

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO CON
DIÁMETROS AERODINÁMICOS MENORES A 10 μm (PM10) REGISTRADO EN EL
PRIMER AÑO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL
AIRE DE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL ATLÁNTICO – C.R.A.**

**DOUGLAS JAVIER VALLEJO ARAUJO
ID: 176361**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2019**

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO CON
DIÁMETROS AERODINÁMICOS MENORES A 10 μm (PM10) REGISTRADO EN EL
PRIMER AÑO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL
AIRE DE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL ATLÁNTICO – C.R.A.**

**DOUGLAS JAVIER VALLEJO ARAUJO
ID: 176361**

Proyecto de grado para optar por el título de ingeniero ambiental

**Director del Proyecto
PhD. Kento Taro Magara Gómez**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

Bucaramanga, Enero 14 de 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco inmensamente a la Corporación Autónoma Regional del Atlántico C.R.A. por instalar los equipos y permitir trabajar con los datos recolectados, también al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, por proporcionar de manera oportuna los datos meteorológicos con los que se desarrolló esta investigación.

A la Organización Monitoreo Ambiental por permitirme trabajar en la instalación y operación del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de la C.R.A., lo cual permitió conocer de primera mano las condiciones de los puntos de muestreo.

A la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga por permitirme desarrollar este proyecto de investigación.

A mi familia por el apoyo y la confianza.

A los docentes por guiarme.

CONTENIDO

LISTA DE ILUSTRACIONES	6
LISTA DE ECUACIONES.....	7
LISTA DE GRÁFICAS	8
LISTA DE TABLAS.....	9
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS.....	13
1.1. Objetivo general.....	13
1.2. Objetivos específicos.	13
2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	14
3. ANTECEDENTES.....	16
4. MARCO TEÓRICO	19
5. METODOLOGÍA.....	22
5.1. Revisión de Normativa.	22
5.2. Solicitud de datos de muestreo de PM10 del periodo DIC16-DIC17 a la C.R.A.	22
5.3. Validación del muestreo y descarte de datos con errores o anómalos.	22
5.4. Aplicación del Índice de Calidad del Aire (ICA) desarrollado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para PM10.....	23
5.5. Comparación de registros de PM10 del SVCA frente a la normativa nacional, OMS y US-EPA.....	24
5.6. Análisis de las distribuciones espaciales y temporales de la concentración de PM10 en el área de estudio.	25
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
6.1. Validación de datos.....	26
6.2. Índice de Calidad del Aire ICA.	27
6.3. Análisis temporal.....	32
6.4. Análisis espacial.	56
7. CONCLUSIONES	60
8. RECOMENDACIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXOS	64

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Límites para el ICA.....	24
Ilustración 2. Contaminantes y sus niveles límites	25
Ilustración 3. Rosa de vientos de la estación meteorológica del IDEAM ubicada en el barrio Las Flores, norte de la ciudad de Barranquilla	33
Ilustración 4. Rosa de vientos de la estación meteorológica del IDEAM ubicada en el Aeropuerto Internacional Ernesto Cortissoz.....	33

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Fórmula para el cálculo del ICA	24
--	----

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Concentración promedio anuales de PM10 por estación de monitoreo en 2015	17
Gráfica 2. Días de excedencia de PM10 por estación de monitoreo en 2015	18
Gráfica 3. Distribución las categorías del ICA para PCO2	29
Gráfica 4. Distribución las categorías del ICA para SOL2	30
Gráfica 5. Distribución las categorías del ICA para PCO1	30
Gráfica 6. Distribución las categorías del ICA para SOL1	31
Gráfica 7. Distribución las categorías del ICA para MBO1	31
Gráfica 8. Concentraciones (PM10) – V. del Viento(N)	35
Gráfica 9. Concentraciones (PM10) – V. del Viento(S)	35
Gráfica 10. Concentraciones (PM10) – H. Relativa(N)	36
Gráfica 11. Concentraciones (PM10) – H. Relativa(S)	37
Gráfica 12. Concentraciones (PM10) – Temperatura(N)	38
Gráfica 13. Concentraciones (PM10) – Temperatura(S)	38
Gráfica 14. Concentraciones (PM10) – Precipitación(N)	39
Gráfica 15. Concentraciones (PM10) – Precipitación(S)	40
Gráfica 16. Concentraciones de las estaciones en marzo.....	41
Gráfica 17. Concentraciones de las estaciones en abril.....	43
Gráfica 18. Concentraciones de las estaciones en mayo.....	44
Gráfica 19. Concentraciones de las estaciones en junio.....	46
Gráfica 20. Concentraciones de las estaciones en julio	47
Gráfica 21. Concentraciones de las estaciones en agosto.....	49
Gráfica 22. Concentraciones de las estaciones en septiembre.....	50
Gráfica 23. Concentraciones de las estaciones en octubre.....	53
Gráfica 24. Concentraciones de las estaciones en noviembre.....	54
Gráfica 25. Concentraciones de las estaciones en diciembre	55
Gráfica 26. Comportamiento de las concentraciones de PM10.....	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de las estaciones.....	14
Tabla 2. Banderas de no validez y su descripción.....	26
Tabla 3. Porcentaje de datos no validos durante el periodo de investigación.....	27
Tabla 4. Porcentaje (%) de datos en categorías ICA para cada estación por mes.....	28
Tabla 5. Distancia lineal (km) entre las estaciones del SVCA C.R.A.	32

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Evaluación de la concentración del material particulado con diámetros aerodinámicos menores a 10 μm (pm10) registrado en el primer año de operación del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico – C.R.A.

AUTOR(ES): Douglas Javier Vallejo Araújo

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Kento Taro Maraga Gómez

RESUMEN

El propósito de la investigación fue la evaluación Calidad del Aire en materia de PM10 durante el año 2017 en los municipios del área metropolitana de Barranquilla, que es una ciudad industrial y portuaria con características meteorológicas típicas de una zona costera, la alta humedad, los altos vientos y la alta temperatura. Utilizando la metodología expuesta por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (antes, MVADT) dentro del Protocolo de Calidad del Aire, se aplicó el Índice de Calidad del Aire ICA arrojando una buena calidad del aire para los municipios del área metropolitana. Además, se determinaron como los meses con mayor contaminación por PM10 a abril y mayo, meses en los que las condiciones meteorológicas fueron atípicas. También se descubrió la simetría y la homogeneidad en los registros de concentración de PM10 en la mayoría de las estaciones durante todo el año.

PALABRAS CLAVE:

Calidad del aire, material particulado, distribución espacial y temporal

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Evaluation of concentrations of particulate material with aerodynamic diameters less than 10 μm (PM10) registered in the first year of operation of the surveillance system of air quality of the Autonomous Regional Corporation of Atlantic C.R.A.

AUTHOR(S): Douglas Javier Vallejo Araújo

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Kento Taro Maraga Gómez

ABSTRACT

The purpose of this research was to evaluate the air quality in matter of PM10 during the year 2017 in the municipalities of the metropolitan area of Barranquilla, which is an industrial and port city with typical meteorological characteristics of a coastal zone, high humidity, high winds and high temperature. Using the methodology for the Ministry of Environment and Sustainable Development (formerly, MVADT) within the Air Quality Protocol, the ICA Air Quality Index was applied, yielding good air quality for the municipalities of the metropolitan area. It was also determined as the months with the highest contamination by PM10 to April and May, months in which the meteorological conditions were atypical. Also, symmetry and homogeneity were found in PM10 concentration records in most stations throughout the evaluation year.

KEYWORDS:

Air quality, particulate material, space and temporal distributions

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se evidenció el comportamiento de la concentración de PM10 en condiciones atmosféricas habituales de una zona costera como el Área Metropolitana de Barranquilla, además se incentiva la proposición de proyectos de investigación en materia de salud y contaminación atmosférica en la costa norte de Colombia.

Una ciudad que basa su economía en el sector industrial y portuario, además tener una zona metropolitana bastante extensa incluyendo los municipios: Puerto Colombia, Soledad, Malambo y Galapa. De los cuales el primero se encuentra ubicado al norte de la ciudad y a orillas del mar Caribe; el segundo al sur de la ciudad y tan cercano que el límite entre ambas ciudades es la Avenida Circunvalar (extensión del Boulevard de Simón Bolívar) desde la calle 30 hasta el puente del barrio Los Almendros (calle 51B). El tercero, que limita hacia el norte con Soledad y que comparten dentro de su territorio el Aeropuerto Ernesto Cortissoz. El último municipio no cuenta con estación de vigilancia, por lo cual no hizo parte de esta investigación.

El documento contiene las bases de datos de cinco estaciones automáticas de monitoreo de PM10, que registraron un total de 36.725 datos de concentración crudos desde el 1 de marzo hasta el 31 de diciembre de 2017, un promedio de 7.345 datos por estación, junto con el análisis de estos valores y la aplicación de la metodología expuesta por el Protocolo de Monitoreo del Ministerio de Ambiente, para la determinación del Índice de Calidad del Aire ICA.

También se identificó la afectación de eventos antropogénicos sobre la calidad del aire y el comportamiento sincronizado de las estaciones de monitoreo a pesar de encontrarse a distancias largas entre ellas. Además, se observó la implicación de las condiciones meteorológicas sobre la concentración de PM10 en el aire, sumándole la afectación de las industrias sobre las poblaciones cercanas.

Para efectos de esta investigación, cabe resaltar que se realizará con los primeros datos que arrojó el sistema de vigilancia adquirido por la C.R.A.; por tal motivo no existen investigaciones anteriores con respecto al comportamiento de PM10 en la zona de estudio.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general.

Evaluar la calidad del aire con respecto a las concentraciones de PM10 obtenidas durante el primer año de operación del SVCA de la C.R.A.

1.2. Objetivos específicos.

1. Analizar la validez estadística de los datos de concentraciones registrados por los equipos de PM10 de las estaciones del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire.
2. Construir las distribuciones espaciales y temporales de los puntos de muestreo de las estaciones del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire.
3. Determinar los puntos con registros atípicos y con afectación directa sobre los alrededores de las estaciones del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire.

2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Este proyecto tiene como alcance, analizar el primer año de operación del SVCA de la C.R.A. describiendo y analizando el comportamiento del material particulado menor a 10 μm (PM10) durante el tiempo de muestreo. Adicionalmente, determinar si las concentraciones del contaminante encontradas son perjudiciales para la salud humana en los puntos donde se ubicaron.

También se busca sentar las primeras bases de investigación a nivel de calidad del aire en el departamento del Atlántico, específicamente en términos de PM10, buscando motivar a las universidades de la zona y corporaciones con jurisdicción a enfocarse en la mejoría de la calidad del aire que se respira en el Atlántico.

Además de lo anterior, se pretende contribuir con la creación del primer reporte anual del SVCA de la C.R.A. importante para mostrar los resultados de la inversión en la compra y operación de esta red. Se espera producir una base de datos de más de 37.000 muestreos validados y analizados que se tomaron durante el periodo DIC16-DIC17.

Teniendo en cuenta lo anterior, el estudio incluirá las bases datos de concentración de material suspendido en el aire con diámetros aerodinámicos menores a 10 μm (PM10) registrados durante el 1 de marzo y el 31 de diciembre del año 2017 en las estaciones automáticas del SVCA de la C.R.A. Las estaciones que se tomarán para este estudio se muestran en la tabla 1, donde se describe también la ubicación y la importancia de cada una de ellas.

Cada una de las cinco estaciones, se encuentran situadas en zonas residenciales con influencia de vías de alto flujo vehicular y zonas comerciales (Tabla 1). Sin embargo, las estaciones de SOL1 y MBO1 tienen influencia indirecta de zonas industriales como la Calle 18 y el Parque Industrial de Malambo, respectivamente.

También se utilizarán los datos de estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM ubicadas en Las Flores (Norte) y en el Aeropuerto Internacional Ernesto Cortissoz (Sur), con los cuales se buscarán correlaciones entre las variables meteorológicas velocidad de viento, humedad relativa, temperatura y precipitación con las concentraciones de PM10 en cada punto de muestreo.

Tabla 1. Descripción de las estaciones.

Nombre	Ubicación	Importancia
PCO1	Alcaldía de Puerto Colombia (Norte)	La sede de la alcaldía de Puerto Colombia, se encuentra en todo el centro de la plaza principal y de la cabecera municipal, a pocos metros del ingreso al muelle, el sector histórico y turístico del municipio.

PCO2	Estación de Bomberos de Puerto Colombia (Norte)	La estación se encuentra sobre la vía alterna a puerto Colombia, al lado de la entrada al castillo de Salgar. Entre la vía y el corregimiento de Salgar.
SOL1	Estación de Policía de Hipódromo (Sur)	En la Carrera 30 con Calle 26, zona central y comercial del barrio hipódromo, donde se genera alto flujo vehicular. Esta vía también conecta dos avenidas principales la calle 30 (vía al aeropuerto) con la calle 18 (centro histórico de soledad)
SOL2	EDUMAS (Sur)	Ubicado en el límite entre la ciudad de Barranquilla y Soledad, a pocos metros de la avenida circunvalar vía que conecta la ciudad de norte a sur y viceversa, con tres carriles por sentido. Además, corredor obligatorio entre Santa Marta (Ruta del Sol) y Cartagena.
MBO1	Antigua Alcaldía de Malambo (Sur)	Esta sede se ubica en la vía principal de acceso y salida del municipio. Una zona comercial y residencial que está muy cerca de la Vía Oriental (Calle 30 – vía al aeropuerto) que conduce hacia Montería y Medellín, con alto flujo vehicular de carga y transporte.

Fuente: Autor

3. ANTECEDENTES

Desde los inicios de nuestra civilización, propiamente dicha, hemos estado modificando nuestro entorno, a tal fin, que se ha cambiado la composición química del aire que respiramos, volviéndolo más denso y cargado de materiales que solo podrían presentarse naturalmente en el aire por eventos muy aislados, como erupciones volcánicas. A pesar de eso, la humanidad ha resistido el asedio de cientos de enfermedades causadas por nuestro propio consumismo y afán por crecer como civilización.

No obstante, entidades no gubernamentales como la Organización Mundial para la Salud se han preocupado por la calidad de vida de más de 7.300 millones de individuos alrededor del mundo. Una de sus áreas de trabajo es prevenir los decesos relacionados con enfermedades respiratorias, a las cuales se le atribuye unos 3 millones de muertes solo por causa del material particulado menor a $10\text{ }\mu\text{m}$ (PM10). Estas partículas, son una composición de material suspendido amorfo de cualquier tipo de sustancia que es capaz de entrar directamente en los pulmones (WHO, 2016).

