



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Análisis de condiciones meteorológicas superficiales en el Valle de Aburrá y sus posibles efectos sobre la calidad del aire

Natalia Bernal Manrique

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2019



Análisis de condiciones meteorológicas superficiales en el Valle de Aburrá y sus posibles efectos sobre la calidad del aire

Natalia Bernal Manrique

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Directora:

Ph.D. Ángela María Rendón Pérez

Línea de Investigación:

Cambio Ambiental, Calidad del aire

Grupo de Investigación:

GIGA

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2019

A Dios, mi familia y mis amigos.

“Nada en la vida es para ser temido, es sólo para ser comprendido. Ahora es el momento de entender más, de modo que podamos temer menos”

Marie Curie

Agradecimientos

El gusto por la línea de modelación ambiental comenzó con la lectura del “Mundo de las margaritas” (Lovelock, J & Watson, A). Y este gusto se fue afianzando en cada curso con la pasión que cada profesor ponía. Finalmente, con el ánimo de incursionar más en el tema y comprender más mi entorno, tuve la suerte de dar con la profesora Ángela María Rendón, mi tutora, a quien admiro y agradezco por la confianza y paciencia que ha tenido en mí y por las oportunidades que me ha dado para crecer académica y profesionalmente.

Agradezco a todos mis compañeros de carrera, por su calidad humana y académica. Por tener la mejor disposición para ayudarme en lo que necesitara. Porque a pesar de la distancia, formamos amistad; y gracias a ellos pude conocer y aprender de primera mano virtudes y dificultades del departamento. A ellos, mis colegas, les deseo muchos éxitos; y confié que el desarrollo de las regiones llegue a sus manos.

No siendo menos importante, gracias a mi Alma Mater. Porque me permitió formarme primeramente como persona y en añadidura como Ingeniera Ambiental.

Resumen

La isla de calor urbano (ICU) es un fenómeno ambiental que sucede por cuenta de los materiales propios de las ciudades y que puede tener fuertes efectos sobre la dinámica eólica y, por tanto, sobre el transporte de contaminantes emitidos desde zonas urbanas. Este efecto de la ICU es particularmente importante en ciudades donde las barreras orográficas imponen restricciones adicionales a la ventilación, como ocurre en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). Este estudio busca analizar los mecanismos de transporte de contaminantes y sus relaciones con el comportamiento superficial de la temperatura, la humedad relativa y los campos de viento, durante el trimestre marzo, abril y mayo (MAM) de 2016, periodo significativo en términos de la ocurrencia de fuertes eventos de contaminación registrados para el AMVA.

En la primera parte de la investigación se analizan de manera independiente las variables meteorológicas temperatura, velocidad del viento y humedad relativa a través de sus ciclos diurnos y se escoge la estación Jardín Botánico para hacer el análisis combinado de las variables. El análisis permite decir, de manera general, que la temperatura tiene una relación inversa con la humedad y directa con la velocidad del viento.

Para discutir acerca de posibles relaciones entre el comportamiento de las variables meteorológicas y el transporte de contaminantes y la calidad del aire en el Valle de Aburrá, los análisis posteriores se concentran en un mes dentro del trimestre de estudio, en el cual había declaratoria ambiental (20 de marzo al 16 de abril de 2016). Este análisis se realiza tomando de manera conjunta datos de temperatura, velocidad del viento y concentración de PM 2.5 para 3 estaciones al norte, centro y sur del Valle. Los análisis involucran procesamiento estadístico para obtención de medidas de tendencia central y dispersión, series de tiempo, ciclos diurnos, pruebas de tendencia, correlaciones, espectros de potencia y análisis de onditas “wavelets” . Estos estadísticos son analizados teniendo en cuenta las horas de tráfico vehicular, los procesos relacionados con la estabilidad

atmosférica y la isla de calor urbano, y la normativa legal vigente acerca de emisiones vehiculares durante el periodo de estudio.

Los resultados sugieren que la variabilidad de la meteorología al interior del Valle está fuertemente condicionada por el efecto de la isla de calor urbano, ya que el foco de temperatura en el centro del Valle condiciona el comportamiento del campo de circulación. Además, la relación de las variables meteorológicas tiene una alta variabilidad en el sur respecto al comportamiento que hay al centro y norte del Valle, y puede estar influenciada por los procesos químicos asociados con las condiciones de calidad del aire. Estudios adicionales se requieren para poder confirmar esta relación aparente.

Palabras clave: Isla de Calor Urbano (ICU), temperatura atmosférica, velocidad del viento, material particulado PM2.5, contingencia ambiental, tráfico vehicular, Valle de Aburrá.

Contenido

	Pág.
1. Introducción	1
2. Objetivos.....	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. Marco teórico.....	5
3.1 Área de estudio	5
3.2 Meteorología	5
3.3 Normatividad	8
4. Metodología	10
4.1 Selección de la muestra	10
4.2 Análisis de los datos.....	11
4.3 Diseño de la investigación.....	12
4.3.1 Variable PM2.5	13
5. Resultados y análisis	16
5.1 Análisis Meteorológico	17
5.1.1 Condiciones meteorológicas en todo el Valle.....	17
5.1.2 Condiciones meteorológicas dentro del Valle	18
5.1.2.1 <i>Temperatura</i>	19
5.1.2.2 <i>Humedad relativa</i>	20
5.1.2.3 <i>Viento</i>	20
5.2 Caso de estudio: Estación meteorológica 68 -Jardín Botánico-	23
5.3 Meteorología y Calidad del aire: periodo de contingencia ambiental.	26
5.3.1 Series de tiempo horarias	27
5.3.2 Ciclos diurnos en la estación centro.....	30
5.3.3 Remoción del ciclo diurno en la serie de tiempo	32
5.3.4 Tendencias y correlaciones	34
5.3.5 Análisis frente a la normativa <i>Resolución 610 de 2010 del MAVDT</i>	35
5.3.6 Espectro de potencias	37
5.3.7 Espectro de Onditas	38
5.3.8 Coherencia Onditas	40
5.3.8.1 <i>Coherencia entre las variables meteorológicas</i>	40
5.3.8.1 <i>Coherencia de cada variable meteorológica con PM2.5</i>	43
6. Conclusiones y comentarios finales.....	46

7. Anexos	48
A. Anexo: Ciclos diurnos.....	48
B. Anexo: Rosas de viento.....	48
C. Anexo: Coherencia Onditas	48
8. Bibliografía	49

Lista de ilustraciones

	Pág.
Ilustración 1 Rangos del Índice de Calidad de Aire	9
Ilustración 2 Región de estudio Área metropolitana del Valle de Aburrá, Antioquia, Colombia. Con las respectivas estaciones meteorológicas desde donde se obtiene la información de las variables viento, temperatura y humedad relativa.....	11
Ilustración 3 Clasificación de las estaciones meteorológicas por ubicación y altura sobre el nivel del mar. Centro del Valle (amarillo), Norte (naranja), Sur y laderas (azul) y Santa Elena (verde).	12
Ilustración 4 Distribución de las estaciones de material particulado PM2.5 (en rojo) alrededor de las estaciones meteorológicas analizadas (en recuadro blanco) para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Adaptado de AMVA, 2017.	14
Ilustración 5 Diferencias de fase y su interpretación en Coherencia Onditas.....	16

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Rosas de vientos (día-noche) de la estación 205 en el trimestre de estudio. ...	17
Figura 2 Rosa de vientos (día-noche) de la estación 202-AMVA.	21
Figura 3 Ciclos diurnos de temperatura (a), humedad relativa (b) y velocidad del viento (c) de las estaciones meteorológicas de la red de monitoreo SIATA, para el trimestre marzo (03), abril (04), mayo (05) del 2016. El orden en colores está dado por la altura.	23
Figura 4 Ciclo diurno combinado de las variables meteorológicas para la estación 68 (Jardín Botánico).	25
Figura 5 Rosa de vientos (día-noche) de la estación 68	26
Figura 6 Series de tiempo de (a) Temperatura, (b) Velocidad del viento, (c) Concentración de PM2.5 para la estación norte. En el eje x, los números antes del punto representan el día, los demás la hora.	29
Figura 7 Series de tiempo de (a) Temperatura, (b) Velocidad del viento, (c) Concentración de PM2.5 para la estación centro. En el eje x, los números antes del punto representan el día, los demás la hora.	29
Figura 8 Series de tiempo de (a) Temperatura, (b) Velocidad del viento, (c) Concentración de PM2.5 para la estación sur. En el eje x, los números antes del punto representan el día, los demás la hora.	30
Figura 9 Ciclos diurnos de (a) Temperatura, (b) Velocidad del viento, (c) Concentración de PM2.5 para la estación centro.	31
Figura 10 Series de tiempo de (a) Temperatura, (b) Velocidad del viento, (c) Concentración de PM2.5 menos sus respectivos ciclos diurnos para la estación norte. En el eje x, los números antes del punto representan el día, los demás la hora.	33

Figura 11 Series de tiempo de (a) Temperatura, (b) Velocidad del viento, (c) Concentración de PM2.5 menos sus respectivos ciclos diurnos para la estación centro. En el eje x, los números antes del punto representan el día, los demás la hora.....	33
Figura 12 Series de tiempo de (a) Temperatura, (b) Velocidad del viento, (c) Concentración de PM2.5 menos sus respectivos ciclos diurnos para la estación sur. En el eje x, los números antes del punto representan el día, los demás la hora.....	34
Figura 13 Valores máximos de PM2.5 para las estaciones (a) norte, (b) centro, (c) sur. (En el eje x: días, el en eje y: concentración de material particulado en ppm).....	37
Figura 14 Espectro de potencias de la serie de tiempo menos el ciclo diurno para la concentración de PM2.5 de las 3 estaciones.	38
Figura 15 Wavelet de PM2.5 para la estación norte (a), centro (b) y sur (c).	40
Figura 16 Coherency-wavelet entre las variables meteorológicas para la estación centro (a) HR (%) vs V(m/s), (b) T(°C) vs HR (%) y (c) T(°C) vs V(m/s). Donde la Coherencia esta entre valores de cero (azul) hasta uno (rojo), el contorno blanco indica una significancia del 90% y las flechas si las variables están en fase o no, y cual antecede sobre la otra. Variables en el título: x & y (ver Ilustración 5)	43
Figura 17 Coherency-wavelet de las variables meteorológicas con PM2.5 para la estación centro. Donde la Coherencia esta entre valores de cero (azul) hasta uno (rojo), el contorno blanco indica una significancia del 90% y las flechas si las variables están en fase o no, y cual antecede sobre la otra. Variables en el título: x & y (ver Ilustración 5 Diferencias de fase y su interpretación en Coherencia Onditas.)	46

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Niveles de contingencia atmosférica para PM10, PM2.5 y O3 (PIGECA, 2017) ..	9
Tabla 2 Estaciones de estudio, tipo de datos y su ubicación geográfica.	13
Tabla 3 Porcentaje de datos faltantes en los archivos de trabajo de la “fase meteorológica”	15
Tabla 4 Valores promedios máximos y mínimos de las variables humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, para todas las estaciones de estudio.	18
Tabla 5 Valores promedios máximos y mínimos de las variables humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, para todas las estaciones de estudio con excepción de las estaciones Santa Elena (205) y Vivero EPM Piedras Blancas (207).	19
Tabla 6 Valores promedios máximos y mínimos de las variables humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, para toda la estación 68 (Jardín Botánico).....	24
Tabla 7 Medidas de locación y dispersión para todas las variables y estaciones en el periodo de estudio.	27
Tabla 8 Prueba paramétrica lineal de la tendencia de las series de tiempo de PM2.5 menos su correspondiente ciclo diario.	35
Tabla 9 Correlación entre temperatura y PM2.5 de la estación centro.	35

1.Introducción

Cerca del 50% de la población mundial habita hoy en las ciudades y se espera que este número crezca hacia las dos terceras partes de la población alrededor del 2050 (ONU, 2018). Este comportamiento conlleva a un asociado desarrollo de los centros urbanos que involucra procesos de urbanización con cambios en los usos y coberturas del suelo, además de aumentos en las emisiones de contaminantes desde la superficie.

De manera más específica, este incremento de la urbanización, entendiendo urbanización como “el movimiento de personas de zonas rurales a zonas urbanas que generalmente está influenciado por la modernización y la industrialización de la economía” (Rosatto, 2016), no tiene comparación alguna. Según el reporte de UN-Habitat (2011), la población urbana aumentó casi cinco veces entre 1950 y 2011, alcanzando los mayores niveles en los países menos desarrollados. Además, este aumento a nivel de urbanización no manifiesta un cese cercano; las proyecciones de 2011 para América latina señalaban un incremento del 71% al 81% para el 2025, sin embargo, hoy 2019 la urbanización es del 81% para Latinoamérica y el Caribe (ONU, 2018).

De acuerdo con el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2014) la dinámica del crecimiento urbano para Colombia se mantendrá en las próximas décadas, proyectándose para 2050 una participación del 85% de la población urbana. En cuanto al departamento de Antioquia, 6 de cada 10 personas viven dentro del Área Metropolitana del Valle de Aburrá en adelante AMVA, y el 95% de su población vive en suelo urbano ("Condiciones especiales del Valle de Aburrá", 2019). Estas condiciones de alta urbanización e industrialización han favorecido la ocurrencia de contingencias ambientales relacionadas con la calidad del aire (Aguiar *et al*, 2017). Dichas contingencias no se deben únicamente a la topografía y meteorología del lugar; la urbanización acelerada conlleva a problemáticas ambientales como la Isla de Calor Urbano (ICU), la cual trae para el entorno implicaciones directas en la calidad del aire (Martínez, 2017).

La investigación del profesor Alejandro Martínez Osorio (Martínez, 2017), mostro evidencia de que el centro de Medellín es la principal ICU del AMVA, evidenciando por ejemplo que la cantidad de edificios e industria y los pocos árboles en el centro de Medellín, fueron los forzantes que desviaron su temperatura 4°C por encima del promedio y que además, esta zona reporta frecuentemente una deficiente calidad del aire por el ascenso de contaminantes derivados del choque de vientos del sur y el norte.

Yanga *et al* (2016) señalan que los estudios sobre las islas de calor urbano han recibido especial atención de los meteorólogos urbanos, sin embargo, dado la complejidad del tema, ha habido pocas investigaciones sobre los efectos ecológicos y ambientales derivados de este fenómeno. Por tanto, las ICU, el ruido urbano y la contaminación del aire, dentro de una aglomeración urbana, se constituyen como tres desafíos para la planificación y el desarrollo de las ciudades.

De esta manera, entender el comportamiento de variables meteorológicas como la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa y la temperatura en centros urbanos, posibilita avanzar en la comprensión de cómo es la distribución de los contaminantes; contribuyendo así a encontrar respuesta a preguntas como ¿Cuál es el comportamiento de las condiciones meteorológicas superficiales del AMVA durante un periodo de contingencia ambiental como el ocurrido en los meses de marzo, abril y mayo (MAM) del año 2016?, y cuáles son las posibles implicaciones sobre la calidad del aire?. Avanzar en esta caracterización puede proporcionar información relevante que podría ser una herramienta para la prevención de futuras contingencias.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Caracterizar la meteorología superficial del AMVA durante el trimestre Marzo-Abril-Mayo de 2016, y discutir acerca sus posibles efectos sobre el transporte de contaminantes y la calidad del aire en el Valle de Aburrá.

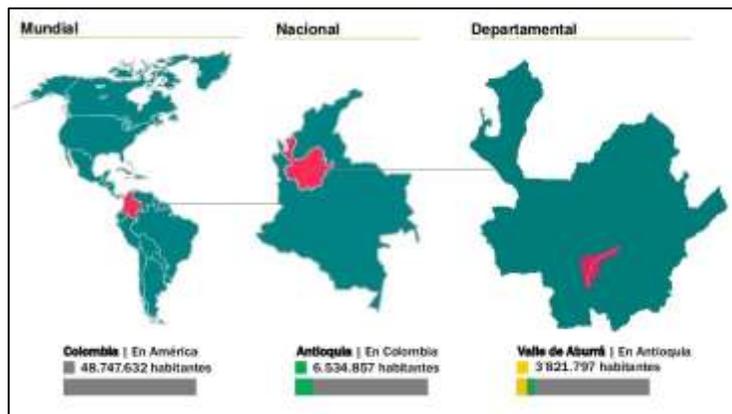
2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el comportamiento de variables meteorológicas para estaciones distribuidas a lo largo de la región de estudio, con énfasis en el análisis del trimestre Marzo-Abril-Mayo del año 2016.
- Analizar posibles relaciones entre el comportamiento de la información meteorológica y de calidad del aire en tres estaciones distribuidas en la región de estudio, para el trimestre Marzo-Abril-Mayo del año 2016.
- Caracterizar el comportamiento del material particulado (PM2.5) en relación con la meteorología local, para tres estaciones distribuidas a lo largo de la región de estudio en el trimestre Marzo-Abril-Mayo del año 2016.
- Analizar la existencia de posibles fases meteorológicas durante el trimestre Marzo-Abril-Mayo de 2016, y cómo estas fases pueden haber incidido en el comportamiento de la calidad del aire en el Valle de Aburrá.
- Discutir acerca de los posibles efectos de la ICU sobre la distribución y transporte de contaminantes en la región de estudio del Valle de Aburrá.

