 se observa claramente como el viento se dirige a la zona de estudio de las direcciones comprendidas entre el Este Sudeste 112,50° (ESE) y el Oeste Sudeste 247,50° (WSW) y en la figura 20 se evidencia como el viento se dirige de la zona de estudio hacia las direcciones comprendidas entre el Oeste Noroeste 292,50° (WNW) y el Este Nordeste 67,50° (ENE), como las provenientes de la dirección Sur Sudeste 157,00° (SSE), donde se encuentra un espacio sin urbanizar entre la vereda Barcelona conectada por la carretera del amor y la comuna 8 de Villavicencio, pasando por los barrios Guatapé, La Rochela y Catumare, sobresaliendo fuentes de emisiones fijas como la Maderera El Vergel y la Procesadora de Arroz Roa, pasando por la Universidad Santo Tomas Campus Loma Linda y posiblemente dirigiéndose a la reserva de Buena Vista, chocando con la cordillera Oriental que actúa como obstáculo natural y promueve que el viento se dirija hacia el Norte 360,00° (N), destacando los niveles de contaminación más altos de PM<sub>10</sub>, entre los intervalos de 40 a 47.5 ug/m<sup>3</sup>, debido a la industria maderera y arrocera presentes en esta dirección, según lo observado en la figura 17.

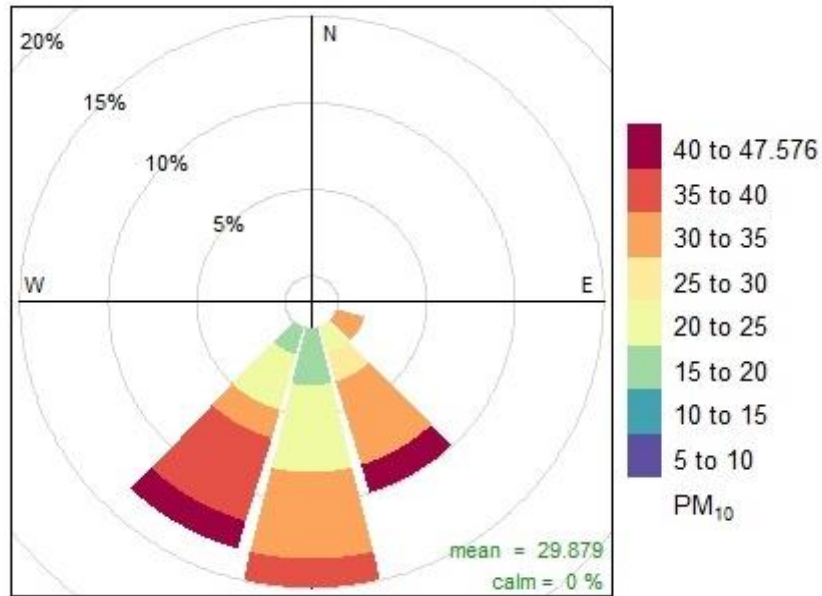


Figura 17. Rosa del contaminante PM<sub>10</sub>. Adaptado por: Buitrago, Tejeiro, 2018

Sumados a los vientos provenientes del Sur 180,00° (S), donde se encuentran nuevas zonas de crecimiento urbano y los barrios Villa Juliana y la Madrid, arrastrando posible material particulado de las construcciones y vías sin pavimentar, vientos que probablemente se dirigen hacia Las Américas, Altagracia y el Galán, destacando los niveles de contaminación más altos de PST, entre los intervalos de 60 a 71.01 ug/m<sup>3</sup>, debido a las partículas en suspensión mayores a 10 micras que son generadas de las obras de construcción y resuspensión de material particulado de vías sin pavimentar, según lo observado en la figura 18.

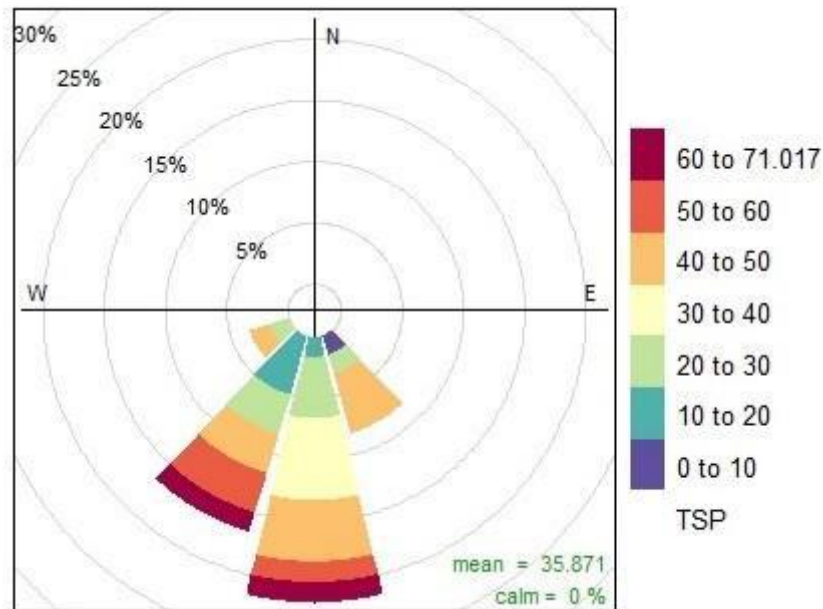


Figura 18. La rosa del contaminante PST. Adaptado por: Buitrago, Tejeiro 2018.

Por último los vientos provenientes de la dirección Sudoeste 225,00° (SW), donde se encuentran los barrios Playa rica, Montecarlo, Samán de la Rivera y Porfía, entre fuentes de emisiones fijas y móviles destacables como el molino de arroz Montecarlo y la vía Villavicencio-Acacias, presentando los niveles de contaminación más altos tanto de PM<sub>10</sub> entre los intervalos de 40 a 47.5 ug/m<sup>3</sup> como de PST entre los intervalos de 60 a 71.01 ug/m<sup>3</sup>, que se dirigen hacia el Norte Noreste 22, 50° (NNE) pasando por los conjuntos de Serra Monte, Montearroyo y los barrios El Trapiche y Barzal, según lo observado en las figuras 17 y 18. Es decir que los vientos se dirigen hacia la parte alta de la ciudad al igual que el material particulado (PST y PM<sub>10</sub>); esto, atribuido al viento como medio de transporte de partículas suspendidas.