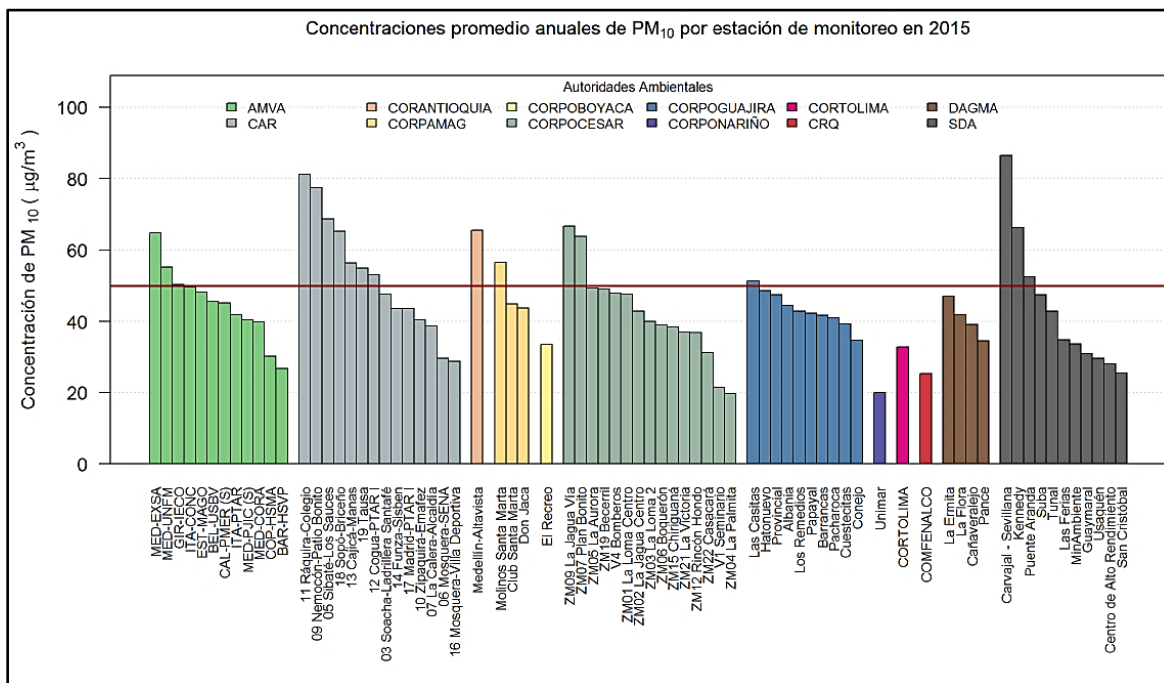
El material particulado menor a $10\text{ }\mu\text{m}$ o por sus siglas en inglés PM10, contiene una subcategoría denominada PM2.5 (menor a $2.5\text{ }\mu\text{m}$) las cuales son mucho más peligrosas, ya que por su diminuto tamaño son capaces de alojarse en el torrente sanguíneo de manera directa, y así afectar al individuo que las respire. Sin embargo, los equipos de monitoreo de esta subcategoría son muy pocos y solo son usados en lugares donde se sabe que se pueden generar estas partículas, como zonas mineras o cerca de industrias petroleras y de refinería (WHO, 2016).

Existe una red mucho mayor para la toma de muestras de PM10. En Latinoamérica según el Clean Air Institute de Estados Unidos en su informe del año 2012, informa que para el 2011 existían en los países de América Latina 86 estaciones automáticas de muestreo de PM10 y 37 estaciones solo para PM2.5 (CAI, 2012). Para el 2016 Colombia contaba con un total de 163 estaciones de monitoreo de las cuales el 80% monitoreaba PM10 entre automáticas y semiautomáticas (IDEAM – MINAMBIENTE, 2016), lo cual hace que el PM10 sea el contaminante criterio de mayor evaluación dentro del territorio nacional.

En Colombia, ciudades como Medellín y Bogotá presentan los mayores niveles de contaminación del aire. La zona sur y centro del Valle de Aburrá (Medellín) así mismo el sector suroccidental de la ciudad de Bogotá son los más afectados por la mala calidad del aire (Revista Semana, 2017). Esto sumado al crecimiento del parque automotor de estas dos ciudades y a la geografía montañosa de la zona agravan más la problemática.

En el informe de trabajo del IDEAM y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MINAMBIENTE en el 2016, que presentaba la evolución de los SVCA del país desde 2011 hasta el 2015, encontrando que para PM10 entre los periodos anteriormente mencionados las concentraciones en área del Valle de Aburrá, la CAR, Bucaramanga y Bogotá marcaron en momentos en la categorización del ICA entre moderada y dañina para grupos sensibles (IDEAM y MINAMBIENTE, 2016). También muestra (Gráfica 1)

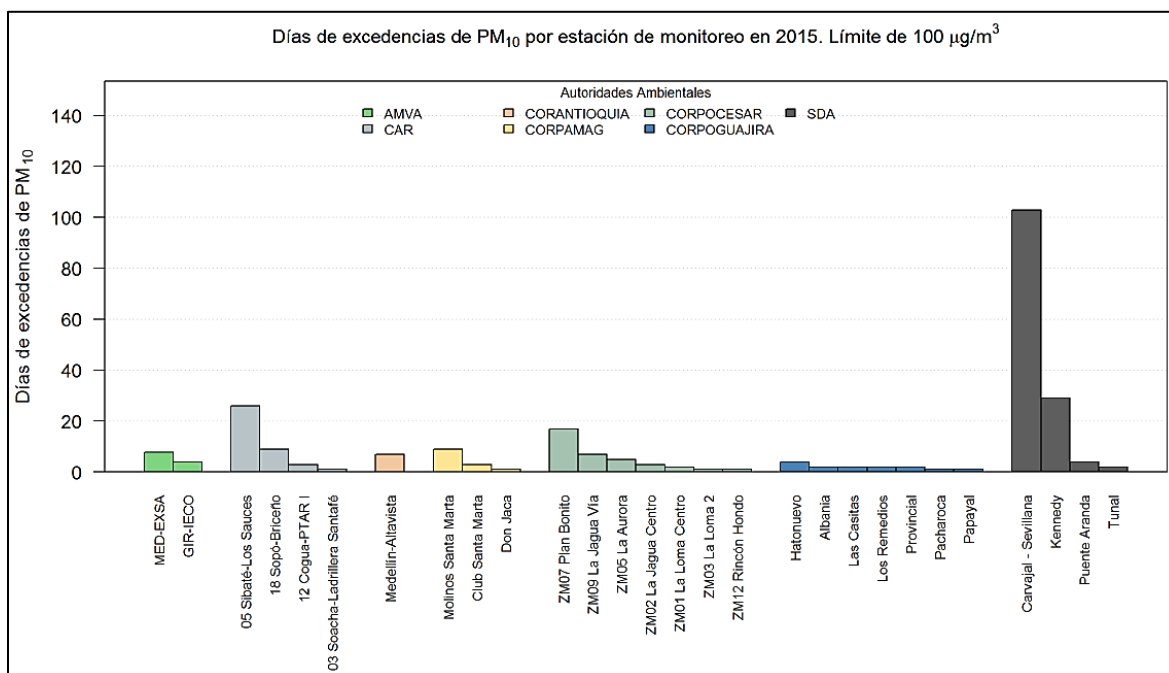
las concentraciones promedio anual del 2015 con respecto a las estaciones de monitoreo a nivel nacional, las cuáles superaron los límites permitidos establecidos en la resolución 610 de 2010 del MINAMBIENTE, el nombre de las estaciones y la corporación autónoma a la que pertenecen.



Gráfica 1. Concentración promedio anuales de PM10 por estación de monitoreo en 2015. Línea roja: Concentración máxima anual para PM10 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) Fuente: IDEAM y MINAMBIENTE (2016) p 63.

Adicionalmente se evidencia el número de días en que se excedió el límite permitido para PM10 durante el 2015 para las estaciones de las diferentes corporaciones. Esto indica como el comportamiento del PM10 es constante durante un año de operación en cada punto de muestreo. También muestra las localidades y zonas más propensas a respirar un aire con menor calidad, lo cual puede desencadenar en enfermedades de tipo respiratoria y cardiacas. En este informe se concluye que las ciudades que registraron un mayor número de días por encima del límite permitido por la resolución 610 de 2010 son Bogotá, Bucaramanga y Medellín (Valle de Aburrá), además existen otras corporaciones que presentan excedencia en los monitoreos dentro de su jurisdicción, pero las ciudades antes mencionadas cobran más importancia ya que, el número de

personas afectadas y el riesgo de contraer alguna enfermedad asociada es mucho mayor (Gráfica 2).



Gráfica 2. Días de excedencia de PM₁₀ por estación de monitoreo en 2015. Fuente: IDEAM y MINAMBIENTE (2016), p 69.

A nivel nacional, existe una base muy completa de las concentraciones de PM₁₀ en cada ciudad importante o lugar de especial interés, esto debido al Sistema de Información de Calidad del Aire SISAIREs. Sin embargo, en el Atlántico y sobretodo en Barranquilla y los municipios de su área metropolitana, no se cuenta con valores o bases de datos de estas concentraciones de material particulado. Hasta finales del 2016 cuando se instalaron las primeras dos estaciones en Soledad y Malambo fue que comenzó a crearse el SVCA de la C.R.A., la cuales actualmente cuenta con dos estaciones en puerto Colombia, dos Malambo, una en Luruaco y dos en Soledad, y ya está proyectada la tercera para este último municipio (El Heraldo, 2016).

4. MARCO TEÓRICO

Contaminación atmosférica

Se entiende por contaminación atmosférica la presencia en la atmósfera de sustancias en una cantidad que implique molestias o riesgo para la salud de las personas y de los demás seres vivos, vienen de cualquier naturaleza (Martínez & Díaz, 2004). Estas sustancias pueden ser de origen gaseoso, líquido o sólido que en diferentes tamaños y composiciones se mezclan en el aire que respiran la mayoría de los seres vivos del planeta.

Así mismo, la contaminación atmosférica se puede presentar de carácter local o global, la primera se presenta cuando ocurren condiciones climáticas y de emisiones específicas de una localidad o ciudad que incrementan la concentración de contaminantes en ese punto, por ejemplo, la niebla tóxica de Donora, Pensilvania en 1948, en donde unas condiciones específicas y las emisiones de azufre, flúor y otros contaminantes generó una niebla tóxica por 5 días que mató a más de 20 personas. Por otra parte, la contaminación atmosférica de carácter global se presenta cuando eventos masivos emiten grandes cantidades de contaminantes que se mezclan en las diferentes capas de aire logrando afectar localidades a kilómetros de distancia, en este caso un evento natural como la erupción del volcán Eyjafjallajökull en Islandia en 2010, provocó una nube de cenizas que llegó hasta el continente europeo obligando a la cancelación de miles de vuelos y a que los ciudadanos tomaran medidas de prevención como el uso de tapabocas.

Partículas en suspensión

Las partículas en suspensión (o material particulado, PM) son una serie de diminutos cuerpos sólidos o de gotitas de líquidos dispersos en la atmósfera. Son generadas a partir de alguna actividad antropogénica o natural (Spiro & Stigliani, 1996). Estas hacen parte de los contaminantes atmosféricos y las cuales han sido priorizadas por la Organización Mundial para la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), la cual estima que, en 2016 aproximadamente el 58% de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación atmosférica se debieron a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, mientras el 18% de las muertes se debieron a enfermedad pulmonar obstructiva crónica e infecciones respiratorias agudas (WHO, 2016).

Los principales componentes de las PM son los sulfatos, nitratos, amoníaco, el cloruro de sodio, el hollín, los polvos minerales y el agua (WHO, 2016). Dada la alta variación de sus componentes, las PM son categorizadas por su tamaño, las cuales pueden ir desde 10 micrones (μm) hasta menores a 1 micrón (μm) lo cual las hace muy peligrosas, ya que pueden alojarse desde las fosas nasales hasta ingresar en el torrente sanguíneo provocando graves daños al cuerpo.

PM10

Se refiere a partículas con un diámetro aerodinámico de 10 micrones (μm) o menos, para comparación, un cabello humano es de aproximadamente 50 a 100 micrones (μm) (California Environmental Protection Agency, 2011). A esta categoría se le conoce como PM10 la cual contiene dentro de si todas las partículas con diámetros aerodinámicos menores 10 μm , incluyendo las que son consideradas más peligrosas como las de 2,5 μm que pueden introducirse en el sistema circulatorio, por ende, a los órganos inhibiendo procesos vitales y generando graves daños al cuerpo.

La mayoría de las agencias gubernamentales han establecido límites para las concentraciones de este material en el aire dependiendo de diámetro aerodinámico y su tiempo de exposición. Para Colombia, la concentración permisible a 24 horas para PM10 es de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la concentración promedio anual no puede superar los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, todo esto se encuentra establecido en la resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA)

Un Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire SVCA es un conjunto de procesos, herramientas e instrumentos que tienen como fin el determinar los niveles de inmisión que se dan en un área determinada (MVADT, 2008). Lo cual lo referencia como la primera línea de trabajo en materia de contaminación atmosférica para cualquier autoridad ambiental, es decir, que para el desarrollo de cualquier plan de gestión que busque mejorar la calidad del aire, es necesario tener un SVCA acorde a las necesidades del lugar de investigación.

Generalmente un SVCA posee diferentes instrumentos de medición de parámetros, como son, los analizadores de partículas (PM, Black Carbon, etc.), analizadores de gases (O_3 troposférico, NOX, SOx, etc.) y medidores meteorológicos. Dependiendo de su complejidad algunos de estos sistemas pueden ser automático, híbridos o manuales, y pueden contener alguno de estos analizadores o todos, dependiendo de las necesidades del punto de muestreo.

Las bases de datos que generan esos SVCA son utilizados para la elaboración de informes y boletines para la socialización de los resultados, dado que estos datos sobre concentraciones de contaminantes en el aire presentan un alto grado de complejidad en su comprensión, se utiliza un Índice para mostrar el grado de contaminación.

Índice de Calidad del Aire (ICA)

El Índice de Calidad del Aire (AQI, por sus siglas en inglés) fue diseñado primeramente por la Environmental Protection Agency (EPA-US) y adaptado por el antiguo Ministerio de Vivienda, Ambiente y Desarrollo Territorial en el 2008, dentro del manual de operación del protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, como base de los

informes periódicos y anuales que las corporaciones autónomas entregan al Ministerio con respecto a la calidad del aire en su jurisdicción.

El ICA permitirá comparar los niveles de contaminación de calidad del aire, de las autoridades ambientales o entidades, que cuenten con un SVCA. El ICA corresponde a una escala numérica a la cual se le asigna un color, el cual a su vez tiene una relación con los efectos a la salud (MVADT, 2008).

Meteorología

La meteorología es la ciencia de la atmósfera. La atmósfera es el medio en el que se emiten los contaminantes del aire. Procesos atmosféricos tales como el movimiento del aire (viento) y el intercambio de calor (por ejemplo, la convección y la radiación) determinan el destino de los contaminantes a medida que pasan por las etapas de transporte, dispersión, transformación y remoción. La meteorología de la contaminación del aire es el estudio de cómo estos procesos atmosféricos afectan el destino de los contaminantes del aire (PAHO, 2016).