3. Marco teórico

3.1 Área de estudio

El Valle de Aburrá tiene una extensión de 1.165,5 km² y se despliega en el territorio de 10 municipios (Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Itagüí, Envigado, La Estrella, Sabaneta y Caldas); conteniendo la segunda aglomeración urbana más



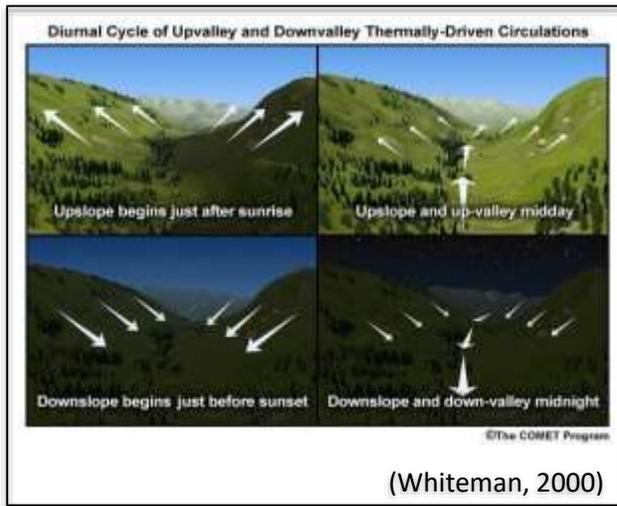
(AMVA, 2017)

grande del país con más de 3.909.676 habitantes, según las proyecciones de población al 2018 del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2005). Es así como el AMVA, en sólo una extensión del 1.8% concentra el 58.5% de la población del departamento de Antioquia (AMVA, 2018). Sumado a la alta urbanización, este Valle se ubica en una región tropical que le otorga una gran disponibilidad de humedad atmosférica, y presenta características orográficas complejas, que favorece condiciones de estabilidad atmosférica y baja ventilación. El papel combinado de los factores anteriores afecta el transporte y la dispersión de contaminantes (AMVA, 2016).

3.2 Meteorología

La intensificación de la estabilidad atmosférica y por lo tanto el debilitamiento del campo de circulación durante las temporadas de transición de temporada seca a lluviosa (típicamente en los meses de marzo-abril y octubre-noviembre), está relacionada con la aparición de capas de nubes de baja altura que limitan el paso de la radiación solar hacia la superficie, lo que posibilita la acumulación de contaminantes en los primeros metros de la atmósfera y en consecuencia la ocurrencia de episodios de concentraciones más altas

de contaminantes (AMVA, 2018). El fenómeno de estabilidad atmosférica, que en algunos casos puede significar la ocurrencia de inversión térmica, ocurre cuando la temperatura atmosférica no disminuye con la altura como es su comportamiento típico en la tropósfera, o incluso cuando una capa de aire frío se ubica debajo de una capa de aire caliente (inversión térmica), haciendo que los contaminantes no se dispersen y sean transportados a capas superiores de la atmósfera. Este fenómeno de estabilidad atmosférica generalmente está relacionado con un debilitamiento en la velocidad del viento, lo cual favorece la duración de las condiciones de retención de los contaminantes y retrasa su posterior remoción hacia la alta atmósfera (Rendon *et al*, 2014). Este efecto de retención puede propiciar además la formación de contaminantes secundarios resultado de las interacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera (AMVA, 2018).



La dispersión de los contaminantes se facilita mediante la brisa, que es un tipo de viento local que se da por la incidencia desigual de la radiación sobre el relieve, provocando diferencias en el calentamiento de la superficie terrestre y permitiendo el desarrollo del viento anabático (brisa que asciende del valle a la montaña) en horas de la mañana y viento catabático (brisa que desciende de la

montaña al valle) en horas de la tarde.

La intensidad de estos frentes depende de las variaciones térmicas entre el calentamiento diurno y el enfriamiento nocturno de la superficie del suelo, de los gradientes de temperatura entre la superficie de las laderas y la masa de aire en el centro del valle a la misma altura (Whiteman, 2000), de la orientación del complejo montañoso con respecto a la incidencia de la radiación solar y de las condiciones sinópticas predominantes en un intervalo de tiempo determinado. (IDEAM, 2017, p.28)

El cambio de la cobertura natural, principalmente por la expansión demográfica y lo que ello conlleva (más infraestructura vial y de viviendas, cambio en el albedo y las propiedades

térmicas de los materiales), sumado a disminuciones en la evapotranspiración en las áreas urbanas conducen a un fenómeno conocido como efecto de isla de calor urbano- ICU- (Wong *et al*, 2010). Las ICU son producto de la actividad humana, se caracterizan por una elevación en el nivel de temperatura en áreas urbanas comparadas con sus alrededores (Berger, 2016; Villanueva-Solis, 2003) y tienen asociado una menor humedad, aumento de la temperatura nocturna y mayor contaminación del aire (Cheng, 2010); El cambio del gradiente de temperatura, inducido por las ICU puede afectar los patrones de circulación del viento y la

intensidad de los mismos en la escala local urbana, y por lo tanto la advección efectiva de los contaminantes (Mejía, 2016).

Adicionalmente, el efecto ICU asociado con un aumento de la temperatura de la superficie en suelos urbanos, influye en el transporte de energía, ejerciendo una serie de efectos ecológicos y ambientales sobre los climas urbanos, las propiedades del suelo, los hábitos biológicos, las características de los materiales y la salud de los residentes (Yanga *et al*, 2016), con implicaciones directas en la economía, la salud pública y la calidad del aire.

Según un estudio desarrollado por Martínez (2017) el área urbana del AMVA está compuesta por 13 zonas climáticas locales distribuidas en 13 climatopos (lugares con características climáticas homogéneas); dentro de las zonas caracterizadas en este estudio se evidencio que la ICU del AMVA se encuentra localizada en el climatopo del centro y que ésta alcanza las mayores temperaturas durante los meses de marzo y septiembre. El segundo lugar más caliente de la ciudad es el climatopo Industrial, que alcanza valores de 2.5°C en el mes más caliente (febrero) y 2.1°C en el mes más frío (noviembre). De manera similar, se reporta en el estudio que los climatopos más fríos son el Suroccidental, Noroccidental y Suroriental.

Otro estudio que abarca el tema de las islas de calor urbano dentro del Valle de Aburrá es el trabajo de maestría realizado por Gisel Guzmán de la Universidad Nacional (Guzmán, 2018), en el que se elaboró un mapa de temperaturas de superficie a partir de datos del satélite Landsat (misión de la NASA), que muestra los puntos más calientes del Valle de Aburrá y encuentra “diferencias contrastantes de temperatura entre las áreas rurales y urbanas del Valle (que no son explicados por las diferencias de altura), con un aumento en zonas urbanas que en promedio excede el 30 %” . En el mismo sentido apuntó la

investigación del profesor Alejandro Martínez Osorio, quien concluyó que el aumento de 4°C en el centro de Medellín, por encima del promedio de temperatura sobre toda la subregión del Área Metropolitana, se debe en parte a la gran cantidad de edificios e industria y los pocos árboles existentes (Martínez, 2017). Una de las hipótesis por resolver, que deja el estudio de Martínez, es que la ICU afecta los campos de vientos superficiales o genera el fenómeno denominado brisa urbana, debido a la diferencia de presiones por los cambios de temperatura.

Todo lo anterior favorece la ocurrencia de episodios de contingencia ambiental, como el registrado durante los meses de MAM del año 2016, el cual se declara mediante el índice de calidad de aire (ICA) que permite conocer el grado de pureza o contaminación atmosférica desde la concentración de partículas por metro cúbico, y describe los impactos en la salud humana (AMVA, 2019).

3.3 Normatividad

El Acuerdo Metropolitano 16 de 2017 se adopta el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá 2017-2030 -PIGECA-, como Plan Estratégico para la disminución a corto, mediano y largo plazo de la contaminación atmosférica. Este Plan clasifica la Cuenca Atmosférica del Valle de Aburrá como área fuente de contaminación por material particulado menor de 2.5 micras (PM2.5). (Resolución metropolitana N° D 00-002489, 2018, p.2).

De aquí la importancia de comprender la meteorología superficial en el AMVA, dentro de un periodo de contingencia ambiental como el declarado el 17 de marzo de 2016.

Mediante el Artículo 11 del Acuerdo Metropolitano N°15 se define los niveles de contingencia atmosférica tomando como referencia la Resolución Metropolitana 2381 de 2015 que adopta niveles de contingencia atmosférica, basados en los rangos establecidos por el Índice de Calidad del Aire (ICA) que rige para el país, el cual a su vez se basa en los valores de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, Actualización 2012) y además incluye niveles de contingencia para el PM2.5 por ser el contaminante crítico en el Valle de Aburrá (AMVA, 2016). El SIATA define según la variación del ICA unos rangos en convenciones de color que son las que ayudan a declarar episodios de emergencia, así:

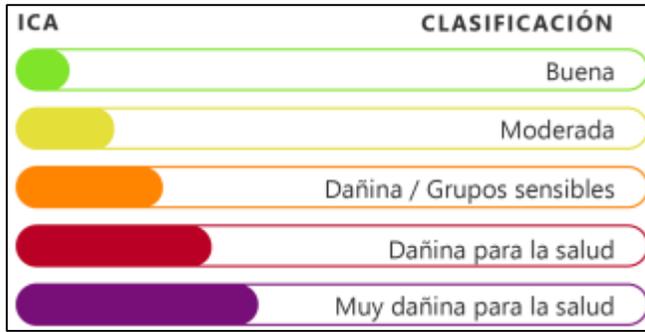


Ilustración 1 Rangos del Índice de Calidad de Aire

Para enfrentar estos episodios de contaminación se formula el Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de contaminación Atmosférica -POECA- en el cual se establecen los roles y las actividades de los involucrados en su ejecución, así como las acciones a llevar a cabo para mejorar los índices de calidad del aire (ICA) dentro del valle (AMVA, 2016). El Protocolo se enfoca en la gestión de episodios de contaminación por PM10, PM2.5 y O3, para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en la **Tabla 1** se establecen los niveles de contingencia atmosférica, según la concentración de PM10, PM2.5 y O3 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y los valores adimensionales del ICA.

Tabla 1 Niveles de contingencia atmosférica para PM10, PM2.5 y O3 (PIGECA, 2017)

Contaminante	Tiempo de Exposición	Unidad	Niveles de contingencia en los valores adimensionales del ICA y en concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
			Alerta naranja	Alerta roja Fase I	Alerta roja Fase II	Emergencia
PM10	24 horas	Adimensional	101 - 150	151 - 177	178-200	≥ 201
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	155 - 254	255-308	309-354	≥ 355
PM2.5	24 horas	Adimensional	101 - 150	151 - 177	178-200	≥ 201
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	35,5 - 55,4	55,5-105,9	106-150,4	$\geq 150,5$
O ₃	1 hora	Adimensional	101 - 150	151 - 177	178-200	≥ 201
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	246 - 323	324-365	366-401	≥ 402

Tomando en cuenta lo anterior, en el Valle de Aburrá, se ha llevado a cabo un análisis del comportamiento histórico y tendencias de la contaminación atmosférica, con base en las mediciones registradas por la red de monitoreo atmosférico operada actualmente por el SIATA (PIGECA, 2017) en los cuales queda en evidencia que los problemas de calidad del aire en el AMVA se derivan, principalmente, de las actividades humanas, como las

emisiones producto de la quema de combustibles fósiles, la sobrepoblación y el cambio de cobertura vegetal.

4. Metodología

4.1 Selección de la muestra

Para caracterizar el comportamiento meteorológico superficial del Valle de Aburrá y su posible relación con las condiciones de calidad del aire, las variables de análisis del presente estudio fueron viento (dirección y velocidad), temperatura, humedad relativa y material particulado de 2.5 micras (PM2.5). Las variables meteorológicas se evaluaron en doce estaciones distribuidas a lo largo del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en Antioquia, Colombia (ver **Ilustración 2**), que tuvieran datos de las tres variables y que fueron obtenidas de la red meteorológica del SIATA (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y El Valle de Aburrá). Los registros tienen una resolución temporal minutil para el trimestre marzo-abril-mayo de 2016 para las variables temperatura y viento; y de los meses marzo-abril para la variable humedad relativa. En cuanto a las estaciones de calidad de aire se tomaron tres estaciones ubicadas a lo largo del Valle, una al norte, y otras dos al centro y sur del valle, respectivamente (ver **Ilustración 4**). Como se mencionó, los análisis para esta información se realizaron dentro del mes en el cual se declaró contingencia ambiental (del 17 de marzo al 18 de abril), con el fin de analizar más detalladamente el comportamiento de las variables en esa ventana de tiempo y en el área de influencia de la ICU.

Todos los emplazamientos de las estaciones meteorológicas están situados sobre torres que varían de 3 a 12 metros en altura localizadas en el territorio al interior del Valle, a excepción de la estación 205 situada a 30 metros del suelo y por fuera del Valle en el

corregimiento de Santa Elena. Se considera que dada la ubicación, esta estación representa las condiciones de mesoescala en la región por no tener alguna influencia de las características de superficie de las zonas urbanas.

4.2 Análisis de los datos

El procesamiento de la información se trabajó mediante software libre: para la validación y organización de las bases de datos se utilizó el lenguaje de programación Python, el análisis de datos fue realizado mediante estadística descriptiva con el software estadístico R por medio de gráficos que evidencian el ciclo diurno de las variables temperatura, humedad relativa y velocidad del viento; adicionalmente, para la visualización de la dirección del viento se generaron rosas de viento con el software WRPLOT (*ver Anexo: Rosas de viento*).

Dado que la medición del viento, la temperatura y la humedad relativa se realiza mediante equipos que involucran incertidumbre y errores de medición, la presencia de datos faltantes es inherente a este tipo de datos; por tal motivo, luego de llevar la escala de tiempo de minutos a horas, se saca el promedio de la hora de todos los días siempre y cuando la serie contenga más del 70% de datos; si la cantidad de datos faltantes (NA) es superior al 30% no se tiene en cuenta esa hora.



Ilustración 2 Región de estudio Área metropolitana del Valle de Aburrá, Antioquia, Colombia. Con las respectivas estaciones meteorológicas desde donde se obtiene la información de las variables viento, temperatura y humedad relativa.

4.3 Diseño de la investigación

La investigación consta de tres fases/etapas. Con el fin de conocer el comportamiento meteorológico general para el valle durante el trimestre de estudio; primero se generan ciclos diurnos, valores máximos, valores mínimos y valores promedios de las variables temperatura, humedad relativa, y velocidad y dirección del viento en las 12 estaciones ubicadas a lo largo del Valle de Aburra. Estas estaciones se agrupan de acuerdo a su altura sobre el nivel del mar en: Municipios del norte, Centro del Valle y Municipios del sur y laderas (ver **Ilustración 3**), y es ese sentido se hace el análisis independiente de cada variable. La clasificación Centro del Valle (en amarillo) corresponde a las estaciones localizadas en el centro de Medellín entre los 1460 y 1490 m.s.n.m; Norte corresponde a las localizadas a una altura entre 1335 y 1460 m.s.n.m (en naranja); Sur del valle y laderas (en azul) a las localizadas a una altura entre 1661 y 2383 m.s.n.m; y la estación Santa Elena que representa las condiciones de mesoescala (en verde) localizada a 2776 m.s.n.m.



Ilustración 3 Clasificación de las estaciones meteorológicas por ubicación y altura sobre el nivel del mar. Centro del Valle (amarillo), Norte (naranja), Sur y laderas (azul) y Santa Elena (verde).

Posteriormente, se toma una estación ubicada en el centro del Valle para realizar el análisis combinado de variables meteorológicas acerca de la influencia de la ICU. Finalmente, por medio de medidas de tendencia central y dispersión, series de tiempo, ciclos diurnos, pruebas de tendencia, correlaciones, espectros de potencia y Onditas, se involucra la variable de calidad del aire PM 2.5 en tres estaciones del Valle ubicadas al norte, centro y sur; con su respectiva estación meteorológica (ver **Ilustración 4**), en un periodo de estudio comprendido por las últimas dos semanas de marzo y las dos primeras de abril (mes de contingencia ambiental).

4.3.1 Variable PM2.5

Para involucrar análisis de información de calidad de aire, se trabaja con datos pertenecientes a 3 variables: temperatura (°C), velocidad del viento (m/s) y concentración de PM2.5 (ppm) en las tres estaciones seleccionadas. Estas estaciones se localizan alrededor de tres zonas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (centro de Medellín, Caldas y Barbosa). En la **Tabla 2** se relacionan los números de estación, ubicación y tipo de medición.

Tabla 2 Estaciones de estudio, tipo de datos y su ubicación geográfica.

CÓDIGO	ESTACIÓN	VARIABLE	LONGITUD	LATITUD	CIUDAD
3	Girardota - S.O.S Aburrá Norte	PM 2.5	-75,45091	6,37904	Girardota
12	Estación Tráfico Centro	PM 2.5	-75,56958	6,25256	Medellín
31	Caldas - Corp. Univ. Lasallista	PM 2.5	-75,63863	6,09908	Caldas
82	Parque 3 Aguas	Temperatura y vel. del viento	-75,32722	6,443498	Barbosa
105	3 aguas - Nivel	Temperatura y vel. del viento	-75,63536	6,09628	Caldas
202	AMVA	Temperatura y vel. del viento	-75,57430	6,24215	Medellín

Es pertinente aclarar que los datos de material particulado no provienen de la misma estación de donde se obtienen los datos de temperatura y velocidad del viento (ver **Ilustración 4**). Para realizar el análisis se escogen las estaciones más cercanas posible con el fin de relacionar estas tres variables con la información de PM2.5 durante el periodo de estudio. De acuerdo con esto, la estación norte corresponde a las estaciones 82 y 3, la estación centro a las estaciones 202 y 12, y la estación sur a las estaciones 105 y 31, estación meteorológica y estaciones de calidad del aire, respectivamente.

Todos los datos de las variables son obtenidos del SIATA, los datos de temperatura y velocidad del viento son datos minútales, mientras que los de concentración de PM2.5 son horarios. Para manejar las variables en la misma escala de tiempo, se lleva toda la información a la escala de días.