Destacando la mayor velocidad del viento proveniente del Sudeste 135,00° (SE) que oscilan entre 1.75 m/s y 2 m/s que equivalen a 6.3 km/h y 7.2 Km/h y la ocurrencia o frecuencia más alta se observó hacia Sur Sudoeste 202,50° (SSW) con el 19% del tiempo transcurrido durante el periodo de captación.

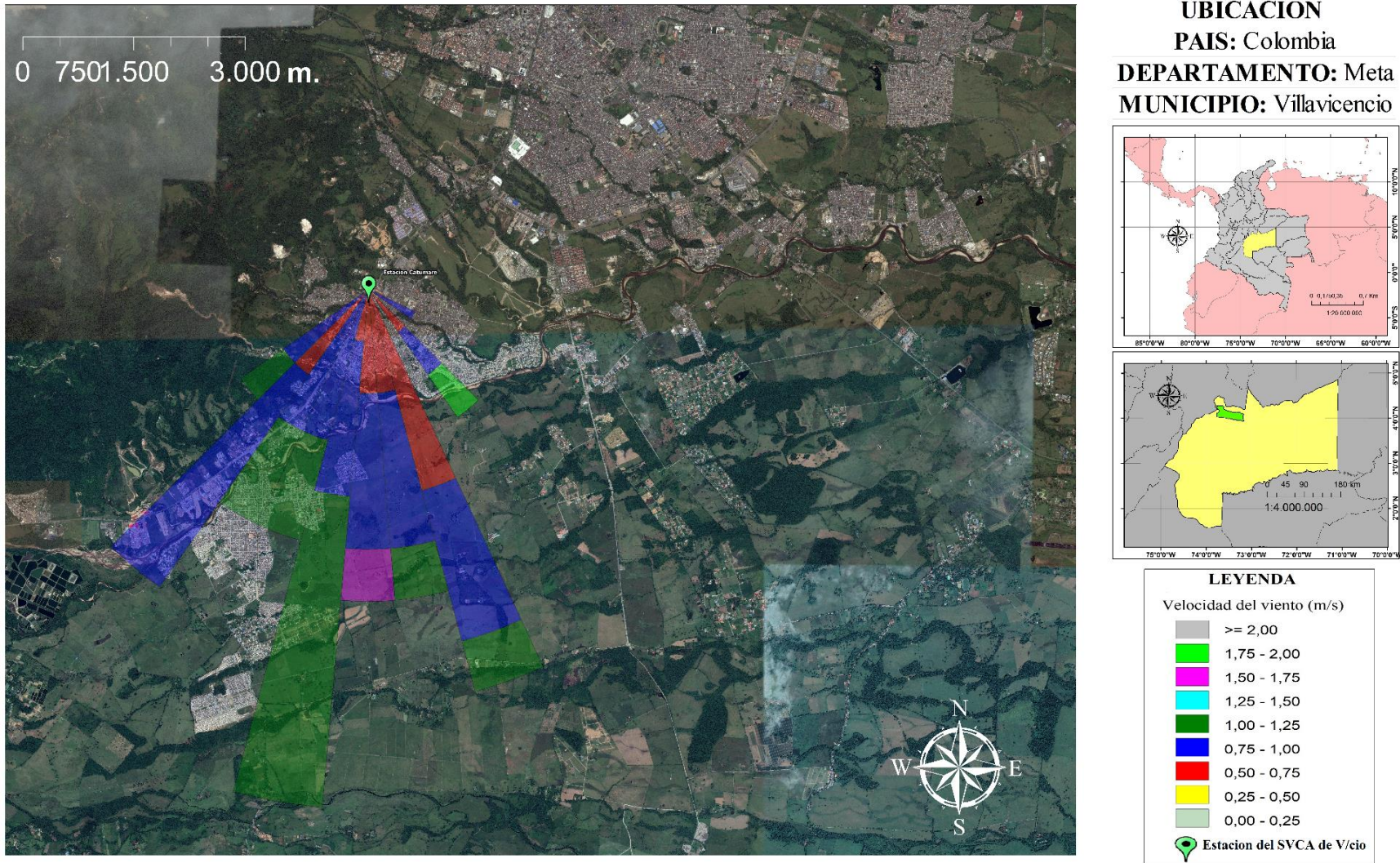


Figura 19. Rosa de los vientos con la dirección de donde vienen, Adaptado por: Buitrago, Tejeiro, 2018, a partir del software ArcGis 10.3, bajo la licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