Para realizar actividades relativas a la planificación de la calidad del aire es imprescindible comprender la meteorología de la contaminación del aire y su influencia en la dispersión de las sustancias contaminantes. Los planificadores emplean este conocimiento para ayudar a localizar las estaciones de monitoreo de contaminación del aire y para desarrollar planes de implementación orientados al cumplimiento de los estándares de calidad del aire en exteriores. 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 (PAHO, 2016).

Los parámetros meteorológicos que más afectan las concentraciones de contaminantes en el aire son la velocidad y dirección del viento, la temperatura, la radiación solar y las precipitaciones.

5. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto y poder alcanzar los objetivos propuestos, fue necesario ejecutar los siguientes ítems:

5.1. Revisión de Normativa.

Desde el año 2011 MINAMBIENTE, apoyado por un conjunto de normativas y decretos, ha creado una base de datos amplia y de acceso libre para poder conocer el estado de la calidad del aire de mayoría de las ciudades del país. Sin embargo, se debe tener en cuenta que todas las ciudades colombianas ofrecen condiciones climáticas y geográficas totalmente diferentes, lo cual podría suponer que el comportamiento del PM10 sería diferente en cada ciudad. Para esta investigación se tendrá en cuenta la resolución 2254 de 2017, donde se dispone las concentraciones máximas permitidas para contaminantes en aire.

Además de utilizar el ICA diseñado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire en 2008, para poder realizar una investigación objetiva que pueda comparar con otros informes realizados a nivel nacional.

5.2. Solicitud de datos de muestreo de PM10 del periodo DIC16-DIC17 a la C.R.A.

Las muestras fueron solicitadas en dos periodos, marzo-junio y julio-diciembre del 2017, no se tomaran en cuenta los dos primeros meses de operación, ya que estos fueron utilizados para el ajuste de los equipos y es posible que los datos obtenidos durante este periodo no brinden una alta confiabilidad. Cabe resaltar que los datos fueron solicitados directamente a la C.R.A. y no fueron descargados del Sistema de Información de Calidad del Aire SISAIREs ya que estos datos ya fueron procesados, y para el buen desarrollo del proyecto se pidieron los datos crudos directo de los analizadores.

Además, fueron solicitados los datos de Velocidad del Viento, Temperatura, Humedad, Dirección del viento y precipitación de los puntos donde se encuentran las estaciones. Para poder hacer una comparación de datos y poder validar los registros del muestreo de PM10. También se solicitaron los datos de la estación meteorológica del IDEAM ubicada en el Aeropuerto Internacional Ernesto Cortissoz de Barranquilla y en Las Flores.

5.3. Validación del muestreo y descarte de datos con errores o anómalos.

Se utilizó el protocolo diseñado en el año 2008 por el MinAmbiente (antes MAVDT), en donde se dispone de una serie de procedimiento para la validación de datos obtenidos de un SVCA. Además de la presentación de los mismos y las operaciones estadísticas para la obtención de los promedios diarios y anuales. Estos procedimientos se presentan a continuación:

5.3.1. Revisión de datos.

En esta etapa se realizó una revisión preliminar no solo de los datos si no de los posibles errores o fallas que se hayan presentado en campo y que deben ser informados por el operador de campo, en este caso se puede hacer un descarte manual de datos dependiendo de la fecha de la falla o del error encontrado en campo. Los aspectos que se tuvieron en cuenta al momento de realizar esta revisión y que se desglosan en el Protocolo del MINAMBIENTE fueron:

- Características e historia de instrumentos.
- Factores de calibración y tendencias.
- Datos fuera del intervalo o negativos.
- Picos o aumentos repentinos.
- Características del sitio de vigilancia.
- Efectos de la meteorología.
- Época del año y hora del día.
- Niveles de otros contaminantes.
- Observaciones desde otros sitios.
- Eventos especiales (marchas, incendios, días festivos, etc.).

5.3.2. Validación.

Existen tres etapas para la validación la primera consta de las revisiones que se puedan hacer por parte del operador de campo y los registros que este pueda dar de fallas y errores en la estación de monitoreo. En segundo lugar, se debe tener en cuenta que los equipos automáticos poseen software de control diseñados para validar los datos que están registrando, esto da un mayor margen de confiabilidad en el equipo de monitoreo. Por último, la revisión manual del encargado del manejo los datos, esto puede realizarse a través de software o de métodos estadísticos y gráficas.

5.4. Aplicación del Índice de Calidad del Aire (ICA) desarrollado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para PM10.

El Índice de Calidad del Aire, contenido dentro del mismo protocolo de MinAmbiente, categoriza los niveles de contaminación por coloraciones dependiendo del riesgo que pueda generar hacia la salud de los pobladores expuestos.

Para llegar esta categorización es necesario aplicar una ecuación, donde da como resultado final el índice para esas 24h de muestreo, esto para el caso de PM10. A Continuación se muestra la ecuación que se utilizó (Ecuación 1) con la descripción de cada una de las variables.

Ecuación 1. Fórmula para el cálculo del ICA. Fuente: MAVDT (2008), p. 282.

$$I_P = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_P - BP_{Lo}) + I_{Lo}$$

Donde:

I_P = Índice para el contaminante p.

C_P = Concentración medida para el contaminante p.

BP_{Hi} = Punto de corte mayor o igual a C_P .

BP_{Lo} = Punto de corte menor o igual a C_P .

I_{Hi} = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente al BP_{Hi} .

I_{Lo} = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente al BP_{Lo} .

En este protocolo se muestran también los rangos con los cuales la ecuación 1 trabaja para diferentes contaminantes (Ilustración 1). Los colores de cada ítem dentro de la tabla definen el nivel de riesgo hacia la salud y la calidad del aire, verde = bueno, amarillo = desfavorable g.s., naranja = desfavorable, rojo = muy desfavorable y púrpura = peligroso. Enseguida se muestra la tabla de los puntos de corte del ICA.

Índice de la calidad del aire			Puntos de corte del ICA						
ICA	Color	Categoría	PM ₁₀ µg/m 24 horas	PM _{2.5} µg/m 24 horas	CO µg/m 8 horas	SO ₂ µg/m 1 hora	NO ₂ µg/m 1 hora	O ₃ µg/m 8 horas	O ₃ µg/m 1 hora
0-50	Verde	Buena	0 - 54	0 - 12	0 - 5094	0 - 93	0 - 100	0 - 106	
51-100	Amarillo	Aceptable	55 - 154	13 - 37	5095 - 10819	94 - 197	101 - 189	107 - 138	-----
101-150	Naranja	Dañina a la salud de grupos sensibles	155 - 254	38 - 55	10820 - 14254	198 - 486	190 - 677	139 - 167	245 - 323
151-200	Rojo	Dañina a la salud	255 - 354	56 - 150	14255 - 17688	487 - 797	678 - 1221	168 - 207	324 - 401
201-300	Púrpura	Muy dañina a la salud	355 - 424	151 - 250	17689 - 34862	798 - 1583	1222 - 2349	208 - 393	402 - 794
301-500	Marrón	Peligrosa	425 - 604	251 - 500	34863 - 57703	1584 - 2629	2350 - 3853	394 ^(a)	795 - 1185

Ilustración 1. Límites para el ICA. Fuente: Resolución 2254 de 2017.

5.5. Comparación de registros de PM₁₀ del SVCA frente a la normativa nacional, OMS y US-EPA.

En la resolución 2254 del año 2017 se dan los límites permisibles dentro del territorio colombiano con respecto a los contaminantes criterio del aire. En este caso el PM₁₀ tiene por límite de 24h una concentración promedio de 100µm/m³ y para el promedio anual una concentración de 50µm/m³. A continuación (Ilustración 2), muestra los valores para esta resolución.

Contaminante	Nivel máximo Permissible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	50	24 horas
SO ₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 hora
O ₃	100	8 horas
CO	5.000	8 horas
	35.000	1 hora

Ilustración 2. Contaminantes y sus niveles límites. Fuente: Resolución 2254 de 2017.

Para la OMS los límites permisibles son mucho más estrictos, con el fin de motivar a las naciones a mejorar su calidad del aire y así evitar decesos a causa del material particulado. En sus directrices la OMS da como valor máximo de concentración permitido para 24h de PM₁₀ de $50\mu\text{m}/\text{m}^3$ y fija el promedio anual en $20\mu\text{m}/\text{m}^3$ (WHO, 2016).

La Agencia de Protección Ambiental (US-EPA, por sus siglas en inglés) fija sus estándares de calidad de aire un poco más elevado, esto debido a las condiciones muy diferentes con respecto a economía y desarrollo de la nación estadounidense. Para PM₁₀ fija una concentración máxima de $150\mu\text{m}/\text{m}^3$ para 24h sin embargo tiene una condición restringente donde este límite no puede superarse por más de una ocasión en el año durante tres años, igualmente para la concentración promedio anual fija un límite máximo de $50\mu\text{m}/\text{m}^3$ esta promediada utilizando los tres años inmediatamente anteriores. (NAAQS, 2012)

5.6. Análisis de las distribuciones espaciales y temporales de la concentración de PM₁₀ en el área de estudio.

Luego de validar los datos y compararlos frente a la normativa, se realizó la elaboración de gráficas para el análisis de los valores encontrados. Estas graficas tienen como objetivo medir la evolución y el comportamiento del PM₁₀ durante diferentes meses y con condiciones climáticas variables, además de poder examinar los muestreos del mismo mes en las diferentes ubicaciones. También se busca poder encontrar la relación entre las variables de concentración de material particulado y las variables meteorológicas, que pueda determinar un comportamiento habitual y/o predecible en condiciones climáticas dadas.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para lograr una mayor comprensión de estos resultados la presentación de estos análisis se realizará de manera temporal (meses) y espacial (estación), además para poder realizar la revisión de los datos fue necesario definir los datos válidos y usar el ICA para determinar la categorización de las concentraciones de PM10.

Para comenzar, es necesario aclarar que las concentraciones corresponden a los promedios 24h que se estipulan por la resolución 2254 del 1 de noviembre de 2017 que entró en vigencia para el 1 de enero d 2018, y que, aunque los datos utilizados en esta investigación fueron registrados antes de la entrada en vigencia de esta resolución, se realizaron las evaluaciones con respecto a esta norma vigente al momento del planteamiento de este proyecto.

6.1. Validación de datos.

En estos resultados se puede observar, las diferentes categorías por las cuales se puede validar un dato o no. Las banderas que se utilizaron en esta investigación se muestran a continuación, y son una recopilación de las establecidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (antes, MAVDT) en el Protocolo de los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire junto con la experiencia adquirida durante el proceso de operación del SVCA C.R.A. (Tabla 2).

Tabla 2. Banderas de no validez y su descripción.

Código	Validez	Descripción
M	NO	Dato erróneo por razones desconocidas.
E	NO	Fallo eléctrico.
F	NO	Fallo en la corriente eléctrica
O	NO	Dato negativo

Fuente: Autor.

Para la mayor comprensión de esta investigación se mostrará una revisión de los datos no validos por mes y estación donde se realizará un análisis con respecto a los porcentajes de datos descartados por las diferentes banderas. A continuación, se presenta una tabla (Tabla 3) con todos los porcentajes donde se puede determinar el total de datos no validos dentro de toda la investigación, cabe aclarar que hubo momentos en los que las estaciones salieron de funcionamiento por razones ajenas a esta investigación.

En esta tabla se puede observar un comportamiento descriptivo de las estaciones y es que el porcentaje datos descartados o no validos aumenta progresivamente hasta que le quipo queda fuera de servicio, es decir, que el equipo analizador de partículas muestra evidencias de daño antes de quedar inoperante. También se observa que el porcentaje más bajo durante el periodo de investigación se presentó en SOL1 con un 0,81% de datos no validos en el mes de octubre, aunque hay que resaltar que en PCO1 y en SOL2 se alcanzaron registros entre el 1 y 2 porciento. Solo PCO2 obtuvo porcentajes entre 2 y

3 por ciento y MBO1 obtuvo registros por encima de 3,23%. Esto para los porcentajes más bajos de datos descartados o no válidos.

Por otra parte, el registro más alto durante el periodo de investigación lo obtuvo SOL2 con un 86,96% de datos no validos en diciembre, el segundo registro más alto lo genero MBO1 con un 72,92% para el mes de noviembre. Los porcentajes más altos de las estaciones PCO1, PCO2 y SOL1 son del 35,75% para julio, 35,56% para agosto y 11,83% para marzo, respectivamente.

Tabla 3. Porcentaje de datos no validos durante el periodo de investigación.

Mes	PCO1	PCO2	SOL1	SOL2	MBO1
Marzo	8,60%	14,11%	11,83%	3,23%	3,23%
Abril	8,75%	35,56%	-	1,53%	5,00%
Mayo	3,90%	10,35%	-	1,88%	8,33%
Junio	5,14%	2,50%	9,72%	4,44%	3,75%
Julio	35,75%	4,57%	5,91%	5,11%	3,36%
Agosto	-	13,31%	5,24%	5,38%	4,03%
Septiembre	1,25%	5,97%	1,25%	1,39%	5,56%
Octubre	1,61%	5,65%	0,81%	22,58%	33,33%
Noviembre	3,33%	16,81%	1,53%	49,31%	72,92%
Diciembre	18,68%	32,26%	4,57%	86,96%	-

Fuente: Autor.

6.2. Índice de Calidad del Aire ICA.

Para esta etapa de los análisis se tendrá en cuenta la categorización establecida por MinAmbiente a través del ICA, en donde se determina la calidad del aire. Este método utiliza una segmentación de colores para definir el estado del aire en base a las concentraciones registradas por los equipos automáticos, en esta investigación y durante el periodo evaluado solo se registraron índices dentro de las dos primeras categorías, buena (verde) y aceptable (amarillo) además, para efectos de esta investigación se muestran los porcentajes de datos (negro) que se registraron en 0,0 de manera continua y que afectan el cálculo del promedio de 24h utilizado en esta metodología.

Entendiendo que por la extensión de datos y el número de estaciones evaluadas se realizó una tabla (Tabla 4) que agrupa los porcentajes de datos correspondientes cada categoría, por mes y estación.

En esta última tabla se puede observar el comportamiento de las concentraciones con respecto a la calidad del aire que rodea cada punto de muestreo. Como datos para resaltar se puede evidenciar que para el mes de marzo las estaciones PCO1 y SOL2 alcanzaron el 100% de registros de concentración dentro de la categorización “Bueno”, y las otras tres estaciones estuvieron por encima del 82,2% (MBO1) de concentraciones dentro de la misma categoría.

Tabla 4. Porcentaje (%) de datos en categorías ICA para cada estación por mes.