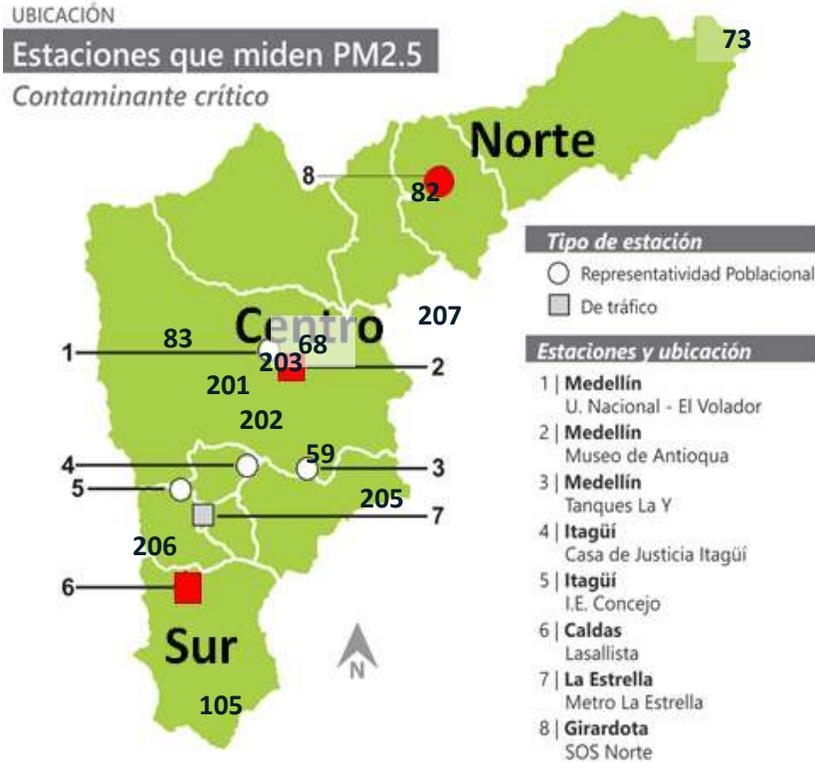


Ilustración 4 Distribución de las estaciones de material particulado PM2.5 (en rojo) alrededor de las estaciones meteorológicas analizadas (en recuadro blanco) para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Adaptado de AMVA, 2017.

Para el manejo de los datos faltantes, se procede en convertir estos a NA en R y dado que ningún archivo representa un alto porcentaje de datos faltantes (ver **Tabla 3**), estos son reemplazados en el vector de horas como el promedio de la hora a la que correspondía el dato. Por ejemplo, si el dato correspondiente a las 05:00 am del día 6 de abril es NA se reemplaza por el promedio de los datos que no son NA de la hora 05:00 am.

Tabla 3 Porcentaje de datos faltantes en los archivos de trabajo del periodo de contingencia ambiental.

CÓDIGO	CIUDAD	VARIABLE	% FALTANTE
3	Girardota	PM 2.5	0,74
12	Medellín	PM 2.5	0,56
31	Caldas	PM 2.5	0,30
82	Barbosa	Temperatura y vel. del viento	12,28
105	Caldas	Temperatura y vel. del viento	0,10
202	Medellín	Temperatura y vel. del viento	5,91

Una vez organizada la información en series horarias, se obtienen las series de tiempo, los estadísticos básicos: media, mediana, desviación estándar y el rango, para cada estación (ver **Tabla 7**). Seguido de esto, se obtiene el ciclo diurno para cada variable de cada estación como el promedio de todos los datos con una misma hora (24 datos), el cual se utiliza para remover el efecto del día en la serie de tiempo horaria, para posteriormente graficar un espectro de potencias.

Se calculan las correlaciones entre la temperatura-PM2.5, viento-PM2.5 y humedad relativa-PM2.5 por medio de Coherency wavelet (coherencia Onditas), que es una herramienta análoga a la correlación, apropiada para (i) comparar los contenidos de frecuencia de dos series de tiempo sin depender de las unidades de medida (ii) sacar conclusiones sobre la sincronicidad de la serie en ciertos períodos y a través de ciertos rangos de tiempo (Rosch & Schmidbauer, 2018). La coherencia Onditas de dos series de tiempo (xt) y (yt) permite ver si la relación entre las variables es directa (en fase) o inversa (fuera de fase) y cuál de las dos predomina sobre la otra, para un momento. En la **Ilustración 5** se muestra cómo se ve la diferencia de fase según la posición de las flechas.

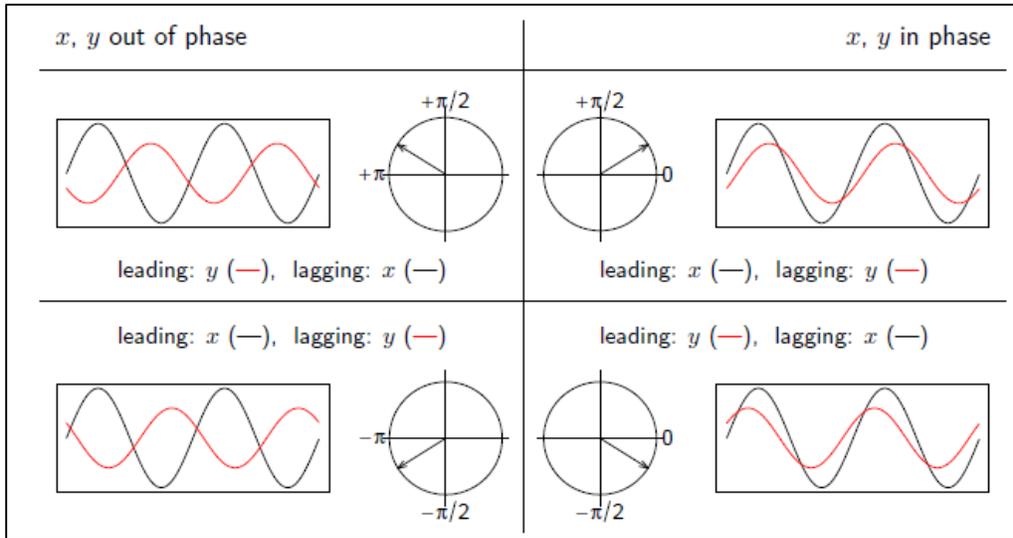


Ilustración 5 Diferencias de fase y su interpretación en Coherencia Onditas.

Finalmente, se discute acerca del comportamiento del campo de circulación a lo largo del ciclo diurno para las estaciones con suficiente información y finalmente se analiza el posible efecto de la ICU sobre la circulación y el transporte de contaminantes en el AMVA.

5. Resultados y análisis

La forma en la cual se presenta la información a continuación concuerda con lo enunciado en el numeral **4.3 Diseño de la investigación**. Tres etapas que van de lo general a lo particular. Primero los resultados y análisis de las variables meteorológicas para todo el valle, luego el análisis combinado de variables sobre una estación dentro de la influencia de la ICU y, por último, se involucra la variable de calidad del aire PM_{2.5}.

5.1 Análisis Meteorológico

5.1.1 Condiciones meteorológicas en todo el Valle

De los análisis, se encuentra que los valores más altos en humedad y velocidad del viento corresponden a la estación Sta. Elena (205) que representa las condiciones de mesoescala de la región, y que a su vez registra los valores más bajos de temperatura (ver **Tabla 4**), dado que el emplazamiento de esta estación se encuentra aproximadamente 1000 metros por encima de la ubicación promedio de las demás estaciones involucradas en los análisis.

Las direcciones del viento son, para la estación 205 predominantemente del SE como se muestra en la **Figura 1**, con componente marcado desde el Este en horas de la tarde (panel noche-Figura 1) y del Sur en horas de la mañana (panel día-Figura 1) para el mes de marzo y abril. Para el mes de mayo, la dirección predominante es del SE, con un componente marcado desde el Sur durante todo el día. Según la clasificación en la escala de Beaufort (Beaufort scale, 1955), los vientos son predominantemente “Bonacibles” (Brisa moderada) y alcanzan la denominación “Fresco” (Brisa fuerte), que dentro del promedio de velocidades de viento para el valle se consideran velocidades altas.

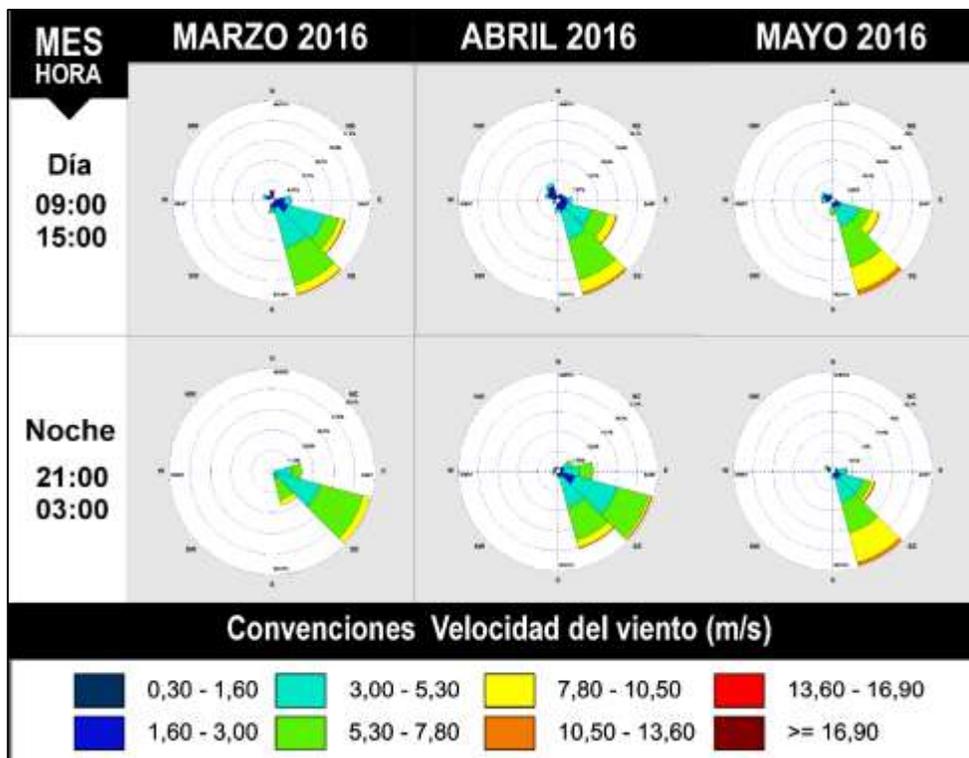


Figura 1 Rosas de vientos (día-noche) de la estación 205 en el trimestre de estudio.

En la **Tabla 4** se presentan los valores máximos y mínimos de las variables meteorológicas y de esta se puede deducir que el centro del Valle (ver **Ilustración 2**), registra los valores más altos de temperatura y más bajos de humedad, mientras que los valores más bajos en la velocidad del viento se dan en la estación 207 (Vivero EPM Piedras Blancas).

Tabla 4 Valores promedios máximos y mínimos de las variables humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, para todas las estaciones de estudio.

Variables/Mes	Máximo	Estación	Mínimo	Estación	Promedio
Humedad (%)					
Marzo	96.39	205	35.74	202	66.13
Abril	95.08	205	45.18	201	70.91
Mayo	Sin información				
Temperatura (°C)					
Marzo	29.30	203	11.35	205	21.10
Abril	26.82	203	11.45	205	19.87
Mayo	27.28	203	11.33	205	20.20
Velocidad Viento (m/s)					
Marzo	6.10	205	0.50	207	2.24
Abril	5.24	205	0.55	207	2.04
Mayo	5.96	205	0.58	207	1.91
Convenciones					
Municipios del norte (base)			Municipios del sur y laderas		
Centro del Valle (base)			Estación Santa Elena-Radar		

5.1.2 Condiciones meteorológicas dentro del Valle

Con el fin de analizar las condiciones específicas dentro del Valle, se calcularon los valores máximos y mínimos excluyendo las estaciones con mayor altura sobre el nivel del mar (ver **Tabla 5**), que corresponden a las estaciones 205 (Santa Elena) y 207 (Vivero EPM Piedras Blancas), con una altura de 2776 y 2386 m.s.n.m respectivamente. De esta manera, se encuentra que los valores máximos de humedad relativa se presentan sobre la estación más al sur del valle para el mes de marzo y más al norte para el mes de abril.

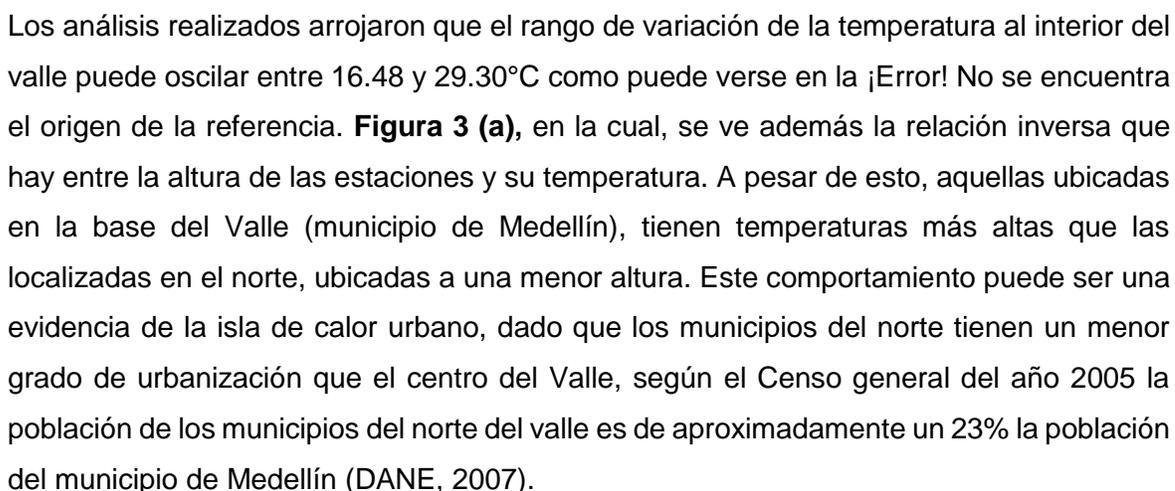
Sobre la ladera occidental se encuentran los valores mínimos en temperatura y velocidad del viento para el periodo analizado, con excepción del mes de abril, mes en el cual el valor mínimo de la variable velocidad del viento se encuentra sobre la estación 82 (en el extremo norte).

Los valores máximos en temperatura y velocidad del viento se encuentran en el centro del valle, con excepción del mes de marzo, mes en el cual, el valor máximo de la velocidad del viento se encuentra sobre la estación 73 (al norte del valle).

Tabla 5 Valores promedios máximos y mínimos de las variables humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, para todas las estaciones de estudio con excepción de las estaciones Santa Elena (205) y Vivero EPM Piedras Blancas (207).

Variables/Mes	Máximo	Estación	Mínimo	Estación	Promedio
Humedad (%)					
Marzo	83.74	105	35.74	202	62.72
Abril	86.01	82	45.18	201	68.00
Mayo	Sin información				
Temperatura (°C)					
Marzo	29.30	203	16.69	105	22.53
Abril	26.82	203	16.86	83	21.15
Mayo	27.28	203	16.49	105	21.32
Velocidad Viento (m/s)					
Marzo	4.52	73	0.75	206	2.03
Abril	4.21	201	0.73	82	1.86
Mayo	3.85	201	0.67	206	1.66
Convenciones					
Municipios del norte (base)			Municipios del sur y laderas		
Centro del Valle (base)			Estación Santa Elena-Radar		

5.1.2.1 Temperatura

Los análisis realizados arrojaron que el rango de variación de la temperatura al interior del valle puede oscilar entre 16.48 y 29.30°C como puede verse en la . No se encuentra el origen de la referencia. **Figura 3 (a)**, en la cual, se ve además la relación inversa que hay entre la altura de las estaciones y su temperatura. A pesar de esto, aquellas ubicadas en la base del Valle (municipio de Medellín), tienen temperaturas más altas que las localizadas en el norte, ubicadas a una menor altura. Este comportamiento puede ser una evidencia de la isla de calor urbano, dado que los municipios del norte tienen un menor grado de urbanización que el centro del Valle, según el Censo general del año 2005 la población de los municipios del norte del valle es de aproximadamente un 23% la población del municipio de Medellín (DANE, 2007).

El ciclo diurno de temperatura (ver **Figura 3 (a)**) en general presenta valores mínimos en la madrugada. A partir de las 6:00 am comienza un aumento hasta alcanzar su valor

máximo entre la 1 y 2 de la tarde, para empezar a descender nuevamente alrededor de las 4:00 pm con una tasa de enfriamiento más lenta en la noche que la tasa de calentamiento del aire en la mañana. Este comportamiento en las horas de la tarde puede relacionarse con que los materiales y las dinámicas típicas de la ciudad, ocasionan que la disminución de la temperatura ocurra más despacio en el tiempo en comparación con su aumento en las horas de la mañana, comportamiento relacionado con la ocurrencia del fenómeno ICU.

5.1.2.2 Humedad relativa

El rango de humedad relativa se encuentra entre 35.74 y 86%, con los valores más bajos sobre el centro del valle (ver **Figura 3 (b)**), que corresponden a las estaciones con mayor temperatura; este comportamiento se presenta debido a que por un lado, al aumentar la temperatura incrementa la capacidad de la atmósfera para contener vapor de agua, lo cual disminuye el grado de saturación del aire (IDEAM, 2017), y por otro lado debido al tipo de materiales propios del centro de la ciudad, la liberación del calor latente a lo largo del día es menor en comparación con otras estaciones, lo que se asocia con valores de la relación de Bowen mayores, lo que típicamente está relacionado con valores menores de evapotranspiración y mayores valores de la temperatura superficial.