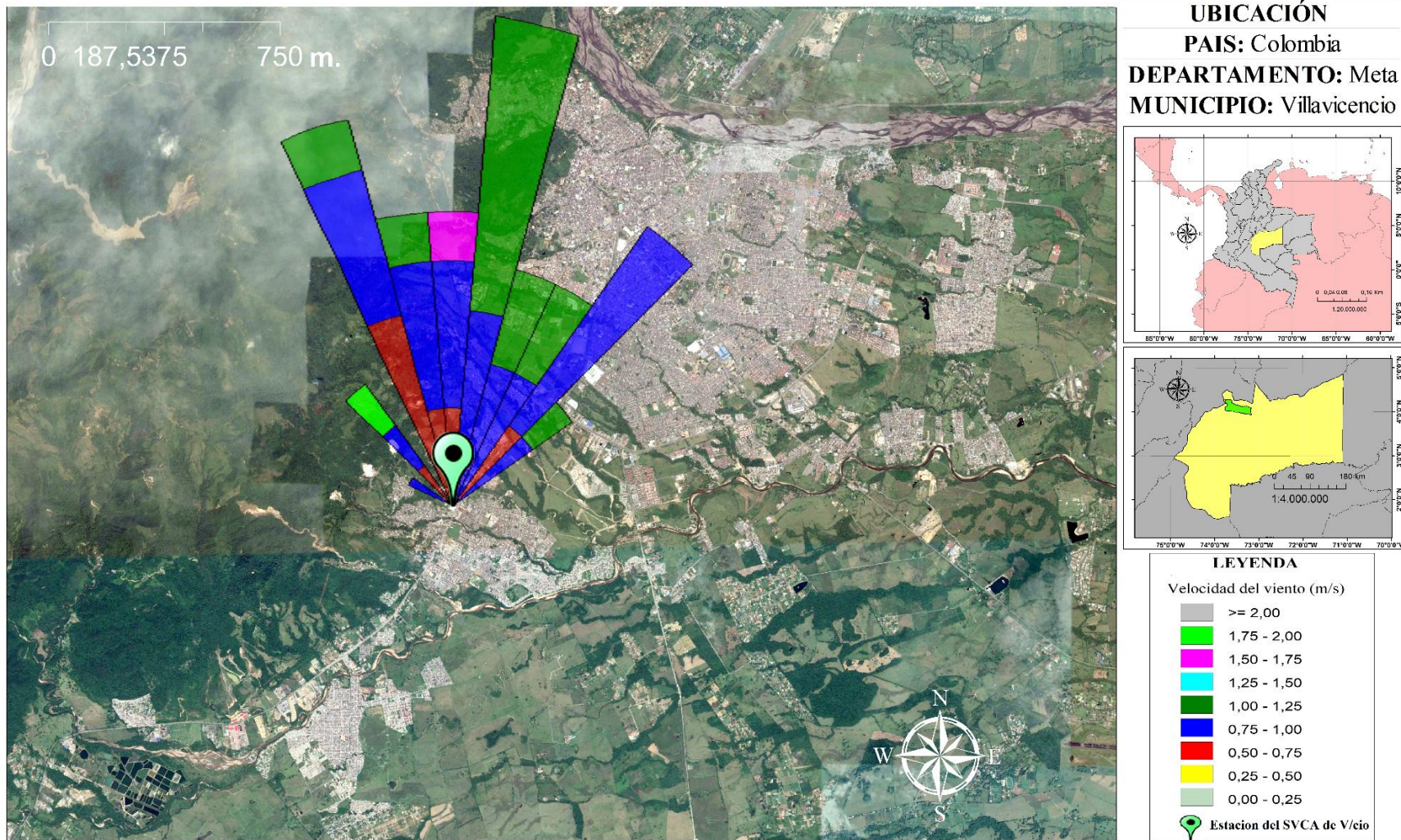


Figura 20. Rosa de los vientos con la dirección hacia donde se dirigen, Adaptado por: Buitrago, Tejeiro, 2018. a partir del software ArcGis 10.3, bajo la licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

### 8.3.2. Software libre R y su paquete Openair.

#### 8.3.2.1. Resumen estadístico básico de material particulado (PM<sub>10</sub> y PST).

Esta herramienta permitió observar la concentración mínima y máxima del material particulado PM<sub>10</sub> y PST, indicando que no superan los límites máximos permisibles en un periodo de 24 horas, tanto para PM<sub>10</sub> de 100 µg/m<sup>3</sup> como para PST de 300 µg/m<sup>3</sup>, esto según la normatividad para la medición de material particulado en Colombia, que se rige por la resolución 610 del 24 de marzo de 2010 para PST y por la resolución vigente y actualizada 2254 del 2017 para PM<sub>10</sub>.

El 1.er Cuartil y 3.er Cuartil que ordenan los datos de menor a mayor, los divide en cuatro e indica el valor máximo del 25% y 75% del total de las concentraciones, mejorando la concepción de las proporciones de material particulado con el que se trabajó, además permitió contemplar los promedios exactos de la base de datos con la media y la mediana, siendo mayor la mediana que la media evidencia una distribución asimétrica negativa, lo que infiere que los datos tienden a ser sesgados hacia los valores de concentración más bajos, alejándose de la media hacia la izquierda tanto para PM<sub>10</sub> como para PST, e incluso confirmar el manejo total de los 54 datos obtenidos, esto por los datos no existentes (N/A) que corresponden a los espacios ocupados por las concentraciones del otro contaminante.

#### Resumen estadístico de datos PM<sub>10</sub>

Mínimo	1. <sup>er</sup> Cuartil	Mediana	Media	3. <sup>er</sup> Cuartil	Máximo	N/A
16.65	22.79	30.95	29.88	34.66	47.58	30

#### Resumen estadístico de datos PST

Mínimo	1. <sup>er</sup> Cuartil	Mediana	Media	3. <sup>er</sup> Cuartil	Máximo	N/A
4.15	23.21	37.35	35.87	48.33	71.01	24

### 8.3.2.1.1. La Gráfica de Calendario PM<sub>10</sub>

Esta herramienta que facilita la observación de la cantidad de material particulado captado en cada uno de los días muestreados nos enseña como la concentración varía de manera importante de acuerdo al tráfico evidenciado en días relevantes por eventos masivos nacionales, departamentales y municipales.

La Figura 21 del calendario para PM<sub>10</sub>, nos enseña como la concentración varía de manera importante de acuerdo al tráfico evidenciado en días como el 27 de mayo donde se obtuvo la concentración más baja con exactamente 16.67 ug/m<sup>3</sup>, siendo este el día de las elecciones presidenciales y el 17 de junio segunda vuelta presidencial con 18.80 ug/m<sup>3</sup>, días en los que poco tráfico vehicular se observa debido a la incomodidad provocada por el cierre de calles importantes para la movilidad de las personas en la ciudad.