Est.	Cat.	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PCO1	Bu	100	47,2	49,0	60,9	46,9	0,0	96,4	84,8	100	83,9
	Ac	0,0	52,8	51,0	39,1	24,2	0,0	3,6	15,2	0,0	16,1
	No	0,0	0,0	0,0	0,0	29,0	100	0,0	0,0	0,0	0,0
PCO2	Bu	99,9	53,0	71,3	87,0	97,5	98,5	100	95,4	99,9	71,7
	Ac	0,0	29,0	28,7	13,0	2,6	0,5	0,0	4,6	0,0	1,9
	No	0,1	18,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,1	26,4
SOL1	Bu	86,3	0,0	0,0	79,9	67,3	78,5	68,5	70,1	81,1	71,3
	Ac	8,1	0,0	0,0	17,1	32,8	21,5	31,5	29,9	18,9	28,7
	No	5,6	100	100	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SOL2	Bu	100	40,8	64,6	79,8	74,4	83,6	90,4	90,6	93,8	12,2
	Ac	0,0	59,2	35,4	20,1	25,6	16,4	9,6	7,7	0,4	11,7
	No	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	5,8	76,1
MBO1	Bu	82,2	35,4	53,6	61,3	59,6	74,5	96,3	71,8	29,8	0,0
	Ac	17,9	64,6	46,4	38,7	40,4	25,5	3,7	4,6	3,3	0,0
	No	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23,6	66,9	100

Bu: Bueno (verde), Ac: Aceptable (amarillo) y No: No dato (negro). Fuente: Autor.

Diferente a lo anterior se encuentra el mes de abril, donde se puede ver que los porcentajes mayores de las concentraciones se encuentran en la categoría “Aceptable”, en donde, MBO1 registra el 64,6% de las concentraciones en esta categoría, seguido de SOL2 con el 59,2%. De igual manera las estaciones de PCO1 y PCO2 registraron en esta categoría porcentajes del 52,8% y 29% respectivamente, además cabe mencionar que la estación SOL1 se encontraba fuera de servicio por tal motivo registra un 100% de no dato.

Estos últimos porcentajes corresponden también a los más altos de esta categoría “Aceptable” durante todo el periodo de investigación, por lo que se podría decir que el mes de abril del año 2017 fue el que presentó peor calidad de aire para PM10 según el ICA.

Para el mes de mayo, los porcentajes de la categoría “Bueno” aumentaron, sin embargo, durante este mes se registraron los segundos porcentajes más altos de la categoría en amarillo, lo que podría indicar una mejoría en la calidad del aire con respecto al mes anterior. Este comportamiento varió durante los meses de junio, julio y agosto donde en general, las conductas de las concentraciones, por ende, del ICA, fueron hacia la mejora de la calidad del aire.

Durante los meses de septiembre, octubre y noviembre se volvieron a presentar porcentajes del 100% para la categoría verde en las estaciones PCO1 y PCO2, además las otras tres estaciones tuvieron registros por encima del 70,1% para la misma categoría. Finalmente, para el mes de diciembre se pudo constatar que solo tres de las cinco estaciones se encontraban en total funcionamiento, PCO1, PCO2 y SOL1 todas por encima de 71,3% en la categoría ICA “Bueno”.

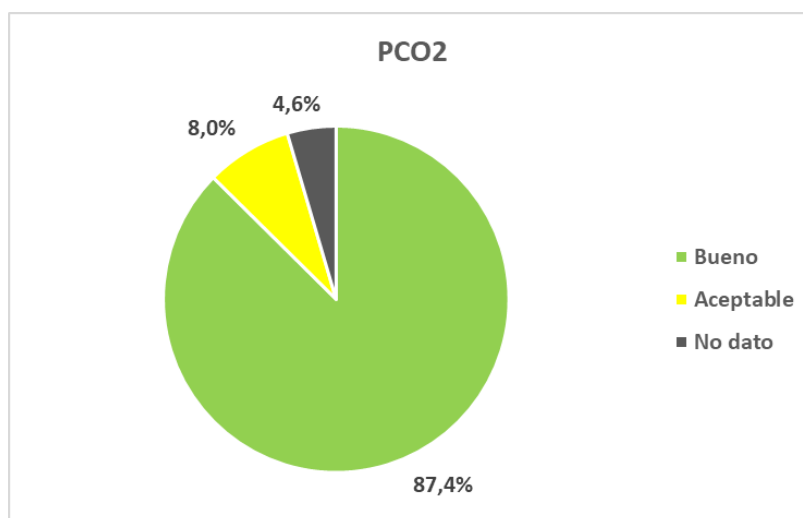
Por último, es importante resaltar la tercera categoría en negro donde se evidencia la importancia de los otros dos porcentajes. Ya que se pudo observar, que son directamente proporcionales al tiempo que el equipo estuvo fuera de servicio durante el mes de análisis. En este orden de ideas las estaciones que presentan mayor porcentaje de esa categoría no se podrán tener en cuenta durante ese mes ya que existe muy pocos datos con los cuales trabajar.

En general, se puede decir que existió durante los primeros cinco meses de estudio una calidad del aire mucho peor que la de los ultimo cinco meses de evaluación. Donde el mes de abril de 2017 presentó los porcentajes más alto en la categoría “Aceptable”, en donde se evidencio una disminución de estos porcentajes a medida que trascurrían los meses hasta ser superado por la categoría “Bueno” en septiembre de 2017.

En esta parte de los resultados se mostrarán los diagramas de categorizaciones totales por cada estación, aquí se podrá observar las estaciones que presentan mejor y peor calidad del aire para PM10 en sus respectivos puntos de muestreo. Comenzando por el punto de mejor calidad y terminando con el peor con respecto a los resultados de las concentraciones tomada por los equipos analizadores y la aplicación de la metodología ICA de MinAmbiente.

6.2.1 Categorización ICA para PCO2.

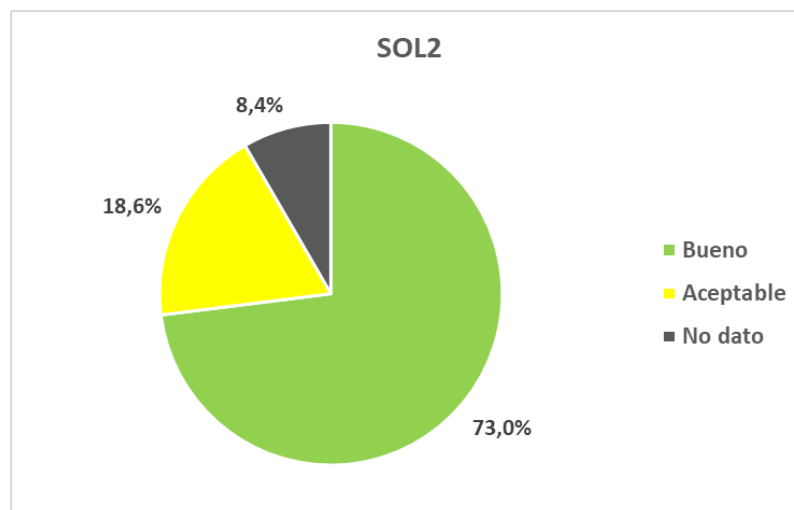
Esta estación presentó la mejor calidad del aire según ICA ya que el 87,4 de las concentraciones registradas fueron categorizadas como “Bueno” y solo el 8% de los registros quedo en la categoría “Aceptable”, además de solo presentar el 4,6% de datos en 0,0 (Gráfica 3).



Gráfica 3. Distribución las categorías del ICA para PCO2. Fuente: autor.

6.2.2. Categorización ICA para SOL2.

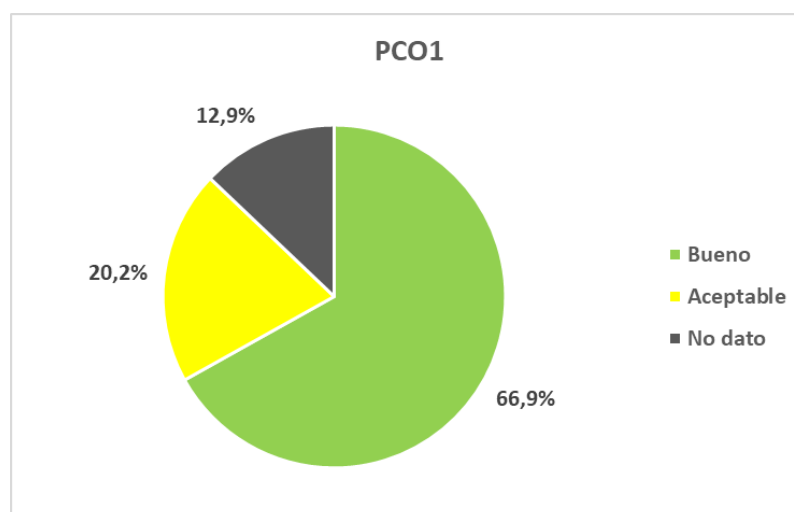
En este punto de muestreo, se presentó la segunda mejor calidad de aire de las estaciones evaluadas, con un 73% de los datos categorizados dentro del color verde que representa a “Bueno” y con 18% de datos registrados en “Aceptable” y con el 8,4% de no datos (Gráfica 4).



Gráfica 4. Distribución las categorías del ICA para SOL2. Fuente: autor.

6.2.3. Categorización ICA para PCO1.

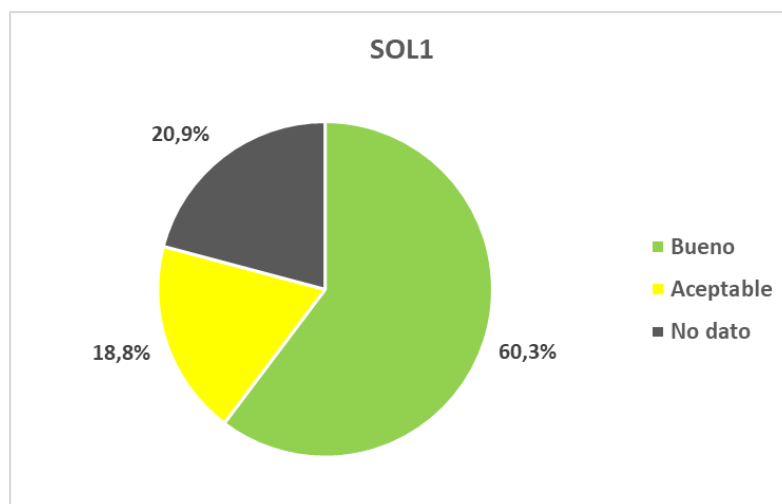
Esta estación presentó la tercera mejor calidad del aire según ICA para el periodo de investigación con un 66,9% de datos dentro de la categoría “Bueno”, también registro el 20,2% de los datos en la categoría “Aceptable” representada por el color amarillo y con el 12,9% los no datos (Gráfica 5).



Gráfica 5. Distribución las categorías del ICA para PCO1. Fuente: autor.

6.2.4. Categorización ICA para SOL1.

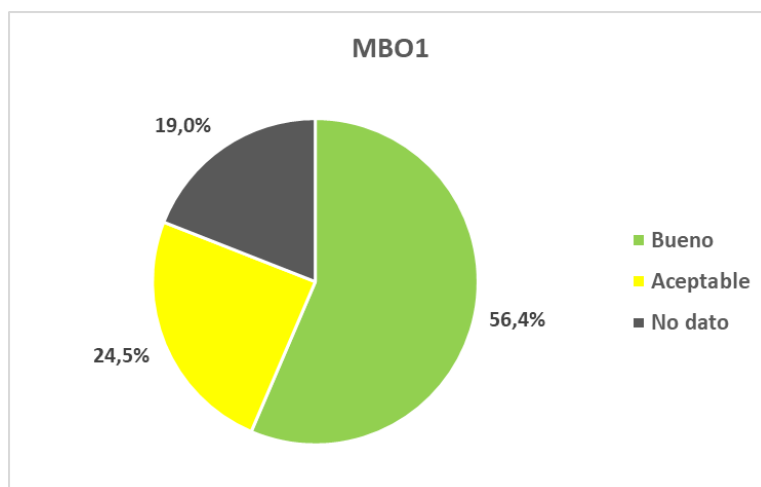
En este punto se presentó la segunda peor calidad del aire según el ICA, aunque cabe resaltar que es solo en comparación con las estaciones de la investigación ya que la categoría “Bueno” incluyó el 60,3% de los datos de la estación. Mientras la categoría “Aceptable” tiene un 18,8% de los registros y los no datos están representados en 20,9%, que es el factor desencadenante que origina que esta estación se encuentre mal calificada en este escalafón (Gráfica 6).



Gráfica 6. Distribución las categorías del ICA para SOL1. Fuente: autor.

6.2.5. Categorización ICA para MBO1.

En este punto se presentó la peor calidad de aire dentro de las estaciones investigadas según la metodología ICA, en donde se categorizó el 56,4% de los datos registrados en “Bueno”, el 24,5% en “Aceptable” y con un 19% los no datos (Gráfica 7).



Gráfica 7. Distribución las categorías del ICA para MBO1. Fuente: autor.

Con esto se puede evidenciar que la estación de PCO2 registró durante el periodo de evaluación la mejor calidad del aire en comparación con el resto de las estaciones del SVCA C.R.A. para PM10 utilizando la metodología ICA, también que la estación con peor calidad del aire es MBO1 que, aunque tiene un alto porcentaje de datos en 0,0 esto no modificó el hecho de que se mostró que tiene el mayor porcentaje de concentración en el rango de aceptable.

Es de resaltar entonces, que en ninguna de las estaciones se presentaron concentraciones promedio 24h que entraran dentro de la categoría “Desfavorable” (naranja) o superiores, que pudiesen mostrar un riesgo mayor sobre las poblaciones aledañas a los puntos de muestreo, lo cual podría mostrar evidencias de una calidad del aire favorable en estas poblaciones.

6.3. Análisis temporal.

En este análisis se muestra el comportamiento de todas las estaciones evaluadas en cada mes de la investigación, mostrándose así simultaneidad en los incrementos y disminuciones de concentraciones en los diferentes puntos a pesar de la distancia entre ellas (Tabla 5), por lo cual se tuvo en cuenta las condiciones meteorológicas que más afectan al material particulado en suspensión, que son la intensidad del viento, la dirección del viento y la pluviosidad, y que fueron registradas por las estaciones del IDEAM ubicadas en Las Flores y Aeropuerto Internacional Ernesto Cortisoz.

Tabla 5. Distancia lineal (km) entre las estaciones del SVCA C.R.A.

Estaciones	PCO1	PCO2	SOL1	SOL2	MBO1
PCO1	-	3,2	21,57	17,56	24,65
PCO2	3,2	-	20,71	17,17	24,73
SOL1	21,57	20,71	-	4,64	7,31
SOL2	17,56	17,17	4,64	-	7,91
MBO1	24,65	24,73	7,31	7,91	-

Fuente: autor.