La influencia de la radiación en la respuesta de esta variable se puede observar en su ciclo diurno, donde aproximadamente a las 6am comienza a descender el porcentaje de humedad relativa hasta las 1-2pm, momento en el cual inicia el aumento del porcentaje hasta alrededor de las 8pm, donde se estabiliza. Lo cual evidencia la relación inversa de esta variable con la temperatura.

5.1.2.3 Viento

El rango de valores de la variable velocidad de viento se encuentra entre 0.73 y 3.84 m/s (Brisa muy débil a Brisa débil en la escala de Beaufort), con las mayores velocidades en el centro del valle en los meses de abril y mayo. Para el mes de marzo el valor máximo se encontró al norte del valle. Lo anterior se puede explicar en términos de que la influencia de la isla de calor urbana en el centro del Valle genera vientos catabáticos por el impulso de la circulación de la alta presión (cima de la montaña) hacia el valle (baja presión). En la **Figura 2** se presentan las rosas de viento del trimestre de estudio para una estación al

centro del Valle (AMVA); que da cuenta que la dirección de los vientos tanto en la mañana como en la tarde provienen principalmente del norte. Puede verse de la figura que durante el día aparecen vientos desde el noreste y que durante la noche todos son predominantemente del noroeste. Este comportamiento puede dar señales tanto de efectos de vientos de valle durante el día, es decir efectos de circulaciones regionales por cuenta de la ZCIT (Zona de convergencia intertropical), como de vientos de ladera durante la noche por efectos de la ICU.

Las estaciones del centro del Valle tienen un ciclo diurno similar, en el cual vienen con una velocidad alta del día anterior y llegada la madrugada ésta descende hasta las 5am aproximadamente, momento en el cual comienza a haber un aumento de la magnitud hasta aproximadamente las 3pm y de ahí comienza un descenso paulatino, que refleja la influencia que tiene el ciclo diurno de la temperatura sobre esta variable.

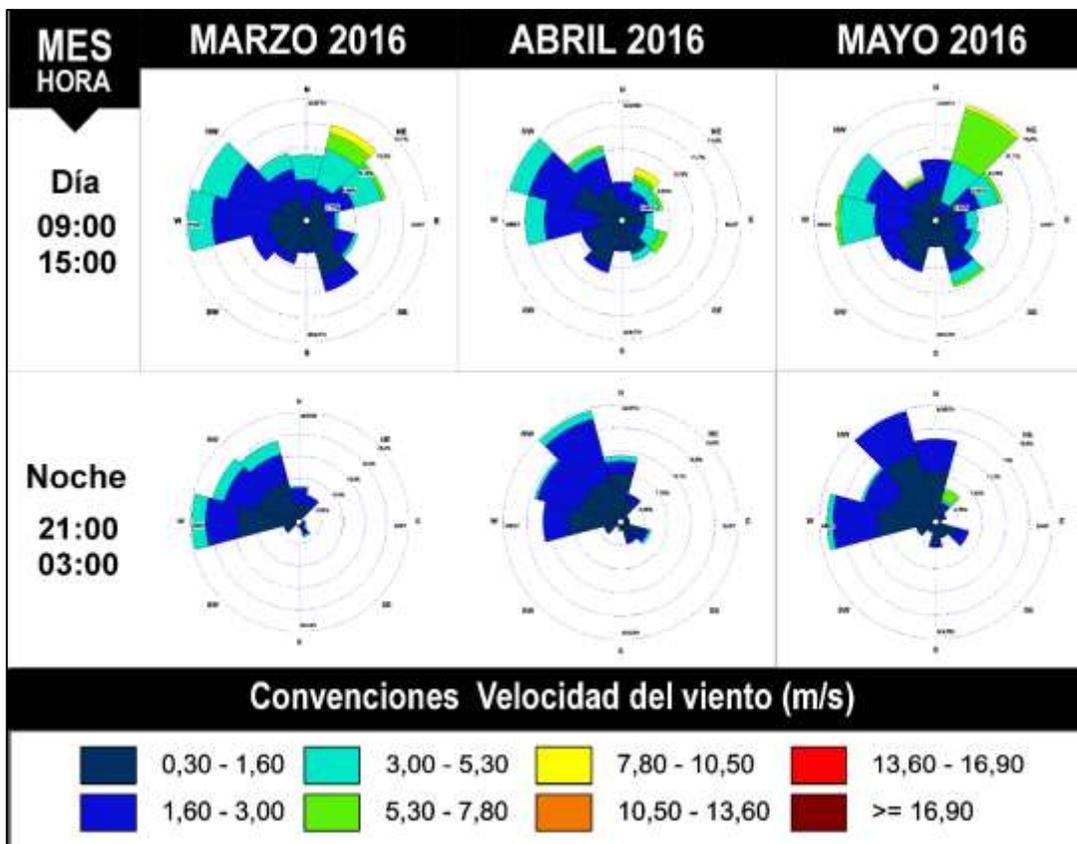
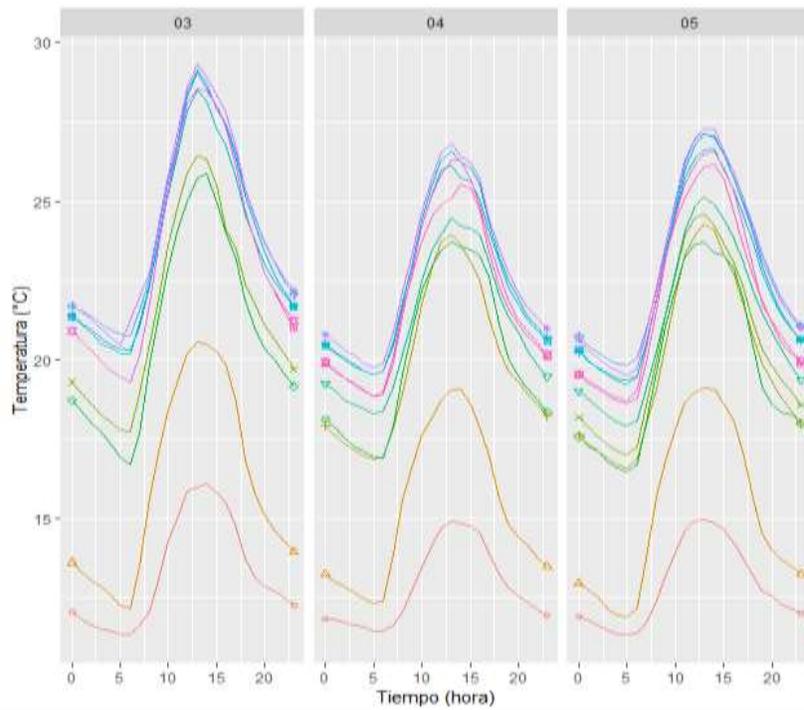
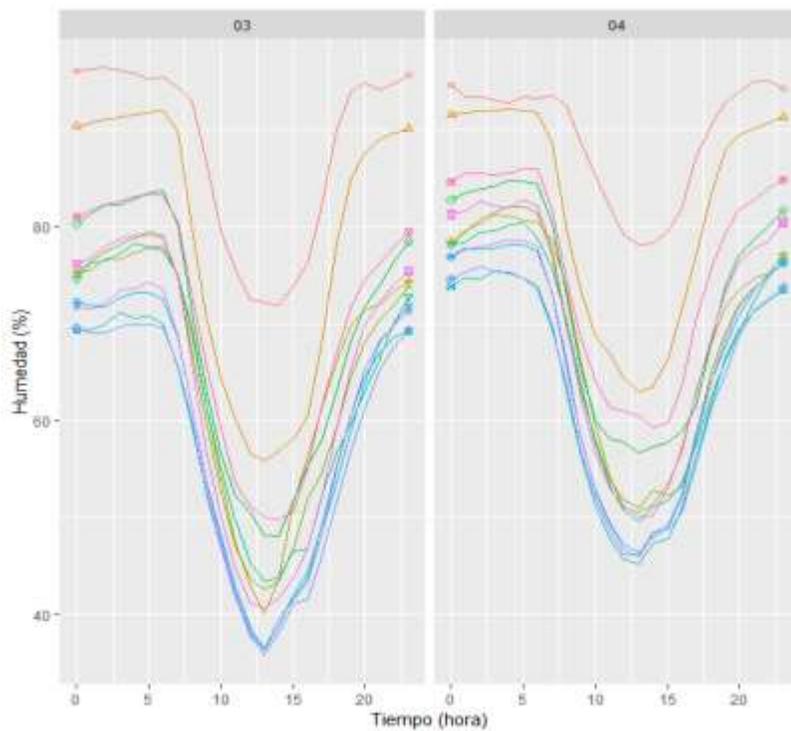


Figura 2 Rosa de vientos (día-noche) de la estación 202-AMVA.

(a) Ciclo diario de temperatura -AMVA- MAM 2016



(b) Ciclo diario de humedad relativa -AMVA- MAM 2016



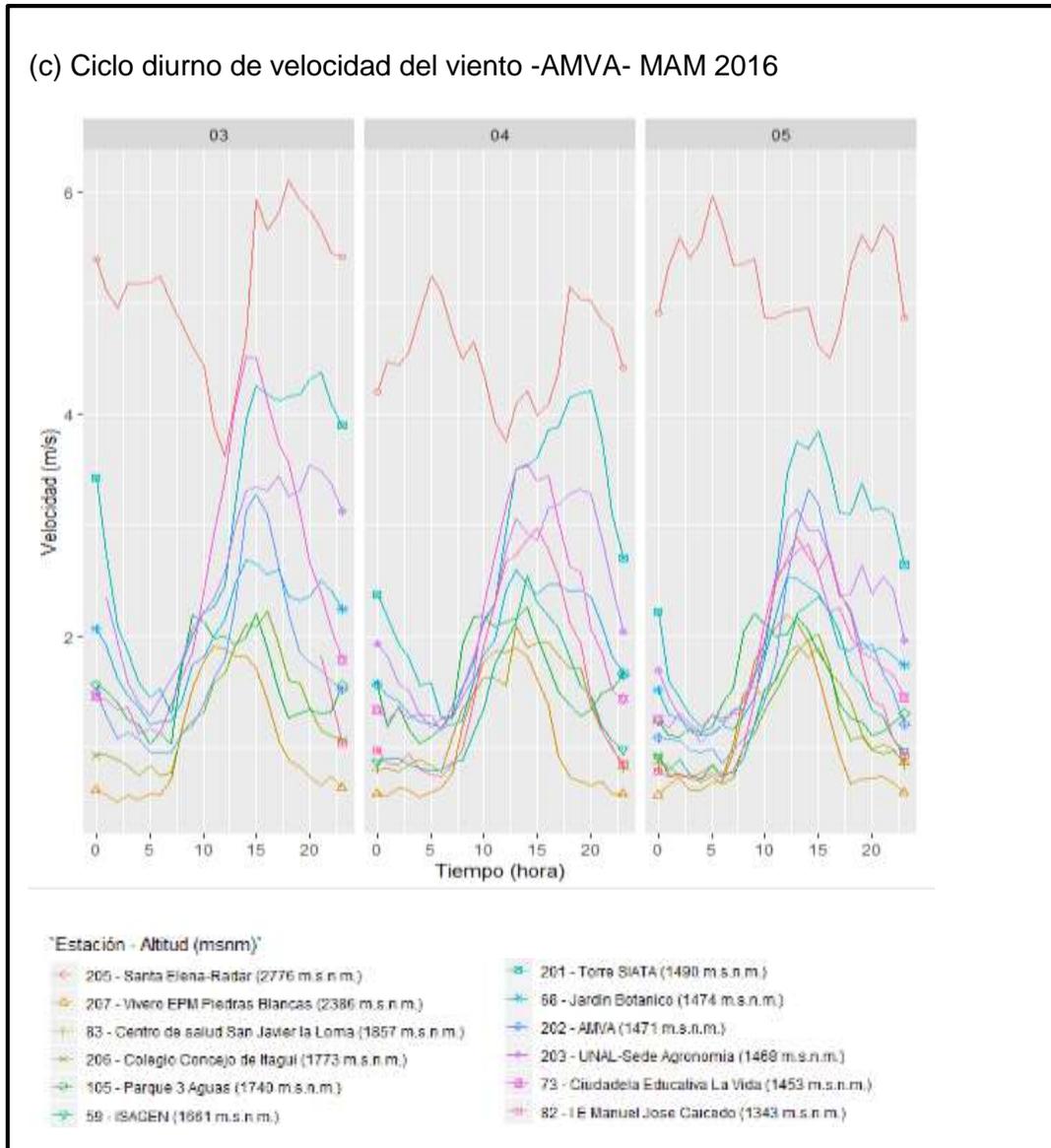


Figura 3 Ciclos diarios de temperatura (a), humedad relativa (b) y velocidad del viento (c) de las estaciones meteorológicas de la red de monitoreo SIATA, para el trimestre marzo (03), abril (04), mayo (05) del 2016. El orden en colores está dado por la altura.

5.2 Caso de estudio: Estación meteorológica 68 -Jardín Botánico-

El comportamiento combinado de las variables pes muy similar en todas las estaciones, con variaciones en las magnitudes y no tanto en la forma en la cual se relacionan las

variables. Para ejemplificar este comportamiento, se toman los resultados de la estación 68 (Jardín Botánico).

De los análisis puede decirse que la estación 68, pasó de tener un promedio de humedad relativa del 73.18% al 78.22% entre marzo y abril de 2016. En particular, el máximo valor de esta variable se reporta a las 4 de la mañana y el mínimo a la 1pm en ambos meses (ver Lo anterior concuerda con el comportamiento de la temperatura, donde los valores máximos para los tres meses se dan a la 1pm y los valores mínimos entre las 5-6am, evidenciando la relación inversa de estas variables (ver *Anexos*

Anexo: Ciclos diurnos).

Tabla 6). Lo anterior concuerda con el comportamiento de la temperatura, donde los valores máximos para los tres meses se dan a la 1pm y los valores mínimos entre las 5-6am, evidenciando la relación inversa de estas variables (ver *Anexos*

Anexo: Ciclos diurnos).

Tabla 6 Valores promedios máximos y mínimos de las variables humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, para toda la estación 68 (Jardín Botánico)

Estación 68 (Jardín Botánico)					
Variables/Mes	Máximo	Hora	Mínimo	Hora	Promedio
Humedad (%)					
Marzo	73.18	4	36.43	13	59.01
Abril	78.22	4	46.32	13	65.49
Mayo	Sin información				
Temperatura (°C)					
Marzo	29.07	13	20.30	6	23.82
Abril	26.56	13	19.54	5	22.52
Mayo	27.08	13	19.36	5	22.69
Velocidad Viento (m/s)					
Marzo	2.69	14	1.21	5	2.01
Marzo	2.60	13	1.18	6	1.87
Marzo	2.53	12	1.11	4	1.74

Por otro lado, se aprecia una relación entre el comportamiento de la temperatura y la velocidad del viento. Se resalta que la tasa a la cual la velocidad del viento aumenta respecto a la temperatura es directamente proporcional, siendo más rápido su incremento

en la mañana que su descenso en la tarde. Después de la 1pm cuando comienza a disminuir la temperatura, la velocidad del viento disminuye con dos aumentos leves a las 4 y 6pm que concuerdan con el inicio de la hora pico de la tarde en la ciudad, es decir que en estas horas aumentan las emisiones generadas como resultado de la finalización de la jornada laboral. Este comportamiento podría reflejar una afectación momentánea del campo de circulación por cuenta del aumento en las emisiones desde la superficie.

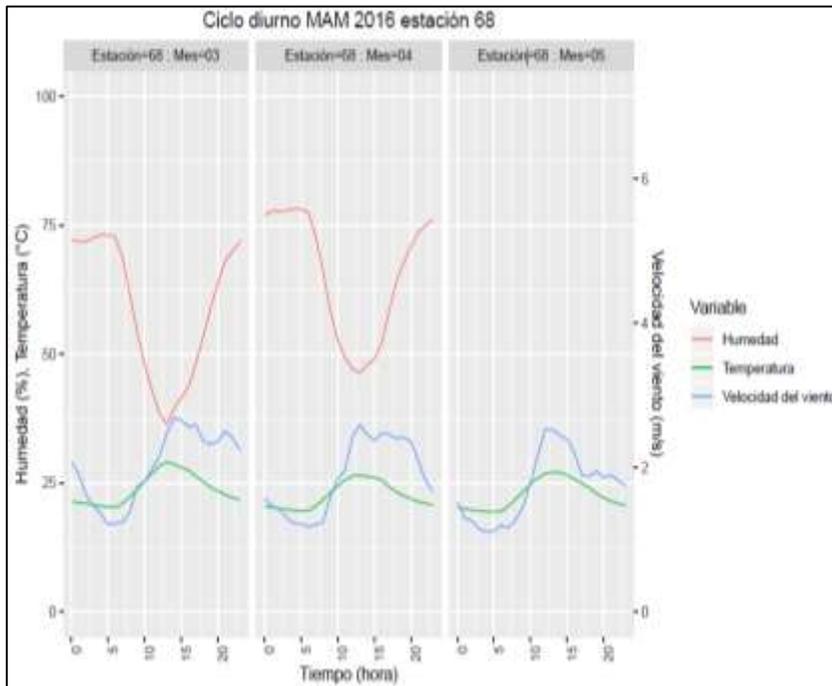


Figura 4 Ciclo diario combinado de las variables meteorológicas para la estación 68 (Jardín Botánico).