Fenómeno similar al transcurrido el día sin carros en la capital del departamento de Santander, donde la Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), realizó el monitoreo de contaminantes criterio con una red de estaciones automáticas de calidad del aire ubicadas en el Hospital del Norte, La Ciudadela, El Centro, Cabecera y Floridablanca, arrojando como resultados la disminución en cada una de las estaciones del 64%, 24%, 30%, 7%, 24% de PM<sub>10</sub>, equivalentes al 19.31 ug/m<sup>3</sup>, 11.76 ug/m<sup>3</sup>, 24.27 ug/m<sup>3</sup>, 4.26 ug/m<sup>3</sup>, 14,8 ug/m<sup>3</sup> de la concentración captada un día normal de tráfico vehicular, cuyos resultados fueron 30.18 ug/m<sup>3</sup>, 49.04 ug/m<sup>3</sup>, 80.9 ug/m<sup>3</sup>, 60.87 ug/m<sup>3</sup> y 58.68 ug/m<sup>3</sup> respectivamente (CDMB, 2012).

Al igual que, el seguimiento y control de la contaminación atmosférica realizada por Cormacarena los días 12 y 19 de abril del 2018 en Villavicencio, durante la celebración del día de la bicicleta y la actividad física, fomentando la reducción del parque automotor cuyo crecimiento desde el 2011 con 40.679 vehículos hasta el 2016 con 79.650 vehículos fue del 96% (Alcaldía de Villavicencio, 2016), obteniendo como resultado el cumplimiento de los límites máximos permisibles para PM<sub>10</sub> fijados en la Resolución No. 2254 de 2017, estimando según el ICA que la ciudad se encuentra en el rango de 0-50, determinando un estado de calidad del aire bueno y con un riesgo bajo para la salud de las personas (Cormacarena, 2018).

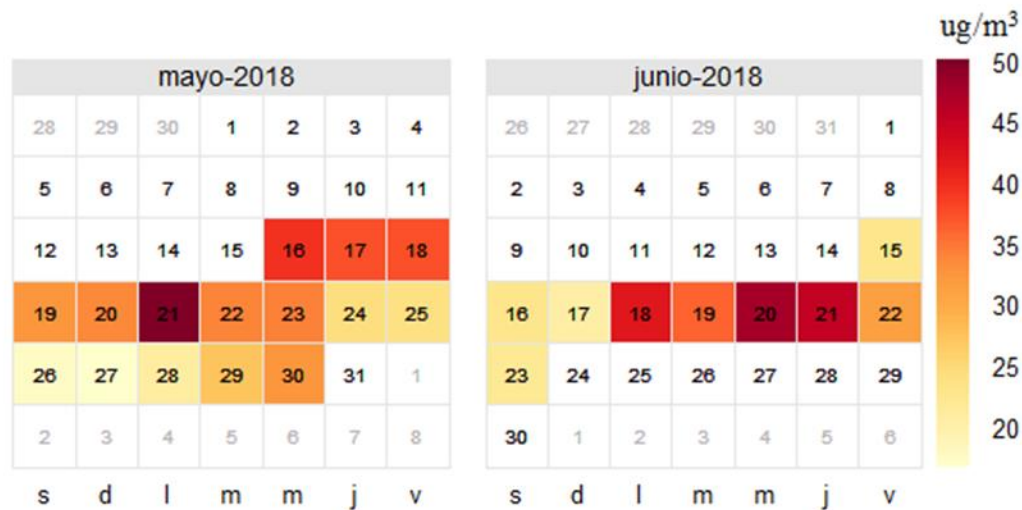


Figura 21. Gráfico de calendario para PM<sub>10</sub>. Por: Buitrago, Tejeiro 2018

#### 8.3.2.1.2. La Gráfica de Calendario PST

En la figura 22 del calendario para PST, se puede observar que se presentaron los niveles más altos de acuerdo al tráfico evidenciado en días del fin de semana festivo a partir del 9 al 11 de junio y del 30 al 2 de julio, siendo este último no solo un festivo donde se da inicio a los planes de salida y retorno de vehículos que viajan entre municipios, sino que además son días de ferias y fiestas en Villavicencio, con el apogeo del festival del joropo en la capital, evento que invita a las personas de la ciudad y de otros municipios a desplazarse para disfrutar del acontecimiento, lo que genera un movimiento masivo de vehículos en la urbe, generando PST por la resuspensión de material particulado y PM<sub>10</sub>.

Fenómeno similar al acontecido en la ciudad de la Paz - Bolivia durante las ferias de San Juan, ocasionando incrementos de material particulado (PM<sub>10</sub>) en un 219% y 275% en los años 2003 y 2004 respectivamente, permanecieron entre 3 y 4 días en sus valores más altos (Aldunat, Paz, & Halvorsen, 2006).

También, se puede observar claramente cómo los fines de semana no festivos presentan bajas concentraciones de material particulado, debido a la disminución de vehículos en las calles, principalmente por el descanso de rutinas como la movilización a lugares de trabajo y centros educativos.

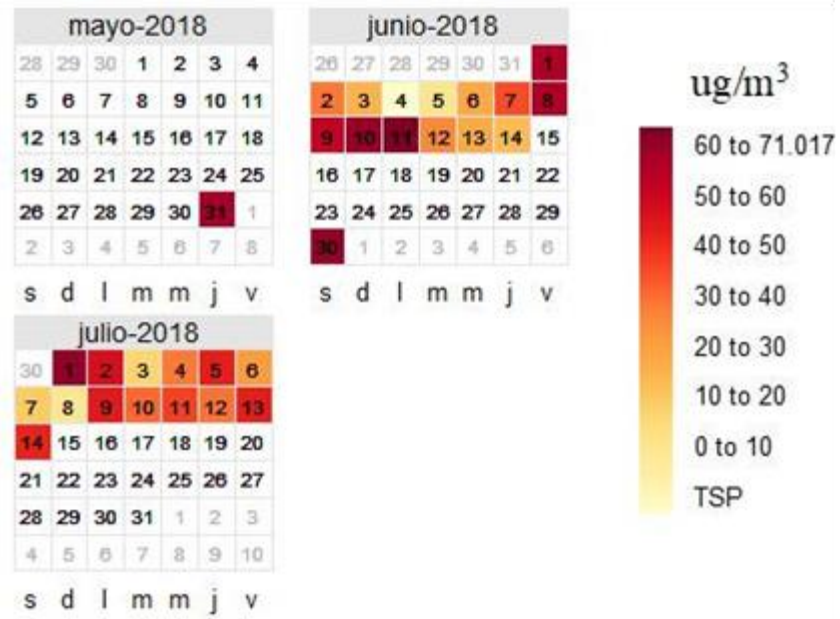


Figura 22. Gráfica de Calendario PST. Por: Buitrago, Tejeiro 2018.