A continuación, se muestra las rosas de viento correspondientes a las estaciones meteorológicas del IDEAM en Las Flores (Ilustración 3) y Aeropuerto Internacional Ernesto Cortisoz (Ilustración 4) en donde se puede observar que la predominancia de los vientos es desde el Norte, Noreste y Este (para la estación de Las Flores). Cabe resaltar que la ciudad de Barranquilla y su área metropolitana no poseen ninguna influencia industrial, población o de tipo antrópica en la dirección de procedencia de los vientos ya que en esa coordenada solo se encuentra el mar caribe y el océano atlántico.

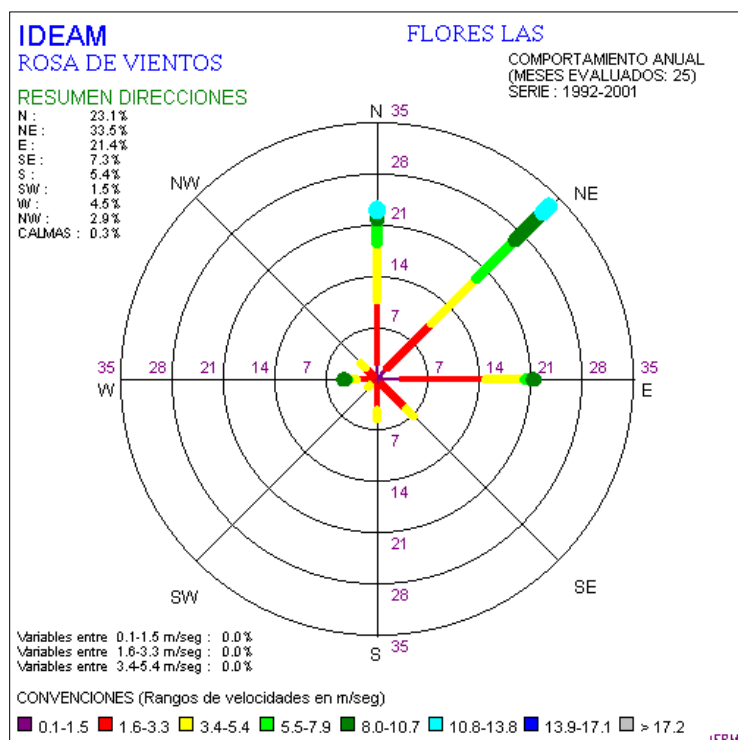


Ilustración 3. Rosa de vientos de la estación meteorológica del IDEAM ubicada en el barrio Las Flores, norte de la ciudad de Barranquilla. Fuente: IDEAM.

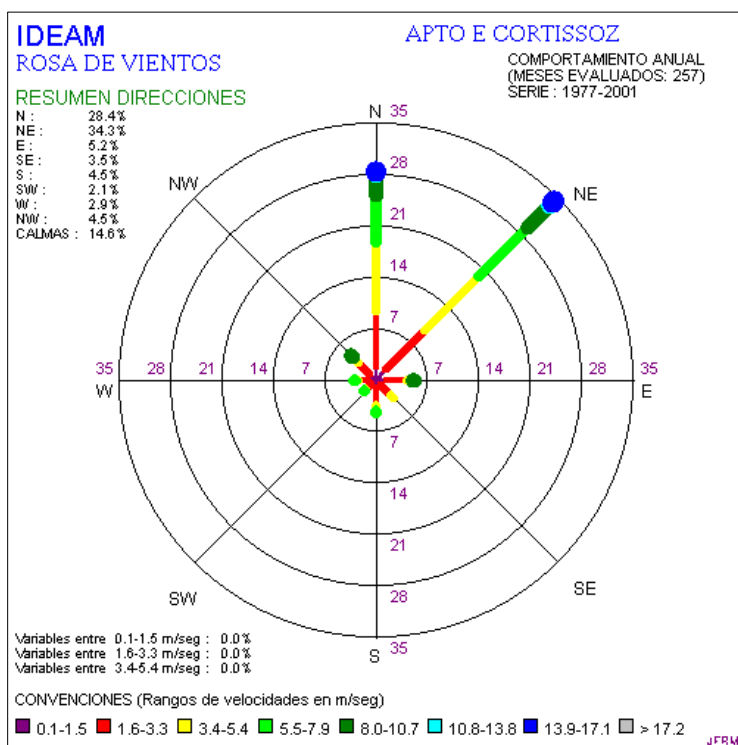


Ilustración 4. Rosa de vientos de la estación meteorológica del IDEAM ubicada en el Aeropuerto Internacional Ernesto Cortisoz. Fuente: IDEAM.

Además, es importante mencionar que, entre los datos suministrados por el IDEAM con respecto a la intensidad de los vientos, la pluviosidad, la temperatura y la humedad relativa no se encuentran completos para las estaciones por lo que, para efectos de esta investigación, se utilizó la media de la estación para esos meses donde no hubo datos registrados. posteriormente, se realizó el análisis para determinar la relación que existe entre los factores meteorológicos y las concentraciones de PM10 en cada punto.

Para una mayor comprensión de esta investigación, se mostrarán los datos en conjuntos por área de influencia, es decir, que se agruparon en dos categorías la estaciones en el norte (PCO1 y PCO2) con la estación meteorológica de Las Flores, así mismo, las estaciones del sur (SOL1, SOL2 y MBO1) con la estación meteorológica del Aeropuerto Ernesto Cortissoz, generando dos graficas por parámetro.

6.3.1. Análisis meteorológico.

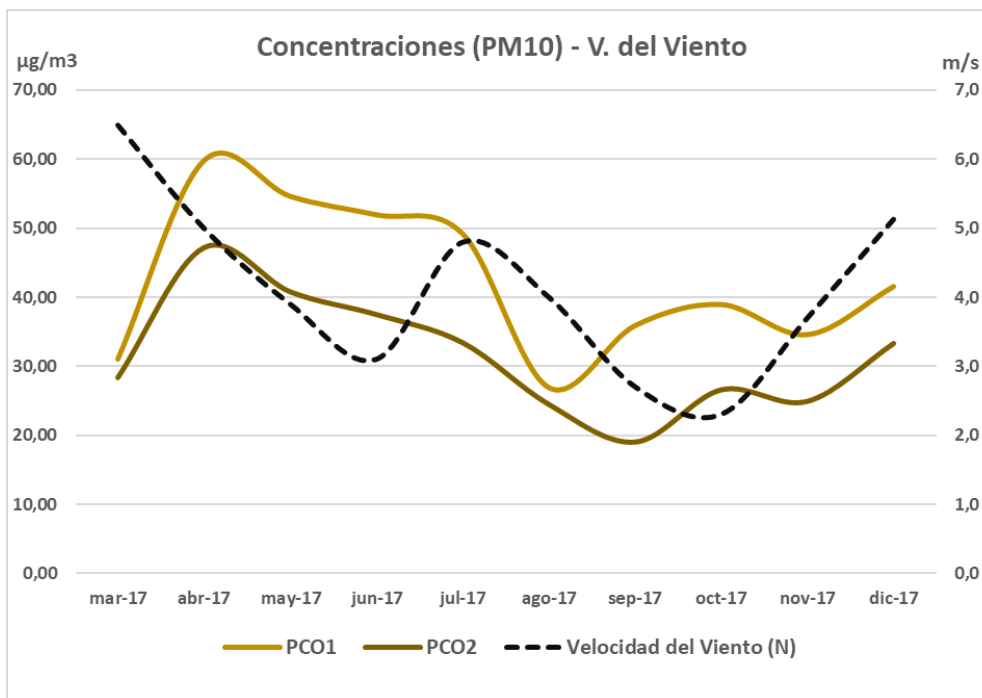
En este análisis, se puede observar como las variables meteorológicas afectan los niveles de concentración de PM10 en el aire, además de evidenciar gráficamente el comportamiento de dichas variables en relación a los registros de material particulado de esta investigación, todo esto, en gráficas combinadas que facilitaran la comprensión de los resultados.

6.3.1.1. Velocidad del viento.

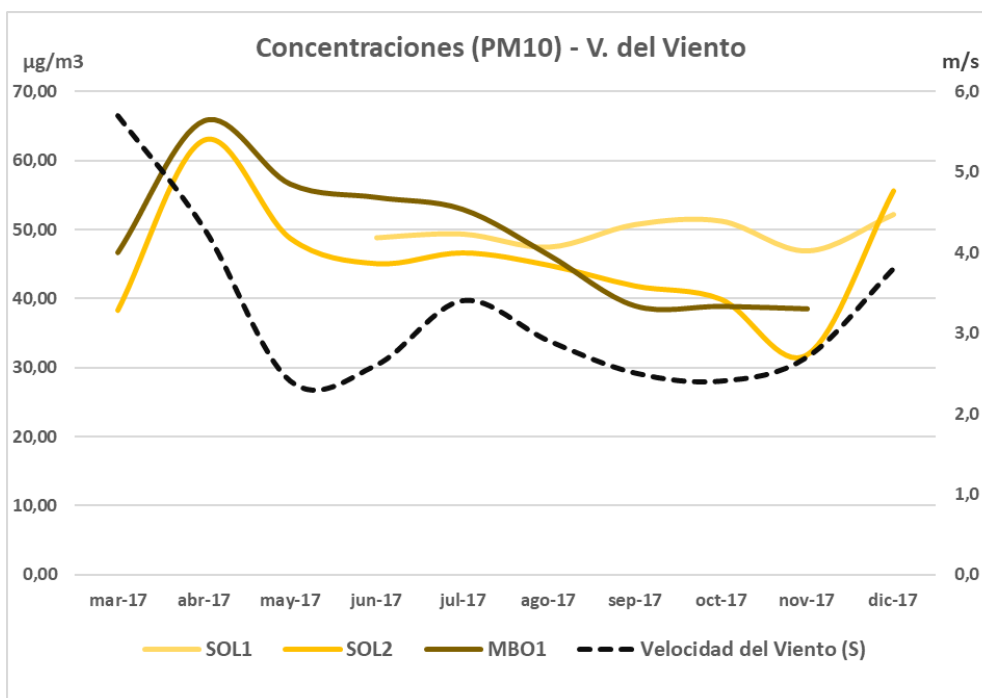
Para este parámetro meteorológico se puede evidenciar que las concentraciones de PM10 en las estaciones del norte (PCO1 y PCO2) se ven directamente influenciadas por la intensidad del viento ya que, (Gráfica 8) cuando se disminuye la intensidad de este parámetro, se incrementan las concentraciones en ambos puntos. Tanto así, que se puede observar que siempre las concentraciones se encuentran por encima o por debajo de la línea que representa el comportamiento de la velocidad del viento, indicando que si la intensidad del viento aumenta las concentraciones de material particulado menor a 10 μm disminuirán, cabe resaltar que esto se puede evidenciar claramente gracias a que estas estaciones se encuentran únicamente influenciadas por el viento proveniente del mar Caribe.

Por otra parte, en las estaciones del sur (SOL1, SOL2 y MBO1) se evidencia un comportamiento diferente con respecto a la influencia de la velocidad del viento sobre las concentraciones de PM10 registradas durante el periodo de evaluación. En este caso, se pudo observar que a pesar de que, al inicio del periodo de investigación las concentraciones aumentaban a medida que la velocidad del viento disminuía, se pudo notar que a partir del mes de junio la intensidad del viento no aumento lo suficiente como para disminuir las concentraciones de material particulado. Sin embargo, es importante resaltar que estas estaciones reciben, según la dirección del viento, influencia directa de la ciudad de Barranquilla, no solo a nivel de emisiones sino también a nivel de obstáculos que pueden

provocar cambios repentinos de la dirección del viento y su intensidad. Además, es pertinente mencionar que es necesario evaluar otros parámetros para definir mejor el comportamiento del PM10 en las estaciones del sur (Gráfica 9).



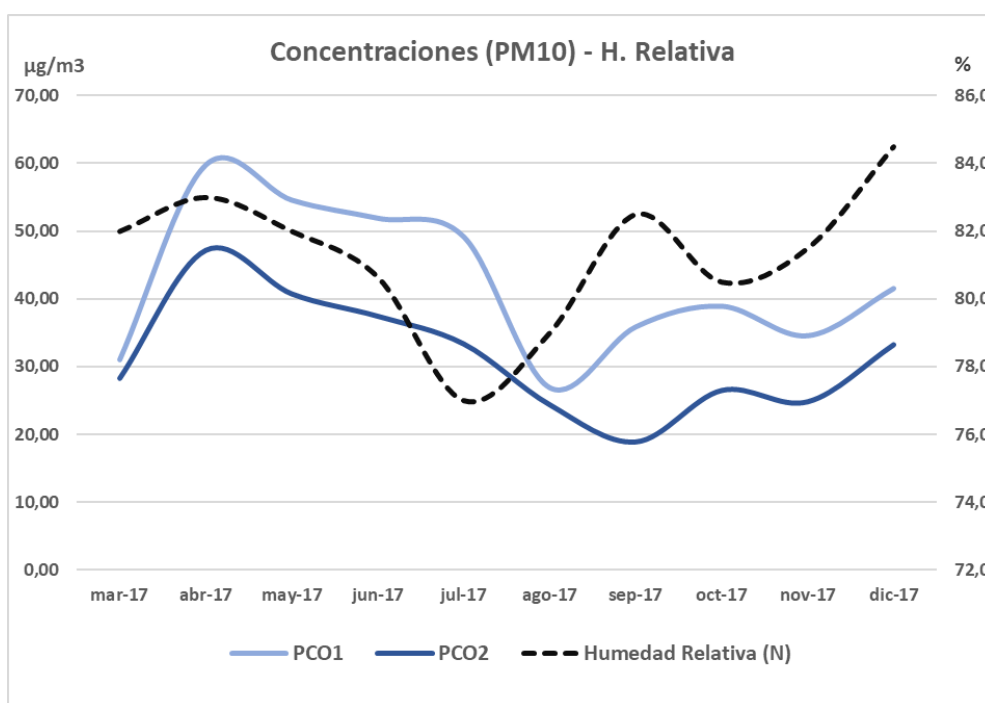
Gráfica 8. Concentraciones (PM10) – V. del Viento(N). Fuente: Autor



Gráfica 9. Concentraciones (PM10) – V. del Viento(S). Fuente: Autor.