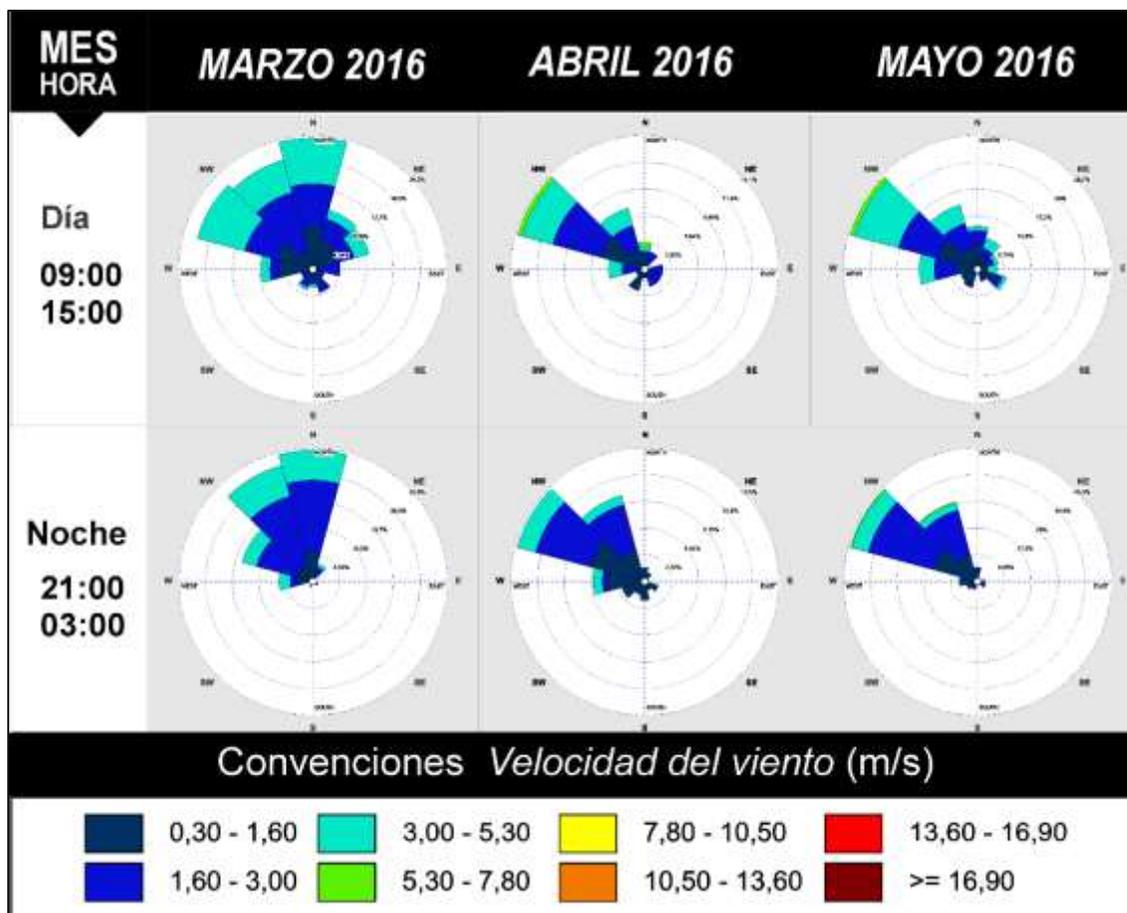


Figura 5 Rosa de vientos (día-noche) de la estación 68

5.3 Meteorología y Calidad del aire: periodo de contingencia ambiental.

A continuación, se presentan los resultados del análisis realizado en tres puntos a lo largo del Valle de Aburrá, con el fin de analizar la influencia que las variables meteorológicas pueden tener sobre la calidad del aire. Para este análisis se utilizó información del 20 de marzo al 16 de abril.

Con el fin de ver el comportamiento general de los datos, se sacan los estadísticos (ver **Tabla 6**) media, mediana, desviación estándar y rango; que se obtienen a partir de los datos horarios. Variables como la temperatura y PM 2.5 se ven muy influenciados por sus correspondientes ciclos diurnos, tal como se evidencia en el rango (ver **Tabla 6**). Otro aspecto importante en el rango de la variable PM 2.5, es que su magnitud evidencia que se presentaron valores por encima de la normatividad vigente del 2016 (25 ppm diarias y

50 ppm anual), ya que el rango representa el valor mayor menos el menor de la serie de tiempo. Por otro lado, se presentan valores similares entre las medias y medianas de temperatura y velocidad del viento para las tres estaciones, como puede verse en **Tabla 6**, para el caso de PM 2.5 no, lo cual se refleja en su desviación.

De manera comparativa, no se encuentra a simple vista una relación aparente entre las variables por estación, por tal razón se desarrollan otros métodos estadísticos que permitan analizar si hay relaciones de causalidad o de ocurrencia entre las variables.

Tabla 7 Medidas de locación y dispersión para todas las variables y estaciones en el periodo de estudio.

Estación	Variable	Medidas de locación		Medidas de dispersión	
		Media	Mediana	Desviación	Rango
Norte	T (°C)	22,134	21,410	2,998	14,925
	Viento (m/s)	1,655	1,155	1,091	4,414
	PM2.5 (ppm)	40,061	35	23,190	128
Centro	T (°C)	23,473	22,651	3,193	12,997
	Viento (m/s)	1,645	1,416	0,963	6,265
	PM2.5 (ppm)	53,888	50	21,665	113
Sur	T (°C)	19,732	19,261	3,874	27,297
	Viento (m/s)	1,699	1,488	0,828	4,517
	PM2.5 (ppm)	48,643	45	21,543	181

5.3.1 Series de tiempo horarias

Se representan las series de tiempo horarias de las tres variables de las estaciones norte, centro y sur (**Figura 6**, **Figura 7** y **Figura 8** respectivamente). De manera general, es posible ver un marcado ciclo diurno en el comportamiento de las variables meteorológicas de temperatura y velocidad del viento. Este comportamiento parece no ser tan marcado para la serie de PM2.5, que muestra más bien un ciclo que alcanza la escala temporal de semanas. Para esta serie parece ser más relevante el aumento en las concentraciones durante las dos primeras semanas y una disminución en las dos semanas siguientes, alcanzando al final del periodo valores alrededor de 50 ppm aproximadamente. Este comportamiento diferencial entre las variables meteorológicas y la serie de PM2.5 parece ser consistente en las tres estaciones analizadas. De manera más específica, se encuentra una relación más marcada entre la variabilidad diurna de las series de las variables

meteorológicas en la estación norte (**Figura 6**), en comparación con las otras dos estaciones (**Figura 7** y **Figura 8**).

Por otro lado, respecto a la estación norte, entre el 27 y 29 de marzo no hay reporte en los valores de temperatura y velocidad del viento, por esta razón estos días son reemplazados por los ciclos diarios promedio de la serie de tiempo de su respectiva variable. Esta decisión se toma, en primera instancia, considerando que el periodo de interés de este estudio corresponde al momento en el que se declara la contingencia ambiental del año 2016. Y en segunda instancia, porque es la única estación en donde se presentan datos faltantes consecutivos, por lo que se puede complementar el análisis con las otras estaciones.

Del comportamiento en estas tres estaciones, se resalta que, aunque es evidente la naturaleza diaria en el comportamiento de la temperatura y velocidad del viento, la serie de concentraciones de PM_{2.5} muestra un comportamiento semanal creciente durante las primeras dos semanas y decreciente durante las dos últimas. Esto puede estar relacionado con condiciones de mesoescala o con que en los primeros días de Abril se comenzó con los protocolos de pico y placa ambiental por deterioros en la calidad del aire en el Valle. Se resalta además que el comportamiento de PM_{2.5} es similar a lo largo del periodo para las tres estaciones, exhibiendo una tendencia creciente en el primer tramo de la muestra y decreciente al final de la muestra, lo que puede explicarse en términos de efectos de mayor escala temporal a la diaria, sobre la concentración de contaminantes en el Valle.

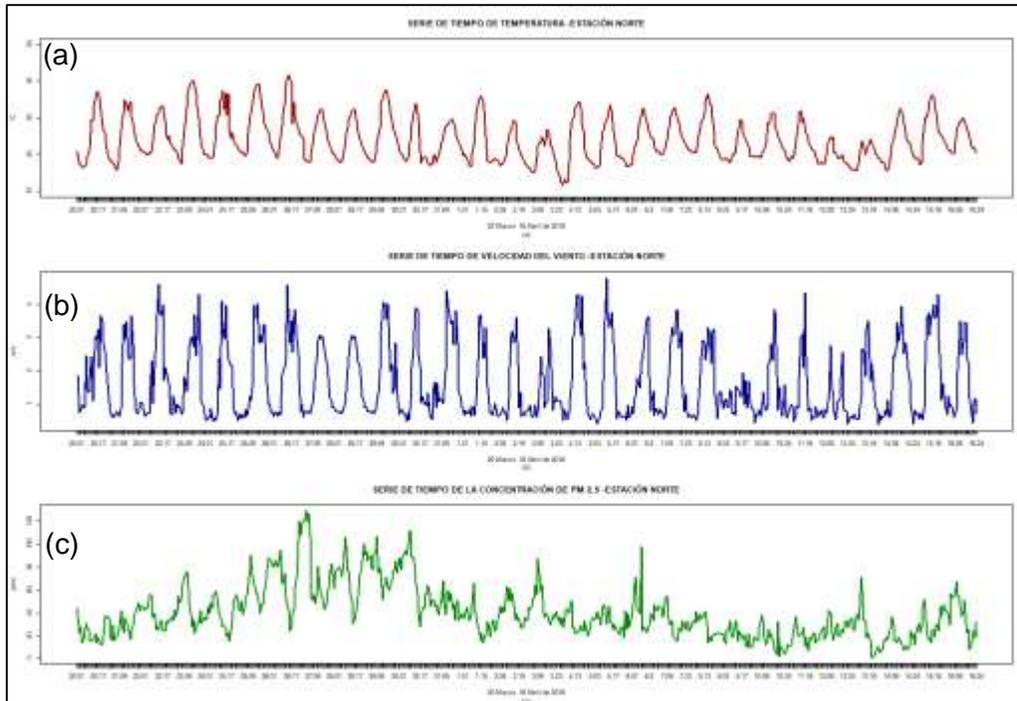


Figura 6 Series de tiempo de (a) Temperatura, (b) Velocidad del viento, (c) Concentración de PM_{2.5} para la estación norte. En el eje x, los números antes del punto representan el día, los demás la hora.

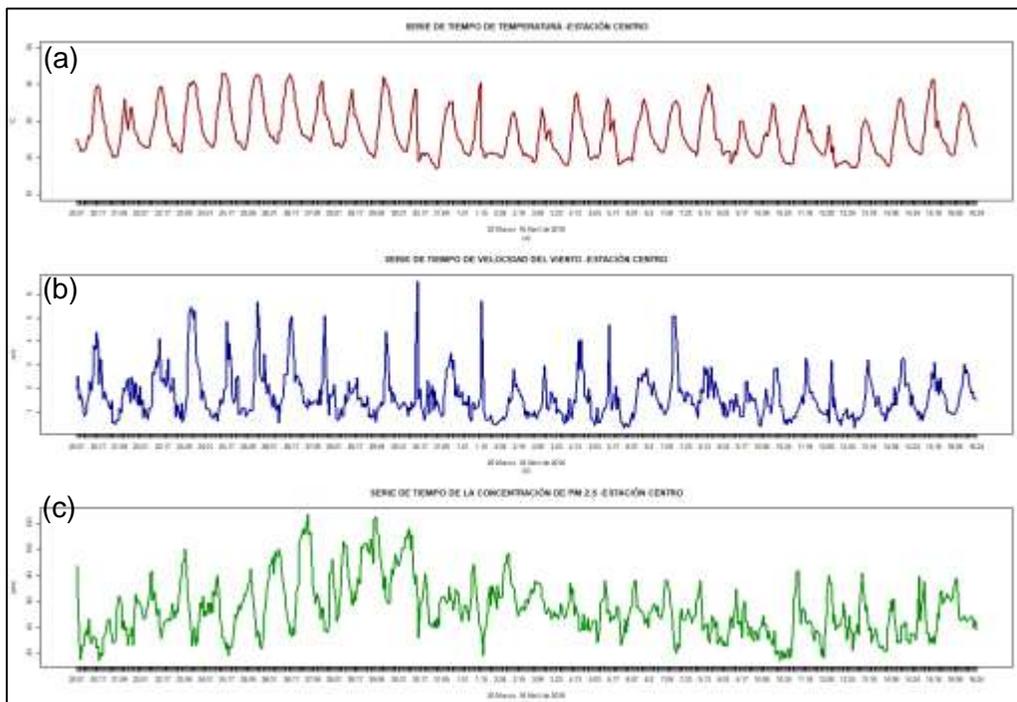


Figura 7 Series de tiempo de (a) Temperatura, (b) Velocidad del viento, (c) Concentración de PM_{2.5} para la estación centro. En el eje x, los números antes del punto representan el día, los demás la hora.

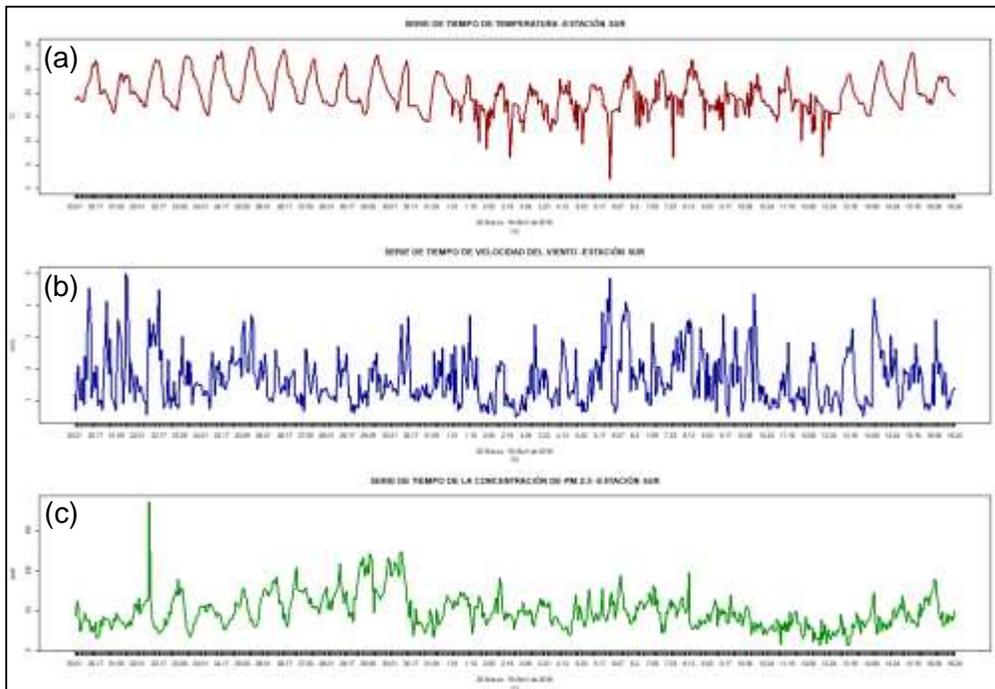


Figura 8 Series de tiempo de (a) Temperatura, (b) Velocidad del viento, (c) Concentración de PM2.5 para la estación sur. En el eje x, los números antes del punto representan el día, los demás la hora.

5.3.2 Ciclos diurnos en la estación centro

Con el fin de identificar un patrón de referencia para las diferentes variables, se presentan los ciclos diurnos de las 3 variables en la estación centro, por tratarse de la estación dentro del área de influencia de la ICU (**Figura 9**). Donde se evidencian distribuciones similares a la normal con un pico máximo a las 12 del mediodía para la temperatura, las 3 de la tarde para el viento y las 9 de la mañana para PM 2.5.

Estos picos tienen una alta relación con el ciclo diurno de la radiación solar y las horas pico del tráfico vehicular. Alrededor de las cuatro de la mañana comienza a concentrarse lentamente el material particulado hasta las 6am, en donde se da un acelerado incremento de este hasta alcanzar su pico máximo a las 10am. Este comportamiento obedece a que durante el momento en el que se está presentando una alta emisión de contaminantes por parte de fuentes móviles, la radiación está sobre la ladera occidental del valle y solo hasta las 9 am aproximadamente, y dependiendo de las condiciones de nubosidad, alcanza gran parte de la superficie del Valle contribuyendo al proceso de mezcla de y transporte del material emitido desde la superficie. Luego de esta hora, se da un pequeño ascenso de

concentración del material particulado, hora en la cual inicia el transporte de los contaminantes gracias a la aparición de turbulencia térmica y mecánica, por cuenta de aumento en la radiación solar que alcanza la superficie, y por tanto a la intensificación de los campos de circulación, tanto de ladera como a lo largo del eje del Valle. El otro momento del día el que aumentan significativamente las emisiones por fuentes móviles es en la tarde-noche, momento en el cual se da el retorno de las personas a sus viviendas. Es por este motivo que las concentraciones de material particulado comienzan a aumentar de nuevo, solo que con una menor intensidad dado que las temperaturas en el valle no han descendido del todo y esto posibilita que parte de las nuevas emisiones asciendan y se dispersen fuera del Valle. En el momento en el que la radiación solar es nula, se acumula de nuevo el PM2.5 hasta las 10 de la noche aproximadamente y se estabilizan sus niveles hasta el siguiente día.