## Conclusiones

- Una vez determinada la cantidad material particulado (PST y PM<sub>10</sub>) en ug/m<sup>3</sup> por medio del equipo muestreador Hi-Vol, se observó que no superan los límites máximos permisibles en periodos de 24 horas, resultados que distan de la problemática encontrada en el área de estudio, por lo que se puede concluir que la normatividad colombiana en cuanto a calidad del aire aun es permisible, pues su nivel máximo admisible para PM<sub>10</sub> es el doble recomendado por la OMS en sus guías de calidad del aire (50 ug/m<sup>3</sup> promedio para 24 h).
- De acuerdo a los diagramas y al coeficiente de correlación, se concluyó que la relación entre las condiciones meteorológicas (Velocidad del viento (m/s), temperatura (°C) y precipitación(mm)) y el material particulado (PST y PM<sub>10</sub>) no tienen una influencia significativa, ya que el grado de correlación es muy bajo y de acuerdo a los resultados obtenidos, se puede atribuir una mayor influencia en la variación de las concentraciones de PST y PM<sub>10</sub> a las fuentes fijas y móviles situadas en el área de estudio que a las mismas condiciones meteorológicas.
- Gracias a la rosa de los vientos y la rosa de contaminantes PST y PM<sub>10</sub> podemos identificar las zonas hacia las que se dirigen los contaminantes, como la universidad Santo tomas sede Loma Linda en dirección a la reserva de Buena Vista, destacando PM<sub>10</sub>, hacia Las Américas, Altagracia y el Galán, destacando PST, y hacia los conjuntos de Serra Monte, Montearroyo y los barrios El Trapiche y Barzal, destacando por igual PST y PM<sub>10</sub>, permitiendo deducir que el arrastre de partículas suspendidas por el viento provienen del Sur y se dirigen al Norte de la ciudad, esto durante el periodo de captación comprendido entre el 16 de mayo del 2018 y el 14 de julio del 2018.
- Finalmente, se confirma que la hipótesis planteada no se cumple, debido a los resultados obtenidos donde se evidencian concentraciones bajas de material particulado PST y PM<sub>10</sub>, cumpliendo con la normatividad colombiana sobre calidad del aire, donde las condiciones meteorológicas de precipitación (mm), temperatura (°C) y velocidad del viento (m/s), presentan poca influencia, por lo que no varían en gran medida las concentraciones del material particulado (TSP y PM<sub>10</sub>).

## Recomendaciones

Para lograr un correcto desarrollo de investigaciones similares, se hace necesario tener en cuenta las siguientes recomendaciones ya que varias de estas situaciones se presentaron durante la realización del proyecto.

Es pertinente, planear con anticipación la ubicación para la toma de las muestras, pues estos criterios pueden entorpecer de manera importante la recolección de material particulado, es recomendable ubicar el equipo muestreador a más de 2 m de cualquier vía de tránsito vehicular, a más de 2 m de altura sobre el suelo y por lo menos estar ubicado a una distancia que duplique la altura de cualquier obstáculo a su alrededor, tomando en cuenta la necesidad de energía eléctrica para el funcionamiento del equipo durante las 24 horas del día.

No está de más tomar las precauciones necesarias para cumplir con el periodo establecido de captación del material particulado establecido (24 h), pues la pérdida y bajones de energía pueden ser recurrentes, aun en ciudades como la de Villavicencio/Meta, se recomienda utilizar aparatos electrónicos como fuentes alternas de energía, estabilizadores o reguladores de energía.

La seguridad es otro punto importante a tratar, pues se manejan equipos extremadamente costosos como el Hi-Vol., que está en funcionamiento 24 horas del día por lo que necesita de constante cuidado, razones por la que este tipo de investigación no se puede realizar en cualquier lugar. (Herrera, Magaña, & Velueta, 2017)

Para futuras investigaciones se recomienda prestar especial atención a las concentraciones de material particulado puesto que varían de manera importante de acuerdo al tráfico evidenciado en días relevantes por eventos masivos nacional, departamental y municipal.

También es de consideración ampliar el tiempo de muestreo a más de 2 meses, incluir más condiciones meteorológicas y variar entre periodos de máximas y mínimas precipitaciones, si se desea realizar un trabajo aún más interesante y complejo.