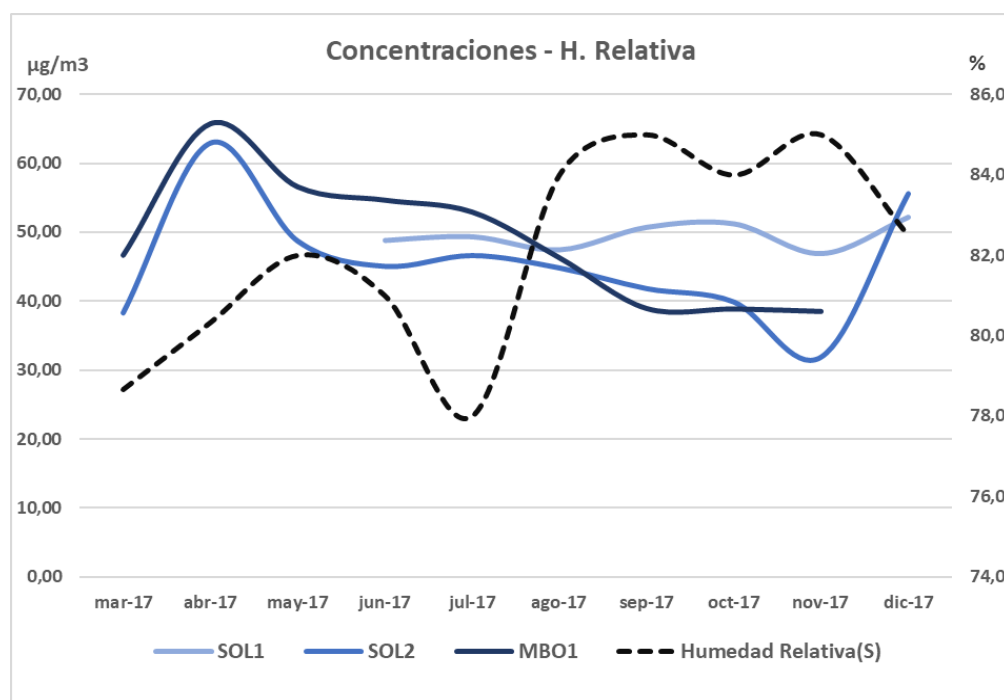
6.3.1.2. Humedad Relativa.

En la siguiente gráfica (Gráfica 10) se muestra el comportamiento de la humedad relativa en comparación con las concentraciones de PM10 para las estaciones PCO1 y PCO2, cabe resaltar que tanto como la estación meteorología como los analizadores de material particulado se encuentra sobre la línea costera, lo cual podría ser la razón de las variaciones de humedad relativa que no muestran una relación significativa. A pesar de esto, se puede evidenciar que las partículas en suspensión generalmente tienen mayor concentración cuando la humedad relativa es baja, y viceversa. Con esto se podría afirmar que este parámetro y el PM10 registrado tienden a ser inversamente proporcionales, lo cual, en teoría, podría explicarse por el hecho de que, a mayor humedad mayor el número de partículas de agua en el aire que al entrar en contacto con otras partículas, materiales o superficies a temperaturas inferiores generan condensación que atrapa el material particulado.



Gráfica 10. Concentraciones (PM10) – H. Relativa(N). Fuente: Autor.

En las estaciones del sur (SOL1, SOL2 y MBO1), donde no existe influencia directa de las corrientes marinas, se puede apreciar de mejor manera la relación que existe entre la humedad relativa y el PM10 en esta investigación. Se puede evidenciar la proporción que se mencionaba anteriormente de inversabilidad entre ambos parámetros (Gráfica 11).

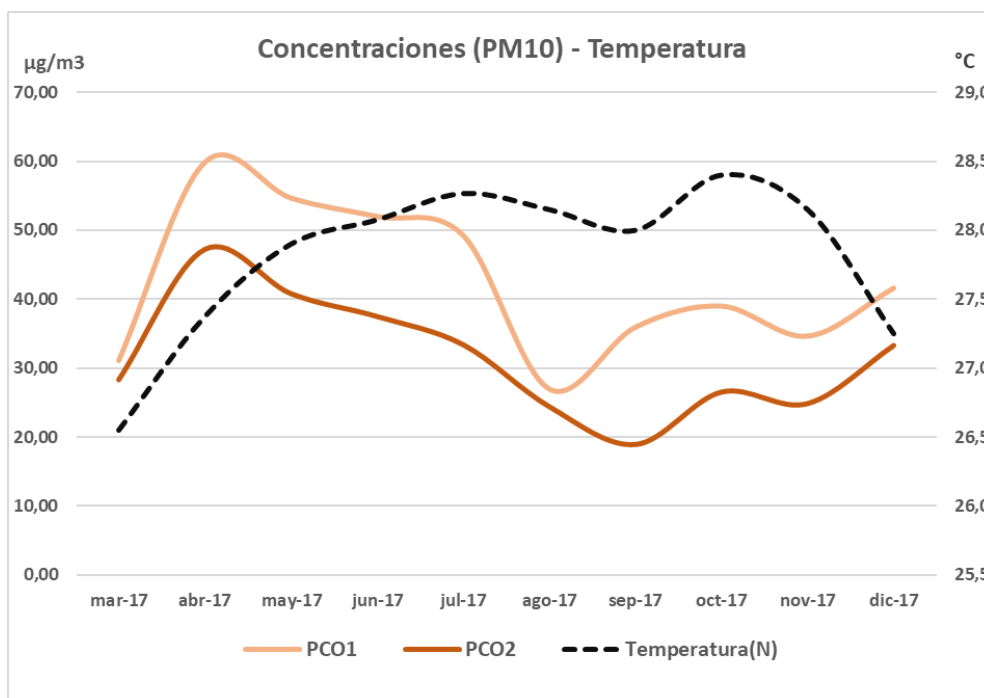


Gráfica 11. Concentraciones (PM10) – H. Relativa(S). Fuente: Autor.

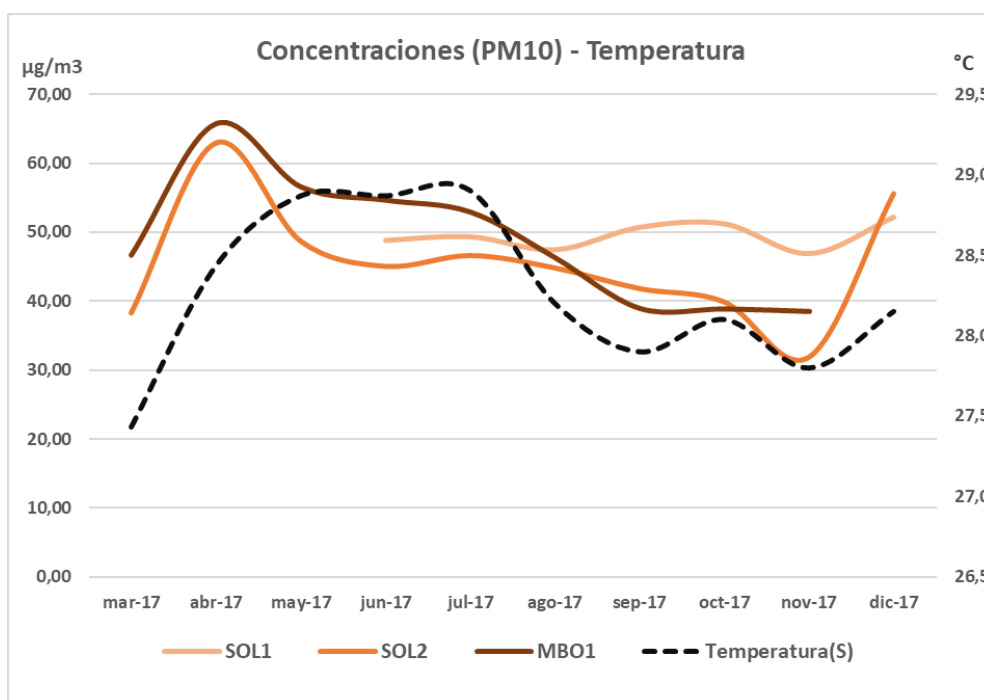
6.3.1.3. Temperatura.

Para este parámetro, la relación que se puede evidenciar en las estaciones del norte (PCO1 y PCO2), es muy parecida en su proporcionalidad inversa a lo que ocurre con la humedad relativa. En donde se observa que, si las concentraciones de PM10 la temperatura disminuye, igualmente si la temperatura aumenta las concentraciones de material particulado descienden (Gráfica 12).

De igual manera ocurre en las estaciones de SOL1, SOL2 y MBO1 al sur, en donde se puede identificar una relación más variable entre el PM10 y la temperatura registrada (Gráfica 13). Para la cual, primero es necesario aclarar, que este parámetro meteorológico tiene muy poca variación y no se puede evidenciar un gran cambio en el aumento o disminución de sus registros, lo cual lo hace susceptible a cualquier evento que pueda influenciar la temperatura registrada. A pesar de eso, el ajuste de la gráfica permite observar un comportamiento de proporcionalidad inversa cuando las concentraciones descienden en los meses de mayo y junio, mientras la temperatura va en ascenso para el mismo periodo de tiempo.



Gráfica 12. Concentraciones (PM10) – Temperatura(N). Fuente: Autor.

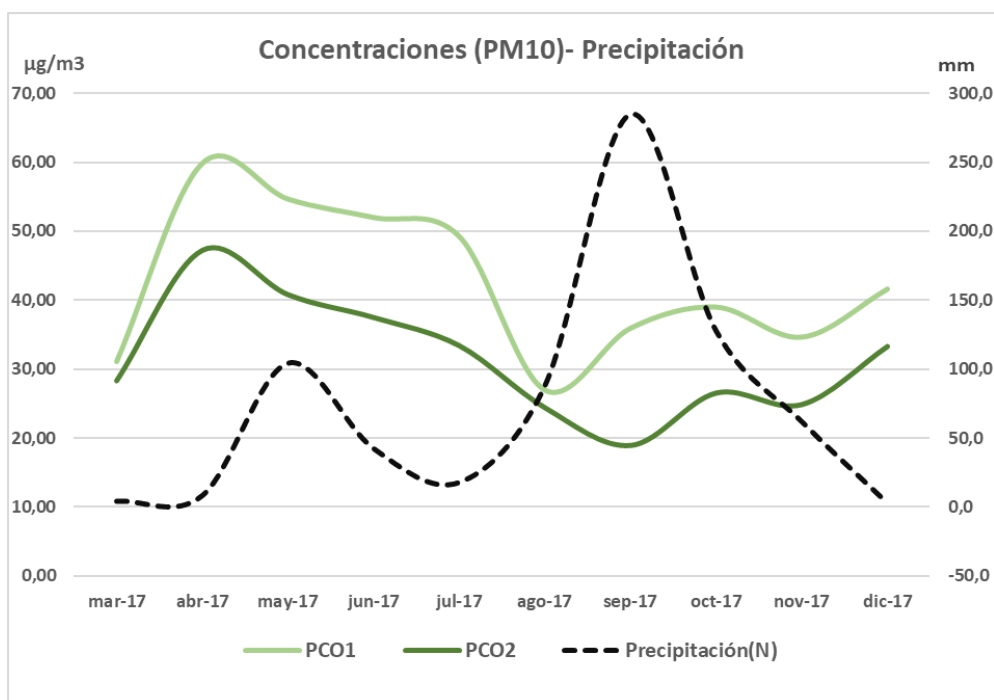


Gráfica 13. Concentraciones (PM10) – Temperatura(S). Fuente: Autor.

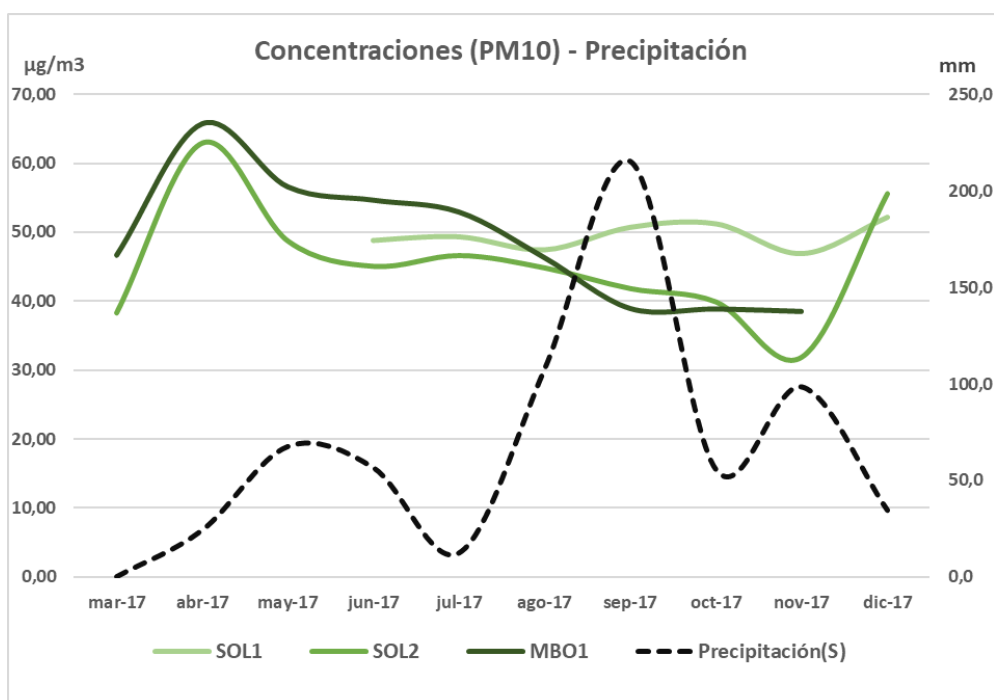
6.3.1.4. Precipitación.

Para este parámetro, se puede afirmar que tiene una influencia directa al igual que la velocidad del viento y la humedad relativa ya que se evidencia que mientras las concentraciones de PM10 están altas las mediciones de precipitación son bajas, además se puede notar claramente que a medida que aumenta la precipitación, las concentraciones descienden durante los mismos periodos. Esto, puede significar que la precipitación es inversamente proporcional a los niveles de concentración de material particulado en el aire (Gráfica 14).

Por otra parte, para las estaciones ubicadas en el sur (SOL1, SOL2 y MBO1) este parámetro no tuvo la misma influencia sobre las concentraciones, quizá porque fueron inferiores en comparación con los registros de las estaciones ubicadas en el norte. Sin margo, se puede apreciar que presenta el mismo comportamiento, es decir, que a medida que las precipitaciones aumentan las concentraciones descienden. Todo esto se puede explicar, ya que la precipitación provoca un “lavado” del aire, generando que las partículas en suspensión sean absorbidas por las gotas de agua de la lluvia (Gráfica 15).



Gráfica 14. Concentraciones (PM10) – Precipitación(N). Fuente: Autor.