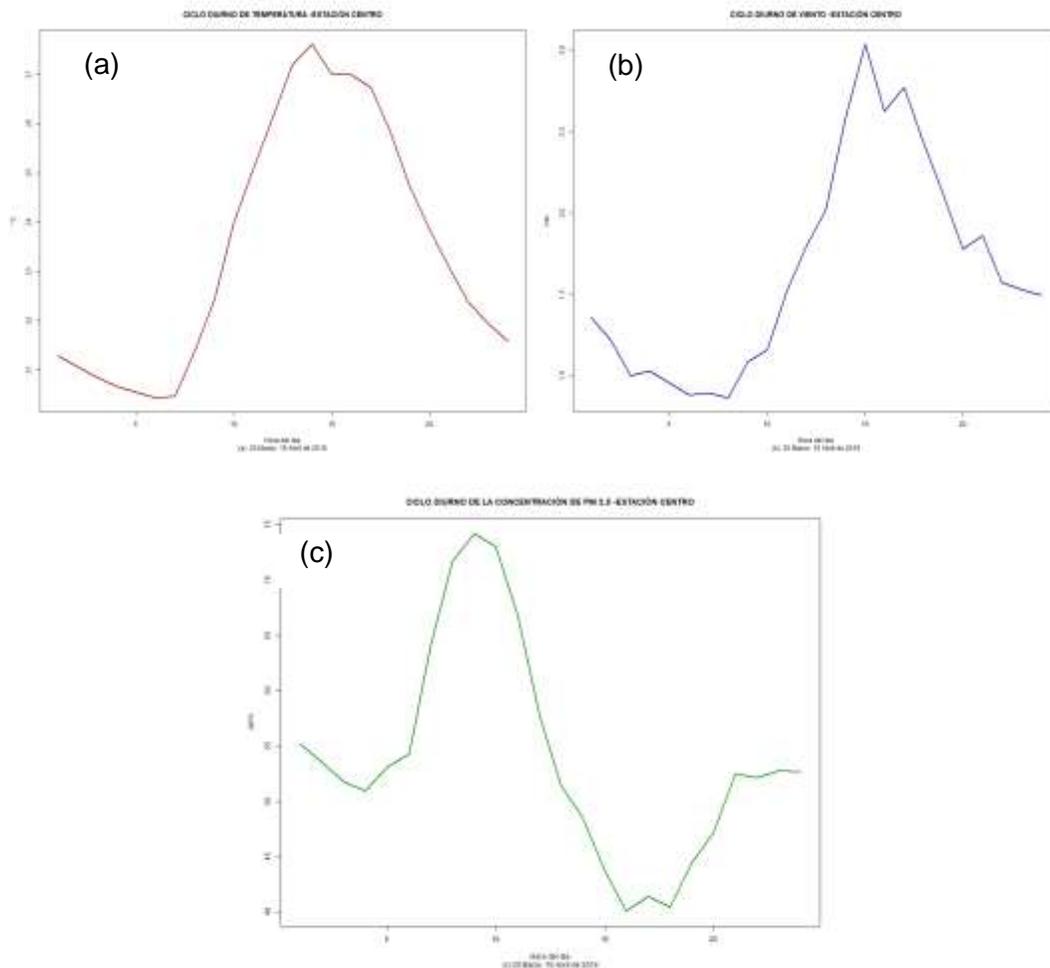


Figura 9 Ciclos diarios de (a) Temperatura, (b) Velocidad del viento, (c) Concentración de PM2.5 para la estación centro.

5.3.3 Remoción del ciclo diurno en la serie de tiempo

Con el fin de remover el efecto del ciclo diurno en la serie de tiempo horario, para identificar patrones diferentes al inducido por la radiación solar, se presentan las **Figura 10**, **Figura 11** y **Figura 12**. De manera general para las tres estaciones, coincide que la primera semana del periodo de estudio, en la variable temperatura, hay anomalías positivas que se pueden relacionar con el aumento en la capa de nubes y por tanto la limitación de transporte vertical desde la superficie. A partir del 1ro de abril se aprecia un cambio de comportamiento y la mayoría de los periodos presentan picos de anomalías negativas, lo cual puede deberse a la efectividad de las medidas de contingencia implementadas. Contrario a las series de tiempo anteriores, se observa que hay una relación negativa entre la variable temperatura y viento, donde en los momentos donde hay picos negativos de temperatura se encuentran picos positivos en la velocidad de los vientos, lo cual puede ser ocurrir por el fenómeno de inversión térmica. Esto se reafirma, observando por ejemplo la última semana de estudio, donde la concentración de material particulado aumenta, en tanto la velocidad del viento es menor.

Dado que los datos entre el 27 y 29 de marzo de la estación norte fueron reemplazados por los ciclos diurnos promedio de temperatura y velocidad del viento por la inexistencia de datos, en la **Figura 10**, **Figura 11** y **Figura 12**, se presenta una línea horizontal que representa la media de la serie de tiempo para cada una de las variables.

Las series de tiempo representadas a continuación **Figura 10**, **Figura 11** y **Figura 12**, consisten en las series de tiempo de (a) Temperatura, (b) Velocidad del viento, (c) Concentración de PM_{2.5} menos sus respectivos ciclos diurnos, para la estaciones norte, centro y sur respectivamente. Donde en el eje x los números antes del punto representan el día y los demás la hora.

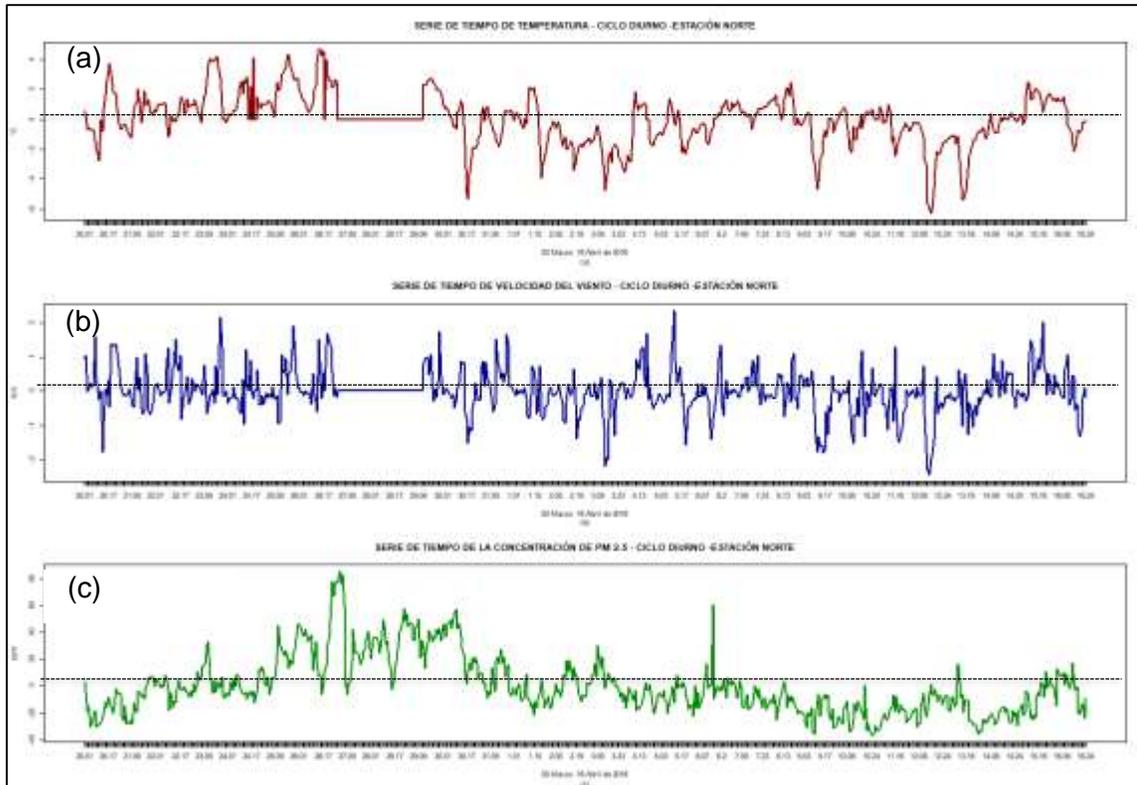


Figura 10 Estación Norte. Series de tiempo (a) Temperatura, (b) Vel. del viento, (c) PM2.5

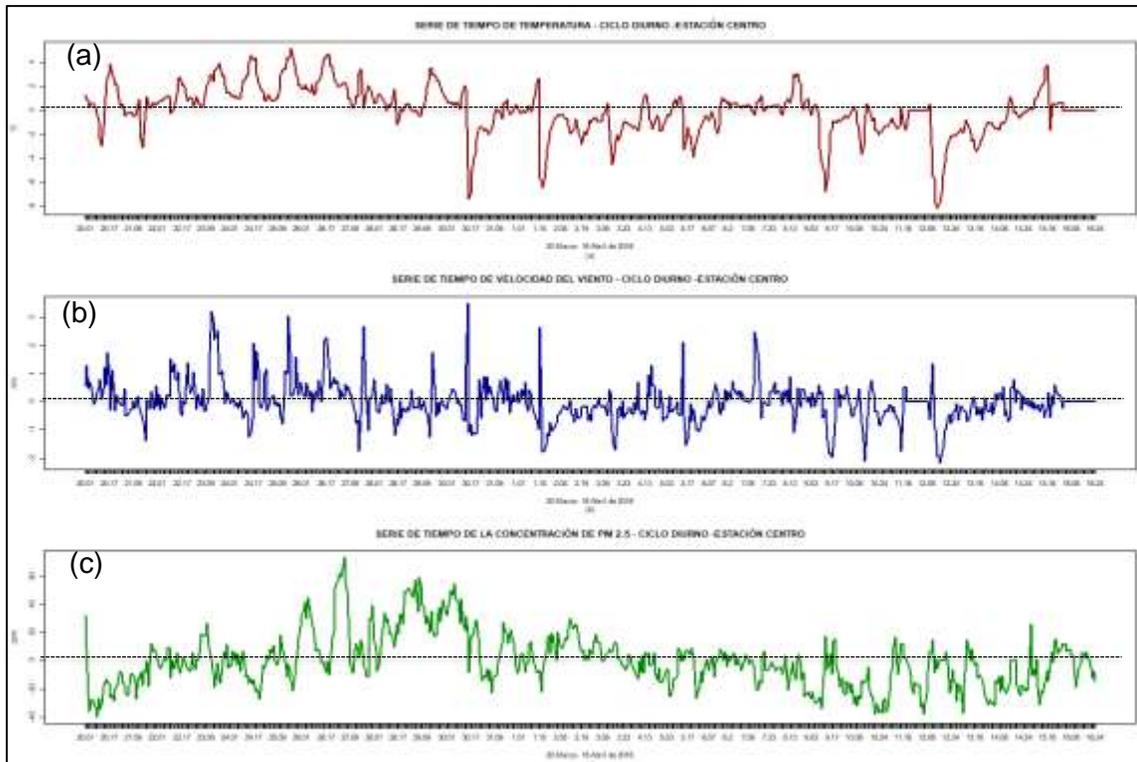


Figura 11 Estación Centro. Series de tiempo (a) Temperatura, (b) Vel. del viento, (c) PM2.5

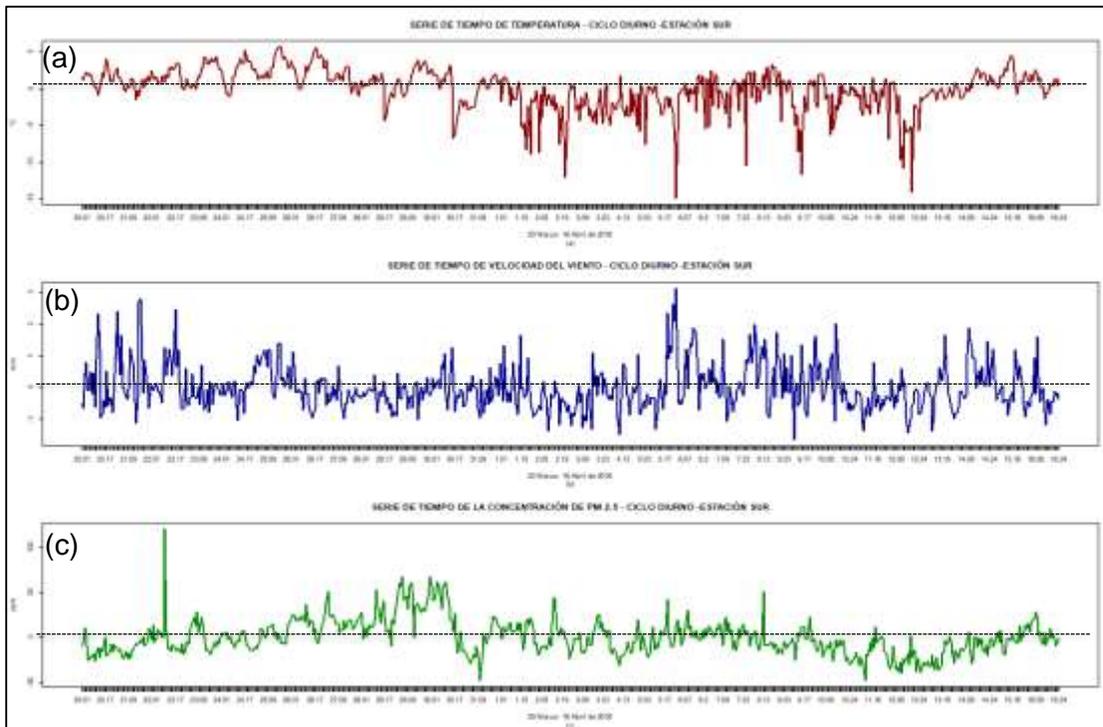


Figura 12 Estación Sur. Series de tiempo (a) Temperatura, (b) Vel. del viento, (c) PM2.5

5.3.4 Tendencias y correlaciones

Con el fin de evaluar la significancia de las tendencias de PM2.5 en todas las estaciones, y así soportar la observación anterior que se hace de las **Figura 10**, **Figura 11** y **Figura 12** respecto al comportamiento del PM2.5, se aplica una prueba paramétrica lineal (ver **Tabla 8**) a las series de tiempo. Donde la hipótesis nula establecida es que la pendiente es 0 para un t crítico de 1,96 con nivel de confianza del 95%. A partir de esta, se determina que las pendientes asociadas al periodo comprendido entre el 23 y el 29 de marzo para la variable PM2.5 en las 3 estaciones, son positivas y significativas, ya que T es mucho mayor al t crítico. De igual manera, las pendientes asociadas al periodo comprendido entre el 30 de marzo y el 5 de abril para la variable PM 2.5 en las 3 estaciones, son negativas y significativas, ya que T es mucho mayor al t crítico.

Tabla 8 Prueba paramétrica lineal de la tendencia de las series de tiempo de PM2.5 menos su correspondiente ciclo diurno.

Periodo	Estación	Variable	Pendiente (b)	Intercepto (a)	σb	T
23-29 marzo 2016	Norte	PM2.5	0,284	-7,062	0,028	10,094
	Centro		0,195	-7,893	0,028	6,994
	Sur		0,146	-4,905	0,025	5,899
30 marzo -5 abril 2016	Norte	PM2.5	-0,296	34,345	0,022	-13,349
	Centro		-0,230	31,257	0,023	-10,141
	Sur		-0,299	33,579	0,032	-9,230

Adicionalmente, con el objetivo de entender mejor la relación entre las variables, y específicamente la temperatura con PM2.5, para asociar este último con la ICU. Se hace una correlación entre estas variables, mediante los métodos Pearson y Spearman. Los cuales arrojan valores negativos cercanos entre -0.4 y -0.5 (ver **Tabla 9**), es decir, que hay una correlación inversa entre las variables. Esto se debe a que, si bien la temperatura si tiene influencia en la concentración del material particulado, esta no se da de manera sincrónica. Por tal motivo, se puede entender mejor la relación de las variables usando correlaciones de paso seguido o implementando métodos más potentes como la coherencia Onditas, utilizada más adelante.

Tabla 9 Correlación entre temperatura y PM2.5 de la estación centro.

Correlación	T-PM2.5
<i>Pearson</i>	-0,404
<i>Spearman</i>	-0,469

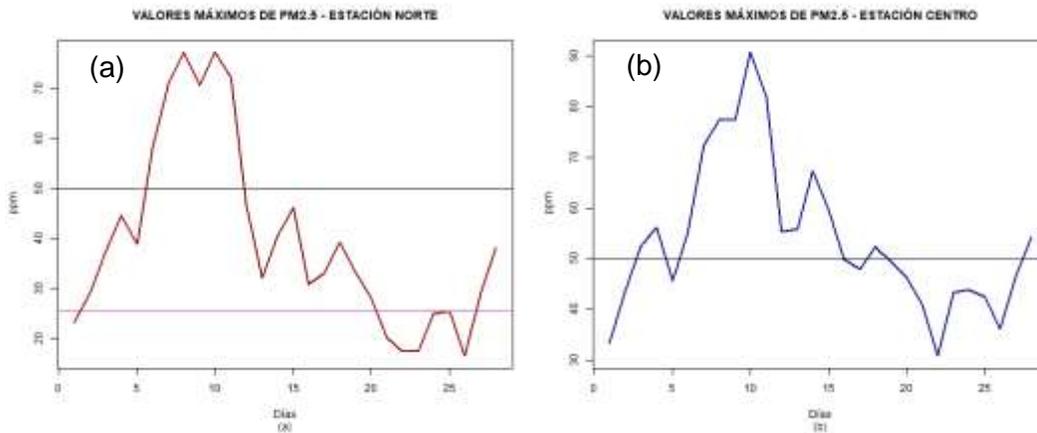
5.3.5 Análisis frente a la normativa **Resolución 610 de 2010 del MAVDT**

Los valores máximos de PM2.5 anuales y diarios, son superados en cada estación durante la mayor parte del periodo de estudio. Según la Resolución 610 de 2010 del MAVDT que establece que el nivel máximo permisible anual para PM2.5 es de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (línea rosada en **Figura 13** y diario de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (línea negra en **Figura 13**).