## Referencias

- Akpinar, S., Oztop, F., & Akpinar, K. (2008). Evaluation of relationship between meteorological parameters and air pollutant concentrations during winter season in Elazığ, Turkey. *Environmental monitoring and assessment, Vol 146 (1–3), pp 211–224.*
- Aldunate, P., Paz, O., & Halvorsen, K. (2006). Los efectos de la contaminación atmosférica por PM<sub>10</sub> sobre la salud ciudad de La Paz–Bolivia (3650 msnm). *Recuperado el 14 de Agosto 2018* [https://www.researchgate.net/profile/Kjetil\\_Halvorsen2/publication/242386337\\_Los\\_efectos\\_de\\_la\\_contaminacion\\_atmosferica\\_por\\_PM10\\_sobre\\_la\\_salud\\_ciudad\\_de\\_La\\_Paz\\_-\\_Bolivia\\_3650\\_msnm/links/0a85e53b1c51e5052d000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Kjetil_Halvorsen2/publication/242386337_Los_efectos_de_la_contaminacion_atmosferica_por_PM10_sobre_la_salud_ciudad_de_La_Paz_-_Bolivia_3650_msnm/links/0a85e53b1c51e5052d000000.pdf).
- Ariza, A. (2014). Presión barométrica o presión atmosférica. *Recuperado el 23 de Agosto del 2017* [de, https://prezi.com/aaojcvm8vfti/presion-barometrica-o-atmosferica/](https://prezi.com/aaojcvm8vfti/presion-barometrica-o-atmosferica/)
- Ataz, M., & Morales M., (2004). Contaminación atmosférica. Vol. 45(1). España. Universidad de Castilla- La Mancha.
- Balcarce, E. (2009). Manual de procedimientos para determinación de material particulado. *Recuperado el 19 de Octubre del 2017* [de https://www.minsal.cl/portal/url/item/696ceddf66c471fee04001011f01233b.pdf](https://www.minsal.cl/portal/url/item/696ceddf66c471fee04001011f01233b.pdf)
- Alcaldía de Villavicencio. (2016). Parque automotor de Villavicencio llega a casi 80.000 vehículos. *Recuperado el 19 de Julio del 2018* [de http://villavicencio.gov.co/NuestraAlcaldia/SalaDePrensa/Paginas/Parque-automotor-de-Villavicencio-llega-a-casi-80-000-vehiculos.aspx](http://villavicencio.gov.co/NuestraAlcaldia/SalaDePrensa/Paginas/Parque-automotor-de-Villavicencio-llega-a-casi-80-000-vehiculos.aspx)
- Beltrán, D., Belalcázar, L. C., & Rojas, N. (2012). Emisiones vehiculares de material particulado (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) por resuspensión de polvo y abrasión en Bogotá. *Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Vol. 231, pp 25-32.*
- Buitrago, J. C. (2007). *Análisis de la contaminación del aire en la ciudad de Villavicencio. Tesis de grado obtenida no publicada.* Corporación Universitaria del Meta, Villavicencio, Meta. Disponible en el sitio web <http://www.ingenieroambiental.com/?pagina=3482>

- Benavides, O., & Ayala, L. (2010). Análisis Descriptivo de Variables Meteorológicas que Influyen en la Calidad del Aire de los Principales Centros Industriales del País. Bogotá D.C, IDEAM.
- Camacho R. & Guzmán R., (2009). *Propuesta para el diseño del plan de acción local para mejorar la calidad del aire en la ciudad de Villavicencio-Meta. Tesis de grado obtenida no publicada*, Villavicencio, Colombia. Disponible en el sitio web <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14016/T41.09%20C14p.pdf?sequence=1>
- Carslaw, D. (2015). The openair manual-open source tools for analysing air pollution data *Recuperado el 09 de Septiembre del 2017 de* [http://www.openair-project.org/PDF/OpenAir\\_Manual.pdf?fbclid=IwAR3Los-oooKenZLK9efsY78ph21\\_NQYzbeGZ7uUdD2ZxzgvyIPe3ZGwHzTE](http://www.openair-project.org/PDF/OpenAir_Manual.pdf?fbclid=IwAR3Los-oooKenZLK9efsY78ph21_NQYzbeGZ7uUdD2ZxzgvyIPe3ZGwHzTE)
- CDMB. (2012). Informe día sin carro particular junio 5 de 2012. *Recuperado el 02 de Noviembre del 2017 de* <http://www.cdm.gov.co/web/ciudadano/centro-de-descargas/788-informe-dia-sin-carro-5-junio-2012-1/file>
- Cepis. (2005). La importancia de la meteorología de la contaminación del aire. *Recuperado el 24 de Agosto del 2018 de* [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_meteoro/frame\\_m.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/frame_m.html),
- Chaloulakou, C., Kassomenos D., Spyrellisa F. & Demokritou B. (2012). Mediciones de las concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Atenas, *Global NEST Journal*, Vol 10, (2), pp 132-139.
- Conpes. (2008). Lineamientos para la formulación de la política integral de salud ambiental con énfasis en los componentes de calidad de aire, calidad de agua y seguridad química en Colombia. Bogotá. *Recuperado el 05 de noviembre 2017, del sitio web* [https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2008/Conpes\\_3550\\_2008.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2008/Conpes_3550_2008.pdf)
- Cormacarena. (2014). Realizar un estudio de monitoreo y diseño del sistema de vigilancia de la red de monitoreo de Calidad de Aire para el Municipio de Villavicencio. *Licitación pública-No 055. Recuperado el 12 de Agosto 2017 de* <https://colombialicita.com/licitacion/55839>
- Cormacarena. (25 de septiembre del 2015). El nivel de contaminación del aire aumentó en Villavicencio. *Llano7Días*. *Recuperado el 21 de Agosto del 2017 de* <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16387267>

- Cormacarena. (2016). Villavicencio ya tiene estaciones de medición de calidad del aire. Recuperado el 03 de Octubre del 2018 de <http://www.cormacarena.gov.co/boletines.php?noticia=2938>
- Cormacarena. (2018). Villavicencio cumple con los límites permisibles de contaminación en calidad de aire. Villavicencio. Recuperado el 25 de Julio de <http://www.cormacarena.gov.co/boletines.php?noticia=3351>
- Cormacarena. (27 de septiembre 2016). Molino entra bajo la lupa por contaminación en Villavicencio. El Tiempo. Disponible en la página web <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/contaminacion-en-villavicencio-50607>
- Corpocesar. (2009). Informe de operación de la red de calidad de aire en la zona minera del departamento del cesar. Recuperado el 16 de Septiembre 2017 de [http://www.sisaire.gov.co:8080/faces/docs/2-8-2010-2-18-48-46-11Informe\\_Mayo\\_2009](http://www.sisaire.gov.co:8080/faces/docs/2-8-2010-2-18-48-46-11Informe_Mayo_2009)
- Costa, C., Saldarriaga, G., Lozano, R., & Suarez, R. (2007). Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables en Colombia y Calidad del Aire. Bogotá D.C., Ideam pp. 46-75.
- Dane. (2010). Diagnóstico sectorial del municipio. Recuperado el 16 de Octubre del 2017 de <file:///D:/Downloads/Diagnostico-Sectorial-Poblacion.pdf>
- Esri. (2014). Introducción a ArcGIS. Recuperado el 28 de Octubre de 2017 de <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- Fang, G., Chang, N., Chu, C., Wu, S., Fu, C., Yang, L. & Chen, H. (2003). Characterization of particulate, metallic elements of TSP, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>2.5-10</sub> aerosols at a farm sampling site in Taiwan, Taichung. *Science of the Total Environment*, Vol. 308(1-3), pp. 157-166.
- Follos F. (2012). Lenguaje R aplicado al análisis de datos de calidad del aire. Manual básico para el tratamiento de datos de calidad del aire mediante el lenguaje estadístico R y paquetes adicionales como Openair. Disponible en la página web [http://www.openair-project.org/pdf/r\\_openair\\_aplicado\\_a\\_calidad\\_del\\_aire.pdf](http://www.openair-project.org/pdf/r_openair_aplicado_a_calidad_del_aire.pdf)
- García A- (2013). Implementación del software estadístico Openair para el procesamiento y análisis de la información de la base de datos de la red de calidad de aire de Bogotá. Tesis de grado obtenido no publicado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. Disponible en la página web,