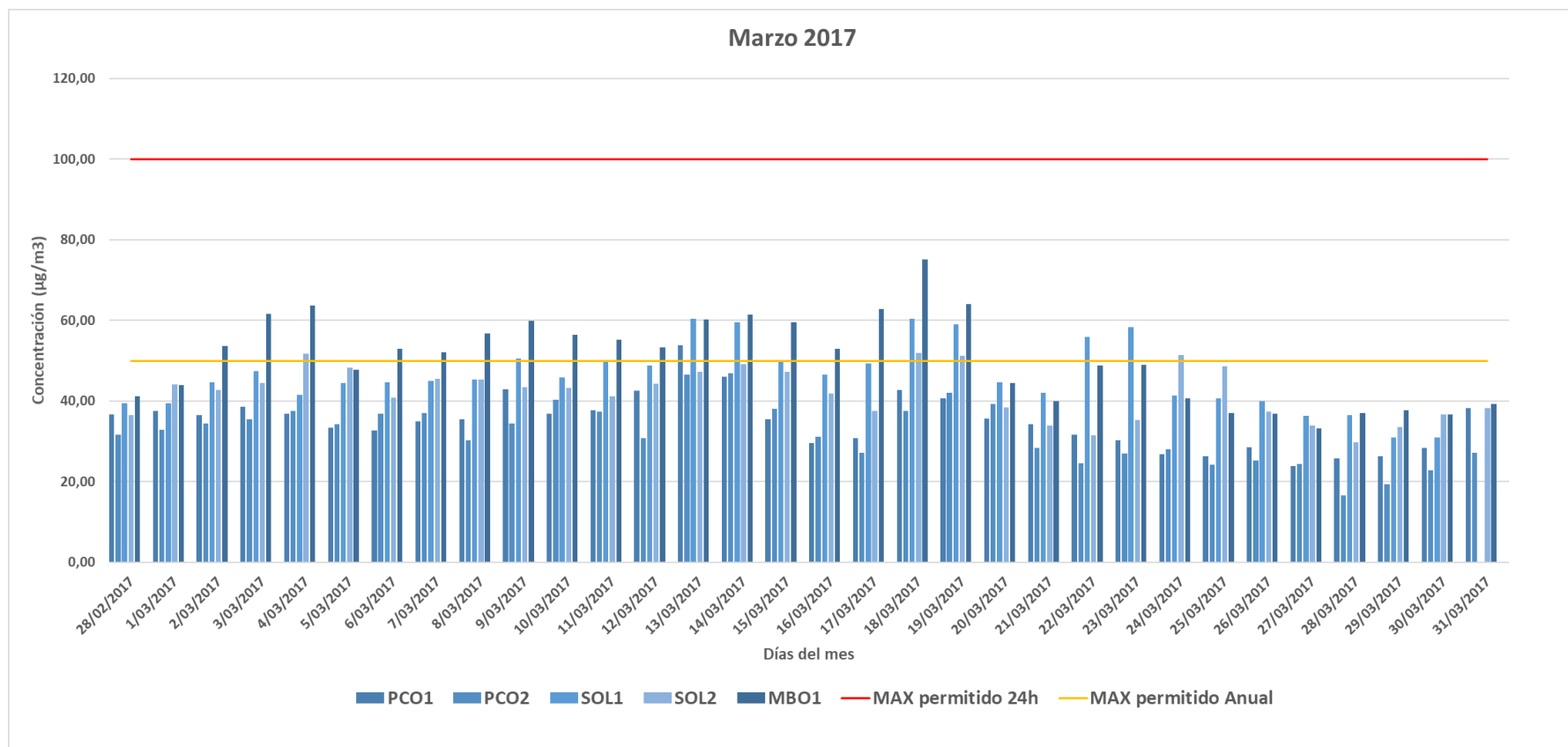
Gráfica 15. Concentraciones (PM10) – Precipitación(S). Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta estos resultados se dispone a revisar los resultados de la evaluación temporal de las estaciones, para esto se mostrarán los resultados por mes. Teniendo en cuenta, los valores de concentración, las variables meteorológicas y las validaciones del ICA.

6.3.2. Concentraciones de PM10 durante marzo de 2017.

En este mes se puede evidenciar que la estación de MBO1 fue la que presentó mayor registro de concentración de PM10 en el aire con $75,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 15:00 horas del día 18, le sigue la estación SOL1 con un registro de concentración de PM10 de $60,38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 18:00 horas del mismo día. Además, se puede observar que el comportamiento general de las cinco estaciones es muy similar en cuanto a los incrementos y disminuciones de concentración. También se logra ver que la estación que presentó menor registro de concentración de PM10 fue PCO2 con $12,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 15:00 horas del día 27 (Gráfica 16).

Así mismo, podemos ver que las concentraciones no superan el máximo permisible 24h lo cual puede ser justificado por la alta velocidad del viento se presentaron en las estaciones del norte (PCO1 y PCO2) y que fueron registradas por la estación del IDEAM en Las Flores corresponden a 5,2 m/s. También en las estaciones más al sur (SOL1, SOL2 y MBO1) se presentaron vientos promedio del mes bastante altos con registros de 5,7 m/s en la estación del Aeropuerto Ernesto Cortissoz. Además, las precipitaciones en la zona de estudio fueron muy bajas sin embargo los vientos contribuyeron a la dispersión y mezcla del PM10 en el aire.



Gráfica 16. Concentraciones de las estaciones en marzo. Fuente: autor.

6.3.3. Concentraciones de PM10 durante abril de 2017.

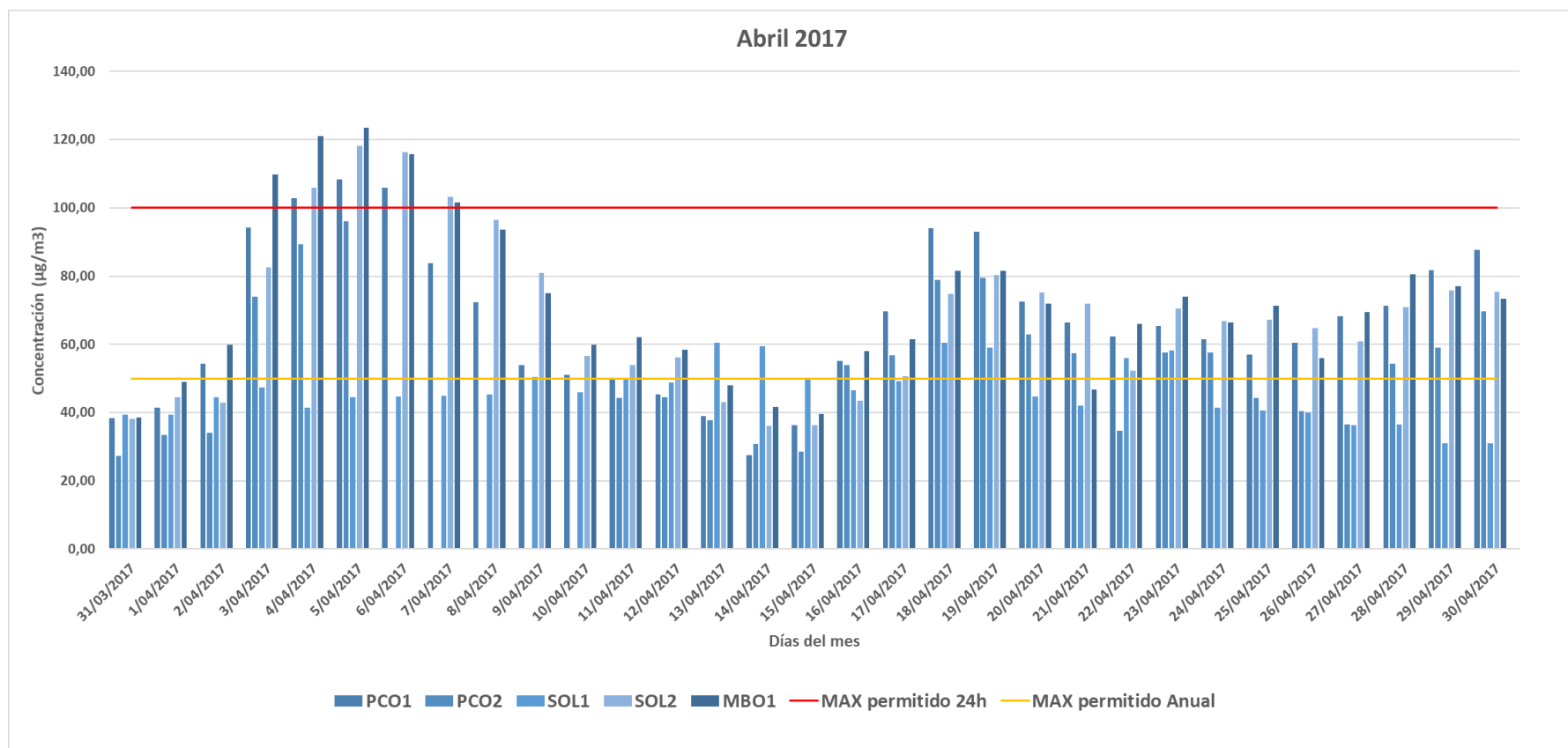
A principios de mes se puede ver el primer registro por encima de la normativa de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por promedio a 24h impuesta por MinAmbiente, esta vez la estación MBO1 vuelve a tener el mayor registro con $123,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 15:00 horas del día 5 y el segundo registro más alto del mes lo genera SOL2 con $118,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 16:00 horas del mismo día. Se puede observar un incremento y disminución coordinada de todas las estaciones durante el transcurso del mes. Cabe resaltar que, la estación SOL1 presentó una falla el día cinco que sacó de funcionamiento el equipo hasta el día once, esta estación también registró la concentración más baja del mes con $12,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 13 a las 10:00 horas (Gráfica 17).

En adición, en este mes se registraron lluvias esporádicas que pudieron ayudar a un “lavado” del aire (norte 8,3mm y sur 24mm) sin embargo los vientos disminuyeron considerablemente su promedio (norte 4,9 m/s y sur 4,3 m/s), lo cual pudo provocar el aumento de las concentraciones de PM10 más en las estaciones del sur (MBO1, SOL2 y SOL1) que en las del norte (PCO1 y PCO2).

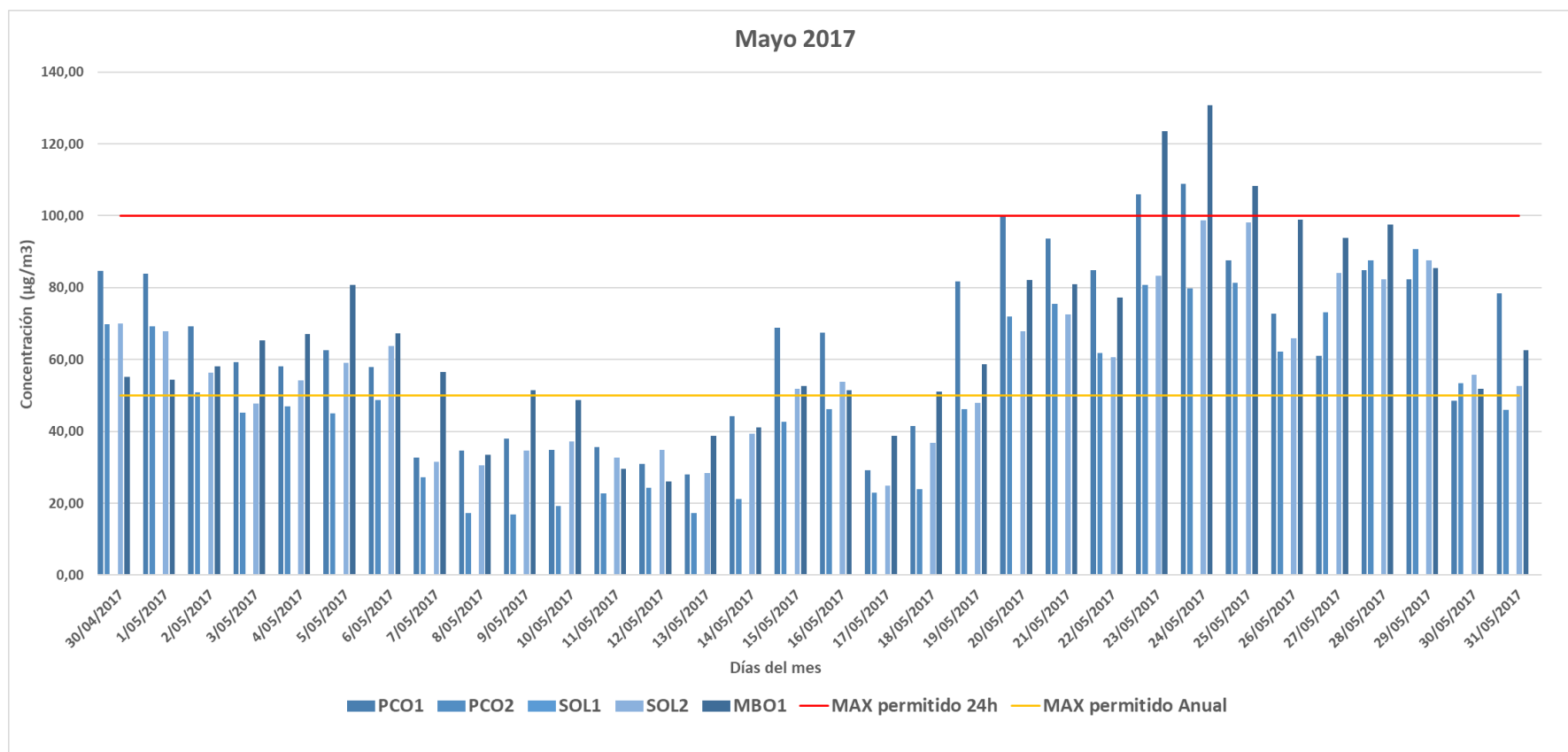
6.3.4. Concentraciones de PM10 durante mayo de 2017.

A finales de este mes se logra evidenciar los puntos más altos de concentración, la estación MBO1 vuelve a tener el mayor registro sobrepasando la normativa permitida para promedio 24h de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 por MinAmbiente, el registro de concentración fue de $130,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 24 a las 14:00 horas y la estación con el segundo mayor registro fue PCO2 con $108,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 02:00 horas del día 24. Además, se puede observar desde el día diecinueve hasta el día veintisiete un incremento en las concentraciones de todas las estaciones aun en horas de la madrugada, lo cual podría mostrar un evento aislado que afectó las mediciones de esa semana. También cabe anotar que la estación SOL1 quedó fuera de funcionamiento durante todo el mes por daño interno en el equipo analizador. La estación con registro más bajo de concentración fue PCO2 con $6,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 9 a las 12:00 horas (Gráfica 18).

Además, las condiciones meteorológicas de este mes siguen disminuyendo para la velocidad promedio de los vientos, es así como la estación del norte registro en promedio 3,7m/s lo cual ayudo a que las estaciones PCO1 y PCO2 se encontraran siempre por debajo del máximo permisible a 24h, junto con la pluviosidad que se distribuyó con 104mm totales. Por otra parte, la estación del sur registro vientos promedio aún más inferiores con 2,4 m/s y con precipitación total de 67,5 mm, lo cual muestra porqué las estaciones MBO1 y SOL2 obtuvieron registros más altos de concentración.



Gráfica 17. Concentraciones de las estaciones en abril. Fuente: autor.



Gráfica 18. Concentraciones de las estaciones en mayo. Fuente: autor.