La estación norte, incumple la norma anual durante tres de las cuatro semanas del periodo de estudio, reduciendo sus valores del 8 al 14 de abril hasta niveles permitidos por la R.610/2010. En cuanto al cumplimiento de la norma de los niveles diarios máx. permisivos de PM2.5, sobrepasa la norma del 25 al 31 de marzo y alcanza su nivel más alto de

concentración (sobre 70ppm) durante los días 29 y 30 de marzo. La estación centro, incumple la norma anual durante todo el periodo de estudio. En cuanto al cumplimiento de la norma de los niveles diarios máx. permisivos de PM2.5, sobrepasa la norma del 22 de marzo al 4 de abril y alcanza su nivel más alto de concentración (sobre 90 ppm) durante el día 29 de marzo. La estación sur, incumple la norma anual todo el periodo de estudio, exceptuando los días 24 y 25 que llegan hasta los niveles permitidos por la R.610/2010. En cuanto al cumplimiento de la norma de los niveles diarios máx. permisivos de PM2.5, sobrepasa la norma del 24 al 30 de marzo, los días 1, 4 y 15 de abril, y alcanza su nivel más alto de concentración (sobre 90 ppm) durante el día 29 de marzo.

Las tres estaciones tienen un comportamiento similar en la distribución de la gráfica, sin embargo, las concentraciones que alcanzan son diferentes. Mediante la **Figura 13**, es posible, deducir que la estación con peor calidad de aire es la del centro y le sigue a esta la estación del sur. Para las tres estaciones el día 29 de marzo representa un valor máximo. Del 2 al 3 de abril, que corresponden al día 14 y 15 del periodo de estudio, en las tres estaciones, se observa una reducción del material particulado, que corroborando con fuentes de información coincide con la medida del POECA de restricción de vehículos desde las 3pm del 2 de abril hasta las 6pm del 3 de abril.



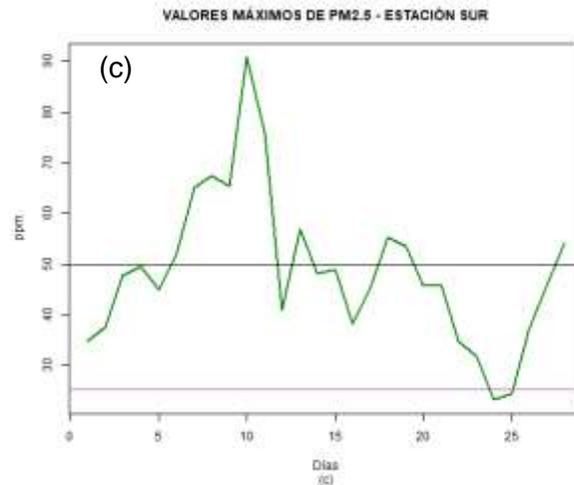
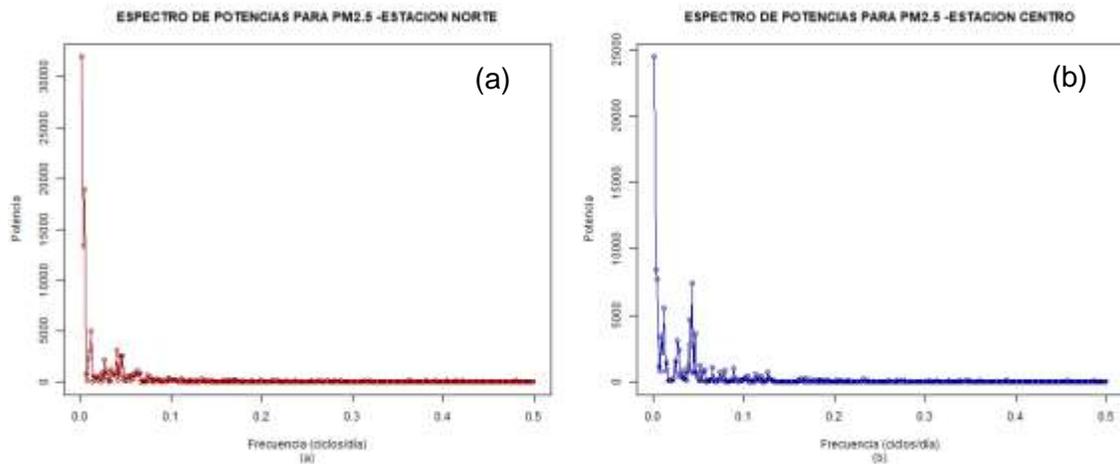


Figura 13 Valores máximos de PM2.5 para las estaciones (a) norte, (b) centro, (c) sur. (En el eje x: días, el en eje y: concentración de material particulado en ppm)

5.3.6 Espectro de potencias

Con el fin de identificar frecuencias que no estén influenciadas por el ciclo diurno, para la variable PM2.5, se realiza el espectro de potencias de Fourier en cada estación (ver **Figura 14**), a partir de los datos de la serie de anomalías. En los cuales se aprecian bajas frecuencias cada 20 horas aproximadamente para la estación centro con una amplitud mayor que en las otras dos estaciones y se puede relacionar con la hora pico de la mañana. Además, se observa una frecuencia muy pequeña (aprox. 0.01) con una amplitud muy grande, que corresponde a un periodo de 4 días; el cual se puede asociar con días de mayor tráfico.



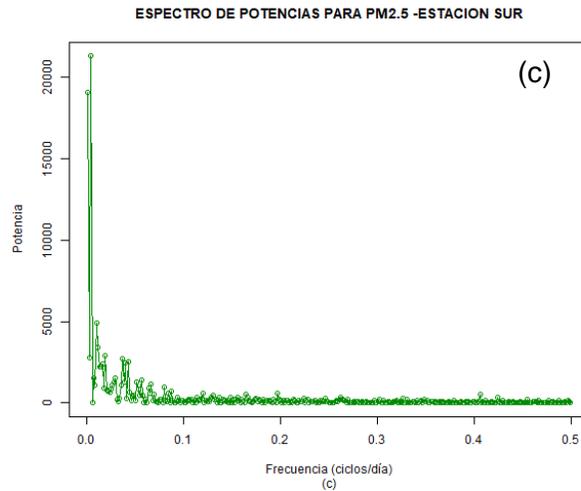


Figura 14 Espectro de potencias de la serie de tiempo menos el ciclo diurno para la concentración de PM2.5 de las 3 estaciones.

5.3.7 Espectro de Onditas

Para poder dilucidar los momentos en los que los períodos identificados en la serie de tiempo diaria están activos, se realiza el espectro de “onditas” para la variable PM 2.5 en las tres estaciones (ver **Figura 15**). Se observa que estas tienen congruencia con los datos registrados en los anteriores análisis, ya que se ve reflejado en los colores rojo, a lo largo del periodo de 0.5 y 1 días, el ciclo diurno de la temperatura que influye la concentración de material particulado en la atmósfera, y que estuvo activo durante más o menos las primeras 2 semanas (hasta el 4 de abril) donde perdió potencia, posiblemente gracias a las medidas que se implementaron desde el 2 de abril de restringir la movilidad vehicular particular y de volquetas. La cual tuvo un mayor impacto en la estación norte y para la estación sur no se vio reflejada dicha medida. También, se identifica un periodo intenso (rojo) a los 4 días que concuerda con la frecuencia identificada en el espectro de Fourier, activa durante las primeras dos semanas del periodo de estudio.

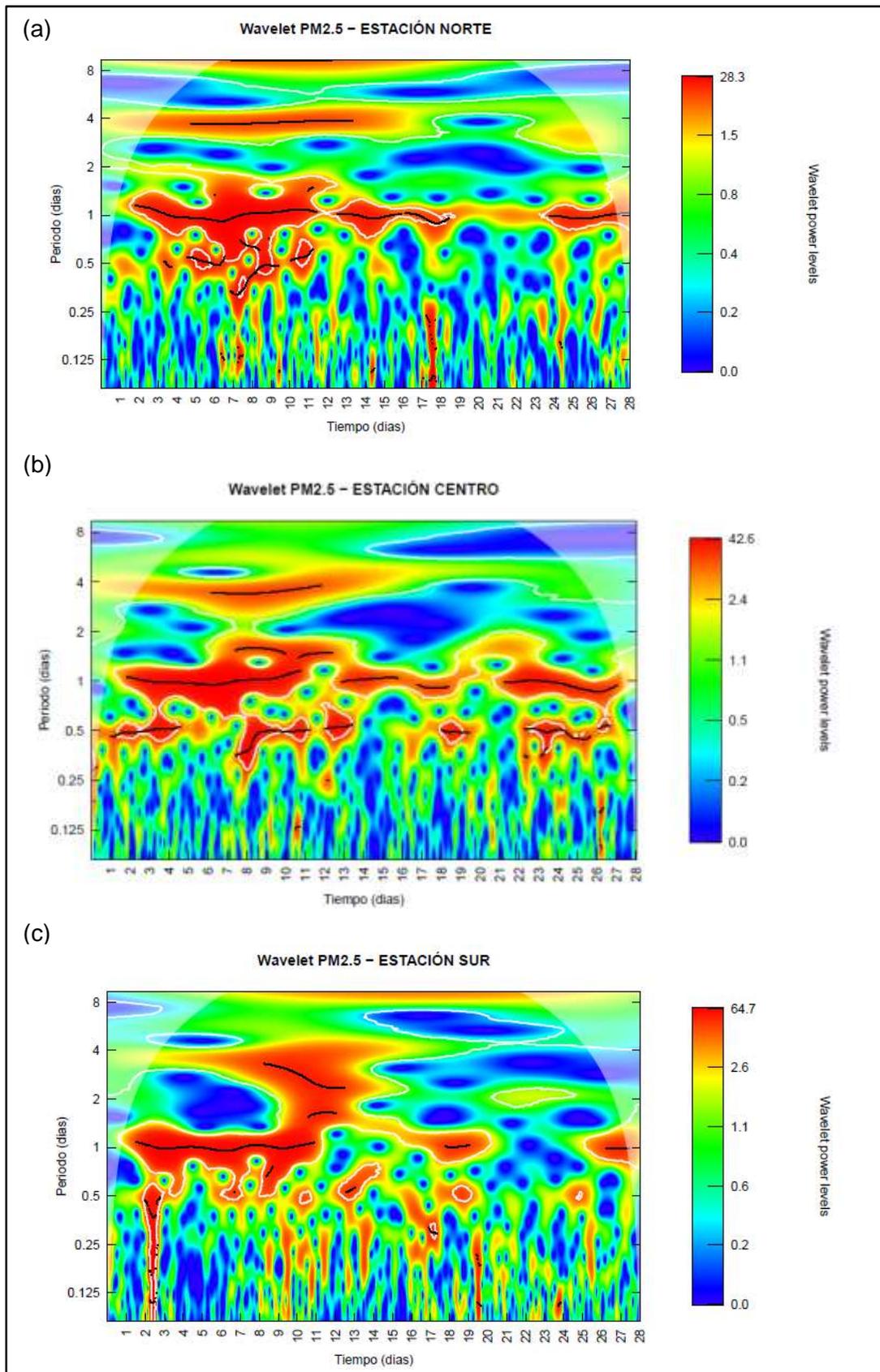


Figura 15 Wavelet de PM2.5 para la estación norte (a), centro (b) y sur (c).

5.3.8 Coherencia Onditas

Dado que el espectro de onditas por sí solo no permite establecer relaciones del material particulado con las variables meteorológicas, se generan análisis de Coherencia Onditas entre las variables meteorológicas, y entre ellas con material particulado PM2.5 (*ver Anexo: Coherencia Onditas*). Siendo un análogo gráfico de las correlaciones, ya que permite comparar las frecuencias de dos variables en una misma escala temporal. Mostrando alta correlación de las variables con valores cercanos a 1 (color rojo) y bajas correlaciones con valores cercanos a 0 (color azul). Además, la Coherencia Onditas permite ver el tipo de relación entre las variables (inversa o directa), y cual antecede el comportamiento de una sobre la otra (*ver Variable PM2.5*).

A continuación, se analiza la estación centro en representación del comportamiento de las variables dentro de la ciudad y bajo el efecto de la isla de calor urbano.

5.3.8.1 Coherencia entre las variables meteorológicas

Las coherencias que se encuentran entre las variables meteorológicas de la estación centro muestran en color rojo que entre la humedad relativa y el viento (**Figura 16 (a)**) alrededor del periodo de 1 día, durante todo el mes de estudio, hubo una fuerte coherencia entre las variables; las cuales se encuentran fuera de fase con la humedad relativa antecediendo la mayor parte del tiempo. Es decir que, en el área de influencia de la ICU, la humedad relativa precede la velocidad del viento y la relación entre ellas es inversamente proporcional. Además, se aprecia un fuerte periodo de 4 días a partir del día 16 que corresponde con el momento en el cual las medidas implementadas en la contingencia ambiental, fueron más estrictas. Y la relación entre las variables es inversa y simultánea, es decir que no hay ninguna precediendo a la otra. Este comportamiento también se da en la estación norte, con una coherencia más marcada en el centro del periodo de 1 día. Y en la estación sur, si bien también se da una alta coherencia entre las variables alrededor del periodo de 1 día, entre el día 16 al 21 de la contingencia ambiental se pierde la coherencia.

Esto puede asociarse a que las medidas implementadas en la contingencia ambiental irrumpieron en la forma en la que estas variables se asocian para ese punto del valle.

En cuanto a la temperatura con la humedad relativa (**Figura 16 (b)**), se encuentra que a partir del día 8 de contingencia ambiental, se da coherencia entre las variables y la relación es para casi todo el transcurso del tiempo inversa y simultánea. Es decir que la respuesta de las variables se da en fracción de horas al tiempo, y si hay aumento de una la otra decrece o viceversa. Este comportamiento también se da en la estación norte y sur, con diferencias en algunas coherencias débiles y focalizadas en el transcurso del tiempo (*ver Anexo: Coherencia Onditas, pág. 13 y 15*).

La temperatura en relación con el viento (**Figura 16 (c)**), tiene un periodo marcado alrededor de 1 día con una coherencia de 0.9 a 1 a partir del día 8 de contingencia ambiental, al igual que el periodo dado entre la temperatura y la humedad relativa. Con una relación en fase de las variables, simultánea y en algunos momentos precedida por la temperatura, da cuenta que el viento se mueve en alrededor del ciclo diurno de la temperatura, pero está más influenciado por el gradiente en la humedad relativa. Este comportamiento también se da en la estación norte y sur, con diferencias en algunas coherencias débiles y focalizadas en el transcurso del tiempo (*ver Anexo: Coherencia Onditas, pág. 16 y 18*).

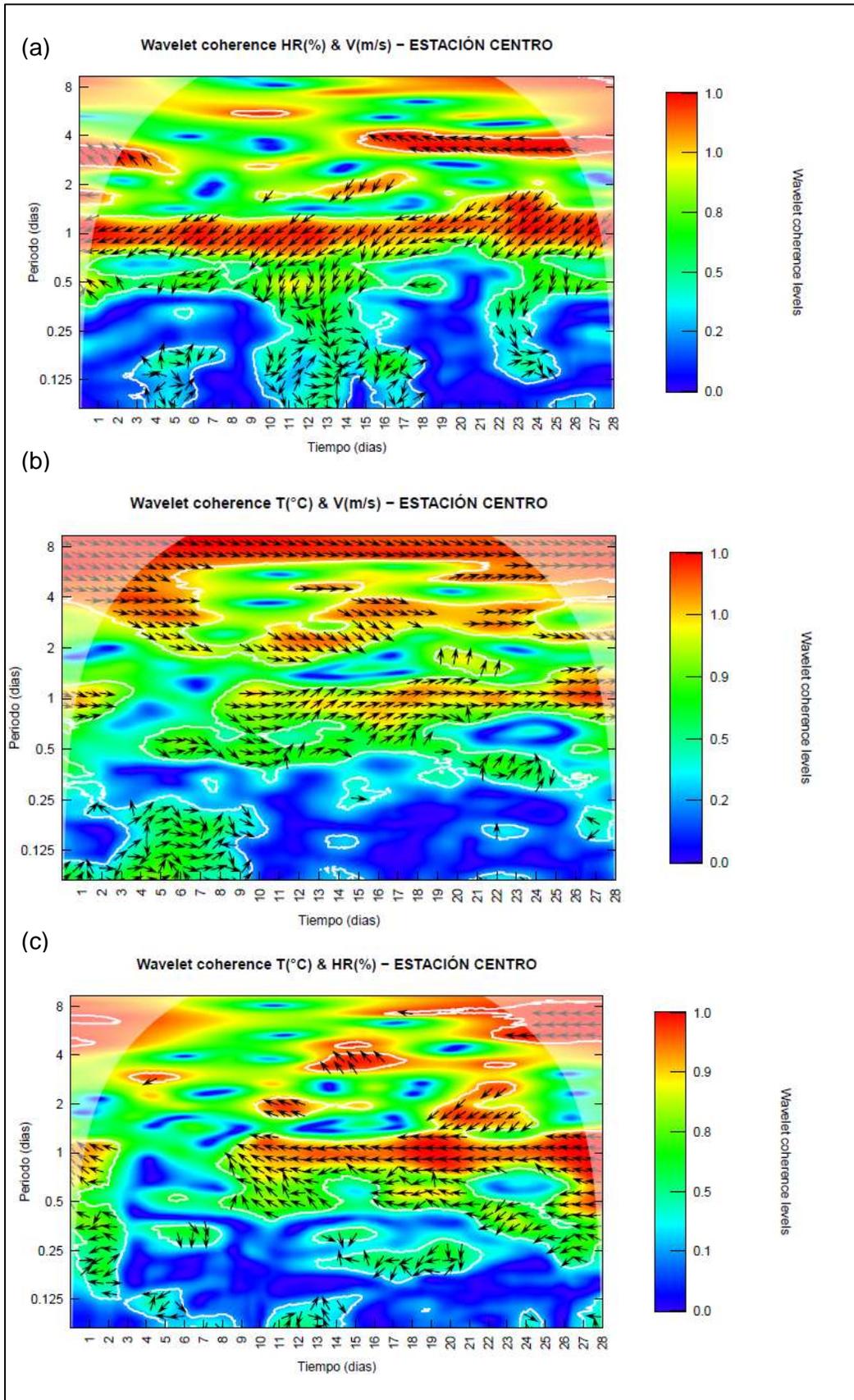


Figura 16 Coherency-wavelet entre las variables meteorológicas para la estación centro (a) HR (%) vs V(m/s), (b) T(°C) vs HR (%) y (c) T(°C) vs V(m/s). Donde la Coherencia esta entre valores de cero (azul) hasta uno (rojo), el contorno blanco indica una significancia del 90% y las flechas si las variables están en fase o no, y cual antecede sobre la otra. Variables en el título: x & y (ver **Ilustración 5**)

5.3.8.1 Coherencia de cada variable meteorológica con PM2.5

Para ver la relación entre las variables meteorológicas en la calidad del aire se genera el análisis de coherencia Onditas entre estas (**Figura 17**). Donde las coherencias que se encuentran entre la variable temperatura de la estación centro con su material particulado PM2.5 (**Figura 17 (a)**), evidencia que alrededor del periodo de 1 día, durante las primeras dos semanas de estudio, hubo una fuerte coherencia entre las variables.