[http://bdigital.unal.edu.co/39469/1/pedroalejandrogarciaavila.2013.pdf?fbclid=IwAR21B8\\_zBYITunfFuEdb9QRH-2MHqtkVYoaMFMejStOF\\_r1EjOdsibU2g0A](http://bdigital.unal.edu.co/39469/1/pedroalejandrogarciaavila.2013.pdf?fbclid=IwAR21B8_zBYITunfFuEdb9QRH-2MHqtkVYoaMFMejStOF_r1EjOdsibU2g0A)

- Giraldo, C., Velasco, M., & Zuluaga, H. (2017). Boletín de calidad de aire. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Recuperado el 12 de Agosto del 2017 de <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/inicio/publicaciones/bcam2017.pdf>
- González D. (2012). Calidad del aire en la zona centro y oriente de la ciudad de Manizales: influencia del material particulado (PM<sub>10</sub>) y lluvia ácida. Tesis de grado obtenido no publicada. Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales. Manizales, Colombia. Disponible en el sitio web <https://core.ac.uk/download/pdf/11056418.pdf>
- González D., Cortés J., & Aristizába, B. (2015). Influencia de la meteorología y las fuentes de emisión en los niveles ambientales de [PM. sub. 10] en una ciudad tropical Andina. Revista Facultad de Ingeniería, Vol. 74, pp 200-213
- Gobierno de Aragón. (2014). Contaminantes y su dispersión. Recuperado el 12 de Agosto del 2017 de [http://www.aragonaire.es/moreinfo.php?n\\_action=pollutants](http://www.aragonaire.es/moreinfo.php?n_action=pollutants)
- Harrison, R. (2006). An Introduction to Pollution Science. London, United Kingdom: Royal Society of Chemistry.
- Herrera, S., Magaña, E., & Velueta, J. (2017). Lenguaje R aplicado al análisis de datos de calidad del aire. manual para el manejo de software especializado. Disponible en la página web, [http://www.riaat.ujat.mx/hablandoal aire/tutoriales/Manual\\_SoftwareEspecializadoParaAire.pdf](http://www.riaat.ujat.mx/hablandoal aire/tutoriales/Manual_SoftwareEspecializadoParaAire.pdf)
- IDEAM. (2016). Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011-2015. Bogotá, D.C. Recuperado el 08 de Septiembre de 2017 de [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023637/Informe\\_del\\_Estado\\_dela\\_Calidad\\_del\\_Aire\\_en\\_Colombia\\_2011-2015\\_vfinal.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023637/Informe_del_Estado_dela_Calidad_del_Aire_en_Colombia_2011-2015_vfinal.pdf)
- IDEAM. (2017). Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2017. Bogotá D, C. Recuperado el 15 de Julio del 2018 de [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023844/Informe\\_ECalidadl\\_Aire\\_2017.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023844/Informe_ECalidadl_Aire_2017.pdf).
- IDEAM. (2006). Medición, procesamiento de la información y red de estaciones que miden viento en Colombia. Atlas de viento y energía eólica de Colombia. (pp.,124). Bogotá, D.C.

- IPCC. (2007). Cambio Climático 2007 – Base de Ciencia. Física Informe del Grupo de Trabajo I del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (ISBN 978 0521 88009-1 Libro)
- Jim, L., & Lee, L. (2004). Caracterización de la concentración y distribución de partículas de aerosol submicrónico urbano (PM<sub>10</sub>). *Ambiente atmosférico*. Vol. 38 (1), p., 469-475. Elsevier.
- Keary J., McManus B., & Lee M. (1998). PM<sub>10</sub> Mediciones de concentración en la ciudad de Dublín. *Monitoreo y Evaluación Ambiental*. Vol. 52 (1), p., 3-18.
- Martín J., Francisco J. & Martín R. (2005). Criptograma en las rosas de brújula de las cartas portolanas de Mallorca de la escuela de cartógrafos de Messina-Nápoles. Tesis de grado obtenido no publicado. Universidad de Valladolid, España. Disponible en el sitio web, [https://www.researchgate.net/profile/Pablo\\_MartinRamos/publication/256487003\\_A\\_cryptogram\\_in\\_the\\_compass\\_roses\\_of\\_the\\_Majorcan\\_portolan\\_charts\\_from\\_the\\_MessinaNaplmapmakers\\_school/links/0deec52332c2246943000000/A-cryptogram-in-the-compass-roses-of-the-Majorcan-portolan-charts-from-the-Messina-Naples-mapmakers-school.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Pablo_MartinRamos/publication/256487003_A_cryptogram_in_the_compass_roses_of_the_Majorcan_portolan_charts_from_the_MessinaNaplmapmakers_school/links/0deec52332c2246943000000/A-cryptogram-in-the-compass-roses-of-the-Majorcan-portolan-charts-from-the-Messina-Naples-mapmakers-school.pdf).
- Merino, J. (2014). Definición de presión absoluta. Recuperado el día 25 de noviembre de 2018, <https://lauraecifisica.wordpress.com/primer-corte-2/presion-absoluta-atmosferica-manometrica/>
- Minambiente. (2010). Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire Colombia. Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Bogotá D.C. Disponible en el sitio web de la fuente, [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion\\_atmosferica/Protocolo\\_Calidad\\_del\\_Aire\\_-\\_Manual\\_Dise%C3%B1o.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Dise%C3%B1o.pdf)
- Minitab. (2017). Interpretar los resultados clave para Correlación. Recuperado el 9 de Febrero del 2019, [https://support.minitab.com/es\\_mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basicstatistics/howto/correlation/interpret-the-results/key-results/](https://support.minitab.com/es_mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basicstatistics/howto/correlation/interpret-the-results/key-results/)
- Muñoz, S. J. (2011). Tipos de Investigación. Recuperado el 29 de Julio del 2017 de <https://slideplayer.es/slide/4336794/>
- Resolución 650 del 2010 [Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible]. Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. 29 de marzo de 2010.