En la primera semana, la temperatura antecede al PM2.5 y se encuentran fuera de fase (tienen una relación inversa), pero para la segunda semana el PM2.5 antecede la temperatura y no hay una relación de proporcionalidad entre ellas. Además, en el periodo de 12 horas hay coherencia entre las variables hasta el día 16 de la contingencia ambiental, es decir que las medidas aplicadas irrumpieron en la relación que estas dos variables tenían y por tanto para los días posteriores no se evidencias periodos fuertes. En la estación del norte, a partir del día 12 de la contingencia ambiental se da una coherencia fuerte en el periodo de 1 día, con un comportamiento variable de relaciones en fase con el PM2.5 antecediendo la temperatura y relaciones fuera de fase con la temperatura antecediendo el PM2.5 (ver **Anexo: Coherencia Onditas**, pág. 1). Y en la estación sur, hay coherencia en el periodo de 1, 3 y 7 días, donde predomina para el periodo de 1(1ra semana) y 7 (2da-3ra semana) días, la relación entre las variables es fuera de fase y con la temperatura antecediendo el PM2.5; mientras que para el periodo de 3 días la relación que se da entre las variables es en fase con el PM2.5 antecediendo a la temperatura, para la segunda semana de la contingencia ambiental (ver **Anexo: Coherencia Onditas**, pág. 3).

En cuanto a la humedad relativa en relación con el PM2.5 para la estación centro (**Figura 17 (b)**), se evidencia coherencia entre las variables en los periodos de 12 horas, 1 y 7 días, en las primeras dos semanas de la contingencia, el cual tiene muy marcada la coherencia

para el periodo de siete días. El comportamiento de las variables de forma general fue para la primera semana precedido por la humedad relativa y en fase con PM2.5. Para la segunda semana no hubo un cambio de fase evidente, por lo que se podría decir que se comportaron sincrónicamente. La estación norte presentó una fuerte coherencia en el periodo de 1 día, con la humedad relativa antecediendo el PM2.5 en la primera semana y en las demás semanas no hubo una variable antecediendo a la otra de manera marcada, pero se puede decir que cuando la humedad antecedió al PM2.5 se relacionaban en fase y cuando PM2.5 antecedió se relacionaban fuera de fase (*ver Anexo: Coherencia Onditas, pág. 7*). Y en la estación sur hay coherencia fuerte en el periodo de 1, 3 y 7 días, donde predomina para el periodo de 1 la relación entre las variables en fase y con la humedad antecediendo el PM2.5; para el periodo de 3 días la relación que se da entre las variables es fuera de fase con el PM2.5 antecediendo a la humedad, para inicios de la segunda semana de la contingencia ambiental. Y para el periodo de 7 días el PM2.5 precede a la temperatura con una relación fuera de fase en las primeras dos semanas de la contingencia (*ver Anexo: Coherencia Onditas, pág. 3*)

Por último, en la relación de la velocidad del viento con el PM2.5 para la estación centro (**Figura 17 (c)**), se evidencia coherencia entre las variables en los periodos de 12 horas, 1 día, en la primera y segunda semana de la contingencia, siendo más fuerte en el periodo de 1 día. El comportamiento de las variables en el periodo de 1 día fue precedido por velocidad del viento y estuvo fuera de fase con PM2.5. La estación norte presentó una fuerte coherencia en el periodo de 1 día, con la velocidad del viento antecediendo el PM2.5 en la primera semana y en las demás semanas no hubo una variable antecediendo a la otra de manera marcada, pero se puede decir que cuando la velocidad antecedió al PM2.5 se relacionaban fuera de fase y cuando PM2.5 antecedió se relacionaban en fase (*ver Anexo: Coherencia Onditas, pág. 4*). Y en la estación sur hay coherencia fuerte en el periodo de 1 para la primera semana y 2 días desde la segunda semana; donde predomina para el periodo de 1 la relación entre las variables en fase y con la velocidad antecediendo el PM2.5; para el periodo de 2 días la relación que se da entre las variables es en fase con el PM2.5 antecediendo la velocidad del viento (*ver Anexo: Coherencia Onditas, pág. 6*).

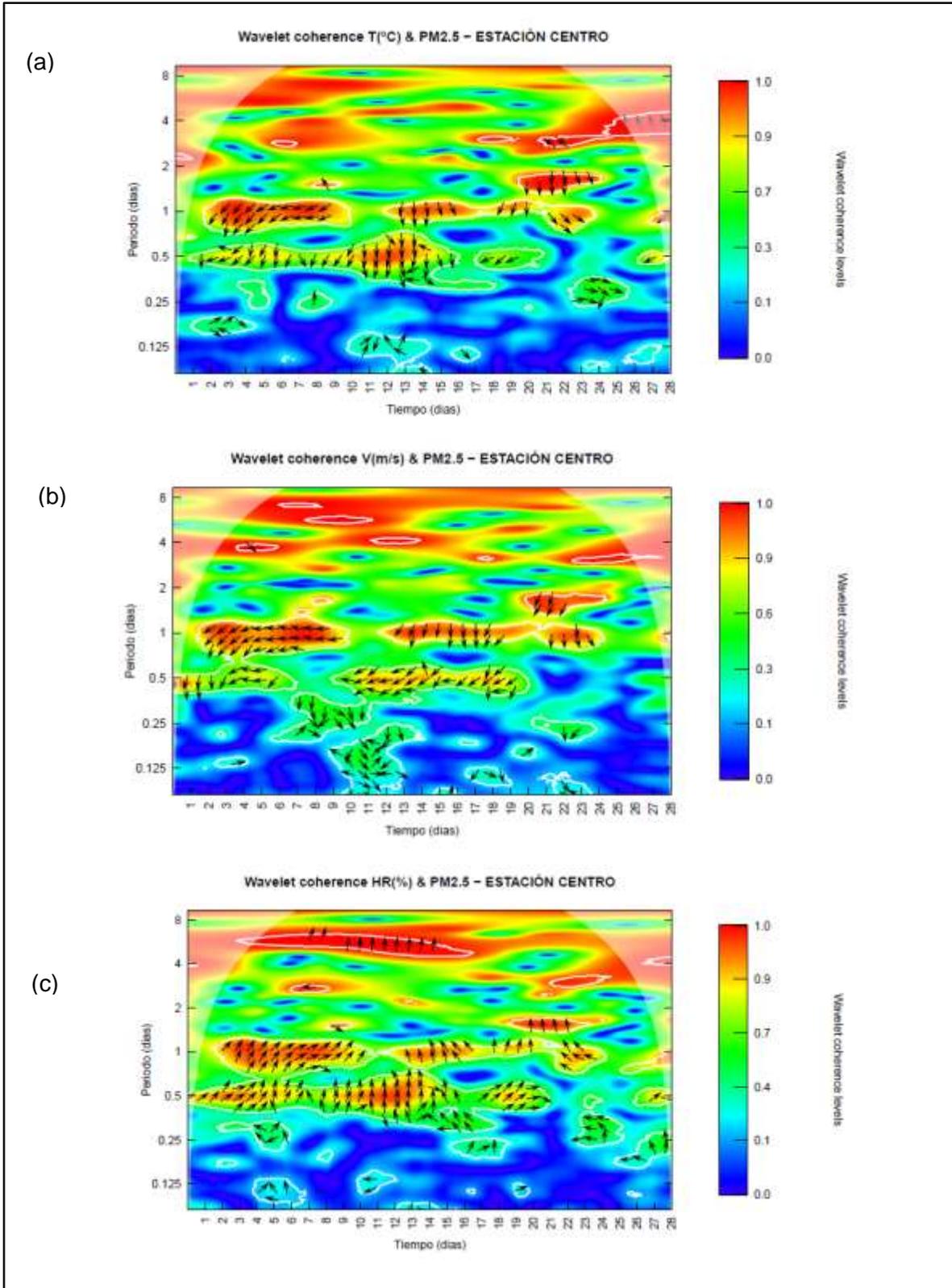


Figura 17 Coherency-wavelet de las variables meteorológicas con PM2.5 para la estación centro. Donde la Coherencia esta entre valores de cero (azul) hasta uno (rojo), el contorno blanco indica una significancia del 90% y las flechas si las variables están en fase o no, y cual antecede sobre la otra. Variables en el título: x & y (ver **Ilustración 5** Diferencias de fase y su interpretación en Coherencia Onditas.)

6. Conclusiones y comentarios finales

La influencia de la isla de calor urbana en el centro del valle, tiene influencia sobre los campos de circulación gracias a la existencia de los gradientes de temperatura y presión asociados, desde la alta presión (cima de la montaña) hacia puntos de menor presión (fondo del Valle), esto se evidencia en las rosas de viento de las estaciones del centro del valle, donde la mayor frecuencia de las direcciones del viento provienen del NW al NE (*Ver Anexo: Rosas de viento*) y los valores más altos de velocidad del viento y temperatura, se encontraron en el centro del valle.

El comportamiento combinado de las variables en el trimestre de estudio y para las estaciones que se encuentran al interior del valle, es muy similar en todas las estaciones, con variaciones en las magnitudes y no tanto en la forma en la cual se relacionan las variables (*Ver Anexos*

Anexo: Ciclos diurnos). Evidenciando que la tasa de enfriamiento de la temperatura es más lenta en la noche que la tasa de calentamiento del aire en la mañana, mantiene una relación inversa con la humedad relativa. En cuanto a la relación de la temperatura con la velocidad del viento, presentan un ciclo diurno similar pero más errático para la velocidad del viento en horas que concuerda con el inicio de la hora pico, es decir que las emisiones generadas en momentos como la finalización de la jornada laboral altera el comportamiento del viento.

Respecto de los valores máximos establecidos en la normatividad para la concentración de PM 2.5, no se cumplieron en su gran mayoría con los valores tanto diarios como anuales de esta variable. Pero es de resaltar que las medidas implementadas en la contingencia ambiental, como la restricción vehicular tiene un impacto positivo en la reducción de la concentración del material particulado.

Hay evidencia de correlaciones entre las variables ambientales con PM2.5 y entre ellas mismas, no solo de la influencia que tienen las variables meteorológicas sobre la calidad del aire, sino que, en algunos momentos del periodo estudiado, se muestra evidencia de que el material particulado puede anteceder el comportamiento de la otra variable (*Ver Anexo: Coherencia Onditas*).

Para establecer asociaciones causa-efecto entre estaciones, se recomienda implementar mapas de correlaciones, con el fin de ver la dispersión de los contaminantes en el tiempo.

7. Anexos

A. Anexo: Ciclos diurnos

En este anexo se encuentran los ciclos diurnos de las variables temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, para cada estación.

https://drive.google.com/open?id=1YT7VR_rpQUjATkrAg6TBcoKc-jfht5bD

B. Anexo: Rosas de viento

En este anexo se encuentran las rosas de viento de cada estación, cada tres horas para los tres meses de estudio.

https://drive.google.com/open?id=1NvmCu_Egr7bk_E2W5Ysz6QTZLx3_xws5

C. Anexo: Coherencia Onditas

En este anexo se encuentran las transformadas de onditas “Coherency wavelets” para la estación norte, centro y sur.

https://drive.google.com/open?id=1IFR_pyksfDaPPgomQNJwoExF6-wScWIo

8. Bibliografía

- Aguiar, D., Calle, J., Hernández, D., y González, J. (2017). *Medellín y su calidad del aire*. Medellín: ITM-UdeA. Recuperado de: <https://goo.gl/vLbpTQ>.
- AMVA (2016). *Acuerdo metropolitano N° 15*. Recuperado de: http://www.siclas.org/wp-content/uploads/2017/02/AcuerdoProtocoloPOECA_FINAL.pdf
- AMVA (2017). *Experiencia del área metropolitana del Valle de Aburrá “Hacia la integración regional sostenible”*. Recuperado de: <https://www.slideshare.net/ProBogota/presentacin-area-metropolitana>
- AMVA (2018). *Pacto por la calidad del aire*. Recuperado de: <https://www.medellincomovamos.org/download/pacto-por-la-calidad-del-aire-medellin-2018/>
- AMVA (2019). *Información sobre calidad del aire en nuestro territorio*. Calidad del aire en el Valle de Aburra. Recuperado de <http://www.calidaddel aire.co/preguntas-frecuentes.php>
- Berger, M. (2016). *The Manifold Challenges for Modeling the Urban Heat Island*. Procedia Computer Science, 2000-2007.
- Brisa de ladera (2018). *Metoglosario virtual*. Recuperado de https://meteglosario.aemet.es/es/termino/1028_brisa-de-ladera.
- Cambio climático ONU (2017). Un.org. Recuperado de: <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>
- Cheng, C.Y. (2010). *Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls*. Building and Environment, 1779-1787.
- Condiciones especiales del valle de Aburrá (2019). *Área Metropolitana del Valle de Aburrá*. Recuperado de <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Generalidades/Condiciones-especiales.aspx>
- DANE (2007). *Censo General 2005-Nivel Nacional*. República de Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Recuperado de:

<https://www.dane.gov.co/files/censos/libroCenso2005nacional.pdf>

- DNP (2014). *Publicación: Misión para el fortalecimiento del sistema de ciudades*. Recuperado de: <https://www.dnp.gov.co/programas/vivienda-agua-y-desarrollo-urbano/desarrollo-urbano/Paginas/sistema-de-ciudades.aspx>
- Guzmán, G. (2018). *Análisis de la influencia del diseño urbano en la meteorología del Valle de Aburrá*. UNAL. Medellín.
- IDEAM (2006). *Atlas de viento y energía eólica de Colombia*. Bogotá, Colombia.169p.
- IDEAM (2017). *Atlas de viento de Colombia*. Bogotá, Colombia.158p.
- Informe mundial sobre asentamientos humanos. (2011). *United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat)*. Recuperado de <https://unhabitat.org/books/las-ciudades-y-el-cambio-climaticoorientaciones-para-politicas-spanish-language-version/>.
- Beaufort scale (1955). *Beaufort Scale Of Wind*. Enciclopedia Británica. Recuperado de: <https://www.britannica.com/science/Beaufort-scale>.
- Martínez, A. (2017). *Islas de calor en el Área urbana del Valle de Aburrá*. UNAL. Medellín.
- Mejía, J. F. (2016). *Altura de la capa de mezcla en un área urbana, montañosa y tropical*. Caso de estudio: Valle de Aburrá (Colombia). Medellín.
- ONU (2018). *Perspectivas de la urbanización mundial 2018*. Recuperado de: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf>
- PIGECA (2017). *Plan Integral de Gestión de Contaminación del Aire- PIGECA* - .Recuperado de: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/PIGECA/PIGECA-Aprobado-Dic-2017.pdf>
- Rendon et al. (2014). *Effects of Urbanization on the Temperature Inversion Breakup in a Mountain Valley with Implications for Air Quality*. Journal of applied meteorology and climatology. Vol 53, pp. 840-858.
- Resolución metropolitana N° D 00-002489 (2018). Gaceta oficial. Año XXV. N. 4551. 4, octubre, 2018. pág. 34.
- Rosatto, H., Botta, G., Tolón Becerra, A., Tardito, H. y Leveratto, M. (2016). *Problemas del cambio climático en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires -aportes de las cubiertas vegetales en la regulación térmica*. FCA. UNCUYO,48(1), pp. 197-209. Recuperado de:

- http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1886652016000100014 53-
- Rosch, A., & Schmidbauer, H. (2018). *WaveletComp 1.1: A guided tour through the R package*. Recuperado de http://www.hs-stat.com/projects/WaveletComp/WaveletComp_guided_tour.pdf
 - Whiteman, C. (2000). *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. Oxford University Press, 355 pp.
 - Wong, N. H., Tan, A. Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P. Y., Chan, D., Wong, N.C. (2010). *Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls*. Building and Environment, 663-672.
 - Yanga, L., Qian, F., Songa, D.-X., & Zheng, K.-J. (2016). *Research on Urban Heat-island Effect*. Procedia Engineering, 11-18.
 - Villanueva-Solis, J., Ranfla, A. y Quintanilla-Montoya, A. (2013). *Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo*. Información tecnológica, 24 (1), pp.15-24.
 - Whiteman, C. D. (2000). *Meteorología de Montañas: Fundamentos y Aplicaciones*. Oxford: Oxford University Press.