- Resolución 0610 del 2010. [Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible]. Por la cual se establece la Norma de calidad del aire o nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. 24 de marzo de 2010.
- Resolución 2254 del 2017. [Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible]. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. 1 Noviembre del 2017.
- OPS. (2005). Evaluación de los Efectos de la Contaminación del Aire en la Salud de América Latina y el Caribe. Wahington D.C *Recuperado el 9 de Febrero del 2019*, de la organización Organización Panamericana de la Salud <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsea/fulltext/contaminacion/contaminacion.pdf>.
- OPS. (2006). Conceptos básicos sobre la meteorología de la contaminación del aire. *Recuperado el 2 de Agosto del 2018*, de la organización Organización Panamericana de la Salud [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_meteoro/frame\\_m2.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/frame_m2.html)
- Perez, G. (2018). *Ordenamiento territorial del Distrito de Quiquijana. Lima. Tesis de grado obtenido no publicada*. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú. Dispone en el sitio web de la fuente: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3150/P30-P34-T.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Querol, X. (2018). La calidad del aire en las ciudades. España. *Recuperado el día 08 de agosto de 2018*, <http://www.fundacionnaturgy.org/wp-content/uploads/2018/06/calidad-del-aire-reto-mundial.pdf>
- Redaire. (2018). Protocolo para el muestreo de partículas suspendidas totales (pst) utilizando el equipo muestreador de calidad del aire alto volumen hi-vol. Valle de Aburra. *Recuperado el día 26 de noviembre de 2018* [https://www.academia.edu/17489250/Protocolo\\_Hi-Vol](https://www.academia.edu/17489250/Protocolo_Hi-Vol).
- Roberto, E., Angulo, c., & Restrepo, G. (2013). Niveles de Partículas Suspendidas Totales (PST), PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> y su Relación en Lugares Públicos de la Ciudad Riohacha, Caribe Colombiano. *Información Tecnológica*. Vol. 24 (2), P., 37-46
- Rodríguez, D. (2015). Actitud al enfoque ambiental por los docentes de las instituciones educativas públicas de nivel primario y secundario de la ciudad de pucallpa. Tesis de grado no publicada. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Lima, Perú. Disponible en el sitio web de la fuente,

- [https://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades\\_academicas/INFORME%20DE%20PRACTICA%20PRE%20PROFESIONAL.pdf](https://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/INFORME%20DE%20PRACTICA%20PRE%20PROFESIONAL.pdf)
- Rodriguez, L. (2007). Probabilidad y Estadística básica para ingenieros. Probabilidad y Estadística básica para ingenieros. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador. Recuperado el día 18 de agosto de 2017, [https://archuto.files.wordpress.com/2011/02/probabilidad\\_y\\_estadistica\\_basica.pdf](https://archuto.files.wordpress.com/2011/02/probabilidad_y_estadistica_basica.pdf)
- Roldan, J. (2017). Diagrama de correlación-dispersión. Recuperado el día 15 de septiembre de 2018, [http://www.jomaneliga.es/PDF/Administrativo/Calidad/Diagrama\\_Correlacion\\_Dispersin.pdf](http://www.jomaneliga.es/PDF/Administrativo/Calidad/Diagrama_Correlacion_Dispersin.pdf)
- Silva, V. (2010). Contaminación del aire por material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>). Recuperado el día 4 de octubre de 2018 [http://tallerdearquitecturamexicana.com/observaleon.org/wpcontent/uploads/2010/03/Material-Particulado\\_Vicente-Silva.pdf](http://tallerdearquitecturamexicana.com/observaleon.org/wpcontent/uploads/2010/03/Material-Particulado_Vicente-Silva.pdf)
- Suarez, C. (2012). Diagnóstico y Control de Material Particulado: Partículas Totales y Fracción respirable PM<sub>10</sub>. Manizales. Recuperado el día 29 de septiembre de 2017, <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n34/n34a12.pdf>.
- Trujillo, G., & Torres, M., (2015). Niveles de contaminación en tres sectores de Villavicencio, a través del índice de geo-acumulación (I-geo). Orinoquia. Vol 19 (1), p.,109-117. Disponible en el sitio web de la fuente, [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S012137092015000100010](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S012137092015000100010)
- UNAL. (2017). Procedimiento gestión de la calidad del aire. Bogotá D,C. Recuperado el día 13 de septiembre de 2018, <http://oga.bogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2017/09/U-PR-15.003.010-Gesti%C3%B3n-de-la-Calidad-del-Aire.pdf>
- Urrego, M. (2006). Establecer la asociación existente entre las variables meteorológicas temperatura, velocidad del viento y precipitación y las concentraciones de PM<sub>10</sub> registradas en la red de calidad del aire de Bogotá D.C. . Tesis de grado no publicada. Universidad de la salle, Bogotá D.C. Disponible en el sitio web de la fuente, <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14805/00798291.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Viridiana, B. (2017). Coeficiente de correlación de Pearson. Recuperado el día 2 de noviembre de 2018, <http://unachtic-vbenavides-7a.blogspot.com/2017/10/coeficiente-de-correlacion-de-pearson.html>