6.3.5. Concentraciones de PM10 durante junio de 2017.

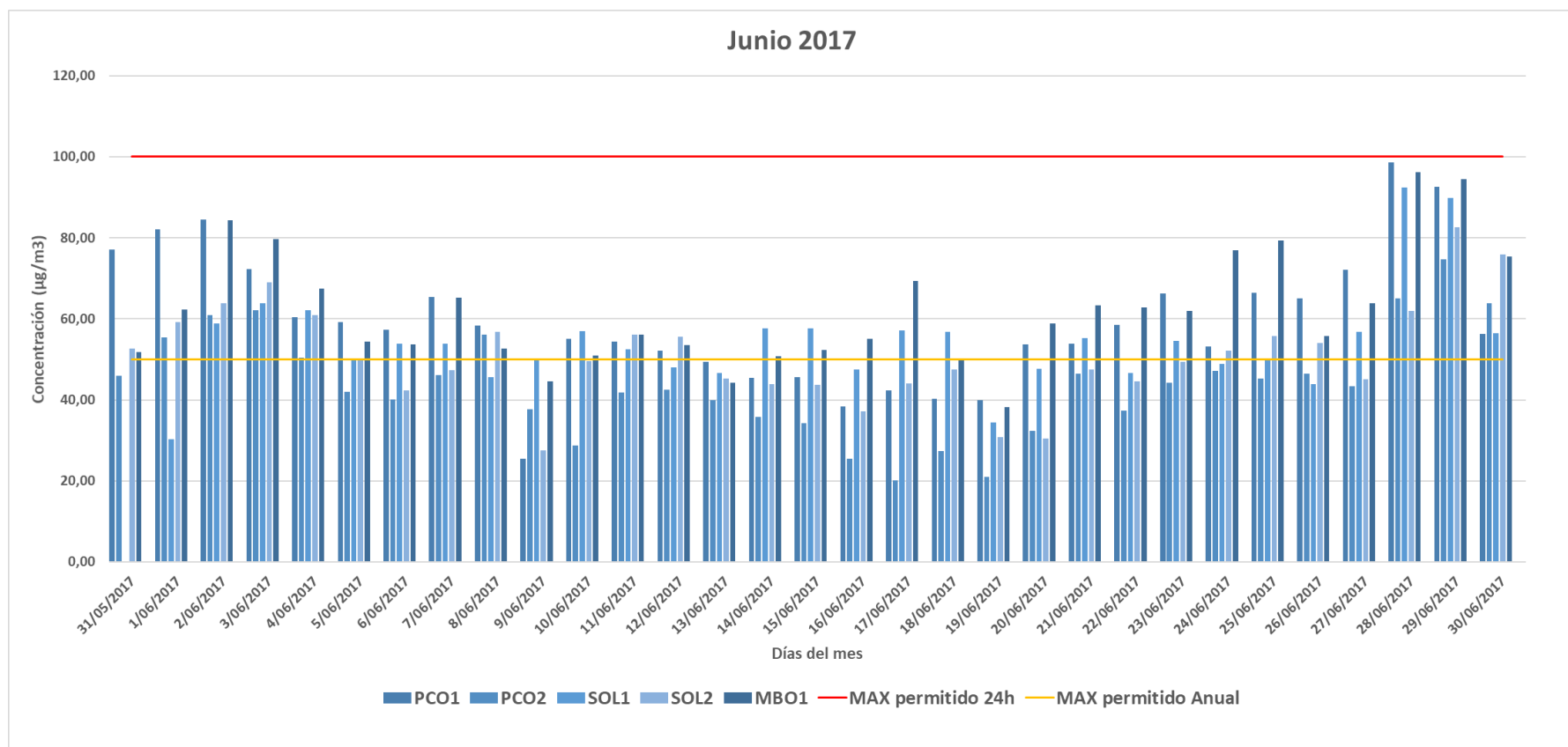
Durante este mes se evidenció un comportamiento coordinado de todas las estaciones excepto SOL1 que continuo fuera de servicio. El registro más alto se pudo observar en la estación de PCO2 con una concentración de $98,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 17:00 horas el día 28 para PM10, igualmente ese día la estación MBO1 registró la segunda mayor concentración de $96,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 21:00 horas. El día con el menor registro de concentración de PM10 fue el día 10 en la estación PCO1 con una concentración de $7,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 05:00 horas. También se pudo identificar que las estaciones tienen un comportamiento similar con respecto a los aumentos y disminuciones de concentraciones de PM10 durante este mes (Gráfica 19).

Por otra parte, durante este mes, se presentaron condiciones meteorológicas muy parecidas al anterior con respecto al viento (norte $3,7\text{m/s}$ y sur 3 m/s) y la precipitación (norte 42mm y sur $56,5\text{mm}$), sin embargo, las concentraciones disminuyeron lo cual podría no solo ser por influencia meteorológica sino también por la disminución de actividades antrópicas por periodo de receso educativo.

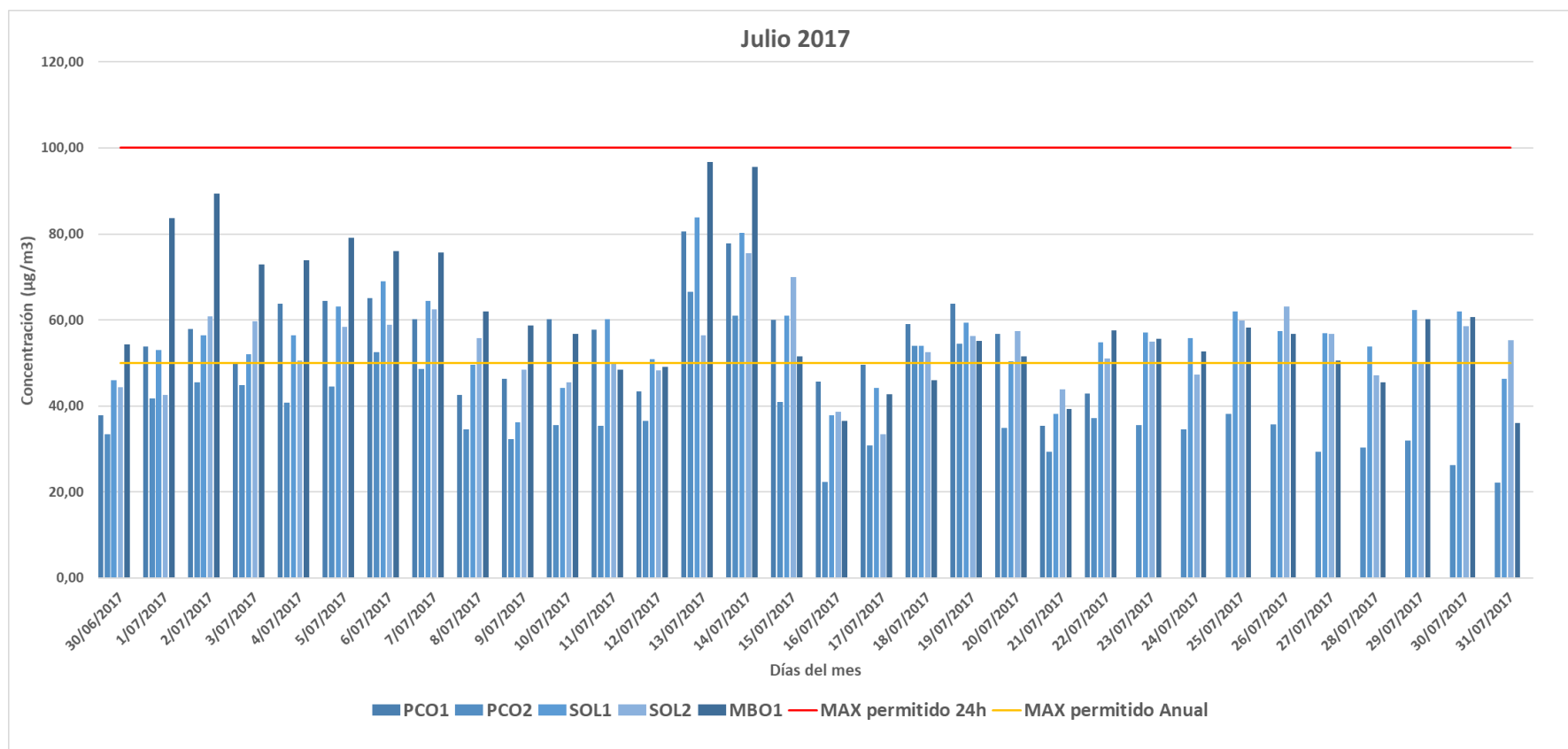
6.3.6. Concentraciones de PM10 durante julio de 2017.

Durante el transcurso de este periodo se evidenció que el mayor registro de concentración de PM10 en las estaciones se presentó en MBO1 con un registro de $96,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 21:00 horas del día 13, la segunda estación con registro más alto fue SOL1 con una concentración de $83,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el mismo día a las 20:00 horas. El registro más bajo se presentó en la estación de PCO2 con una concentración de PM10 de $9,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 31 a las 18:00 horas, también se pudo observar que la estación de PCO1 quedó fuera de servicio desde a las 00:00 del día 23 (Gráfica 20).

Adicionalmente, se puede evidenciar que el promedio de vientos para la estación norte fue de $4,1 \text{ m/s}$ con precipitación total para el mes de $17,8 \text{ mm}$ lo cual generó que las estaciones PCO2 y PCO1 registrara la menor concentración. Para el mismo periodo, la estación sur indicó un promedio de velocidad del viento de $3,4 \text{ m/s}$ y precipitación total de $12,5 \text{ mm}$ que contribuyeron a que las estaciones MBO1, SOL, y SOL2 mantuvieran las concentraciones por debajo del límite permisible a 24h.



Gráfica 19. Concentraciones de las estaciones en junio. Fuente: autor.



Gráfica 20. Concentraciones de las estaciones en julio. Fuente: autor

6.3.7. Concentraciones de PM10 durante agosto de 2017.

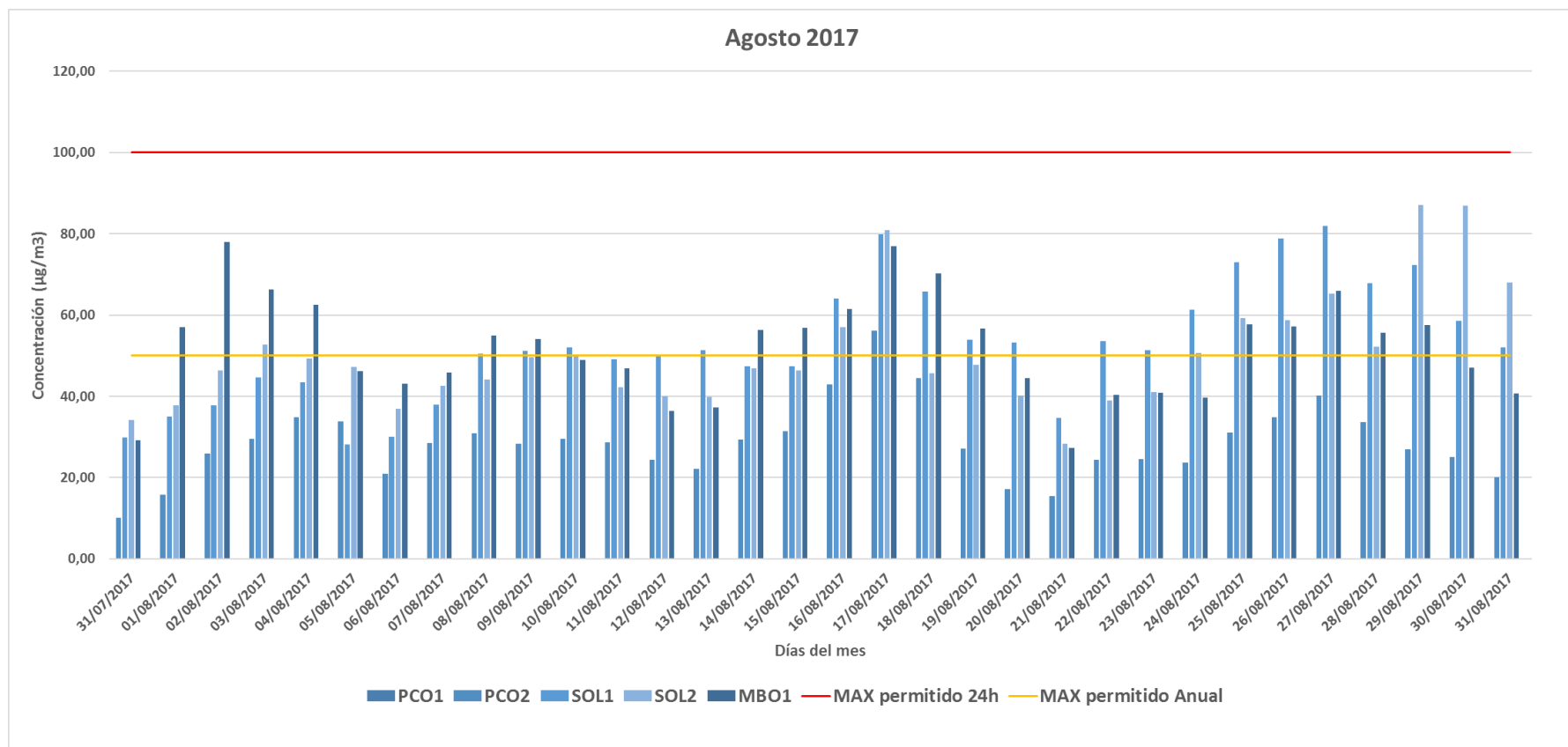
En este periodo el equipo analizador de la estación PCO1 estuvo fuera de servicio, además se pudo evidenciar un posible error en el registro de los datos del equipo de la estación SOL2 durante el día 30 en donde un mismo valor quedó guardado en horas continuas. El valor de concentración más alto de este mes se obtuvo en la estación de SOL2 el día 29 a las 23:00 horas con PM10 de 87,13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la segunda estación con registro más alto fue SOL1 con 81,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 el día 27 a las 15:00 horas. También se pudo observar que las estaciones muestran un comportamiento coordinado en los aumentos y descensos de concentraciones. La estación que registro el punto más bajo de concentración fue PCO2 con una muestra de 9,04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 a las 17:00 horas del día 20 (Gráfica 21).

Además, las condiciones meteorológicas muestran que la velocidad del viento para la estación norte fue en promedio de 3,9 m/s, con precipitación total de 88 mm lo cual ayudó a que la estación PCO2 obtuviera las concentraciones más bajas de PM10. También para la estación sur se registró una velocidad del viento promedio de 2,9 con precipitación total de 108 mm, lo cual puede justificar que a pesar de los bajos vientos la precipitación bajó las concentraciones en las estaciones SOL1, SOL2 y MBO1, aunque no lo suficiente como para no acercarse al límite establecido por MinAmbiente para PM10 a 24h.

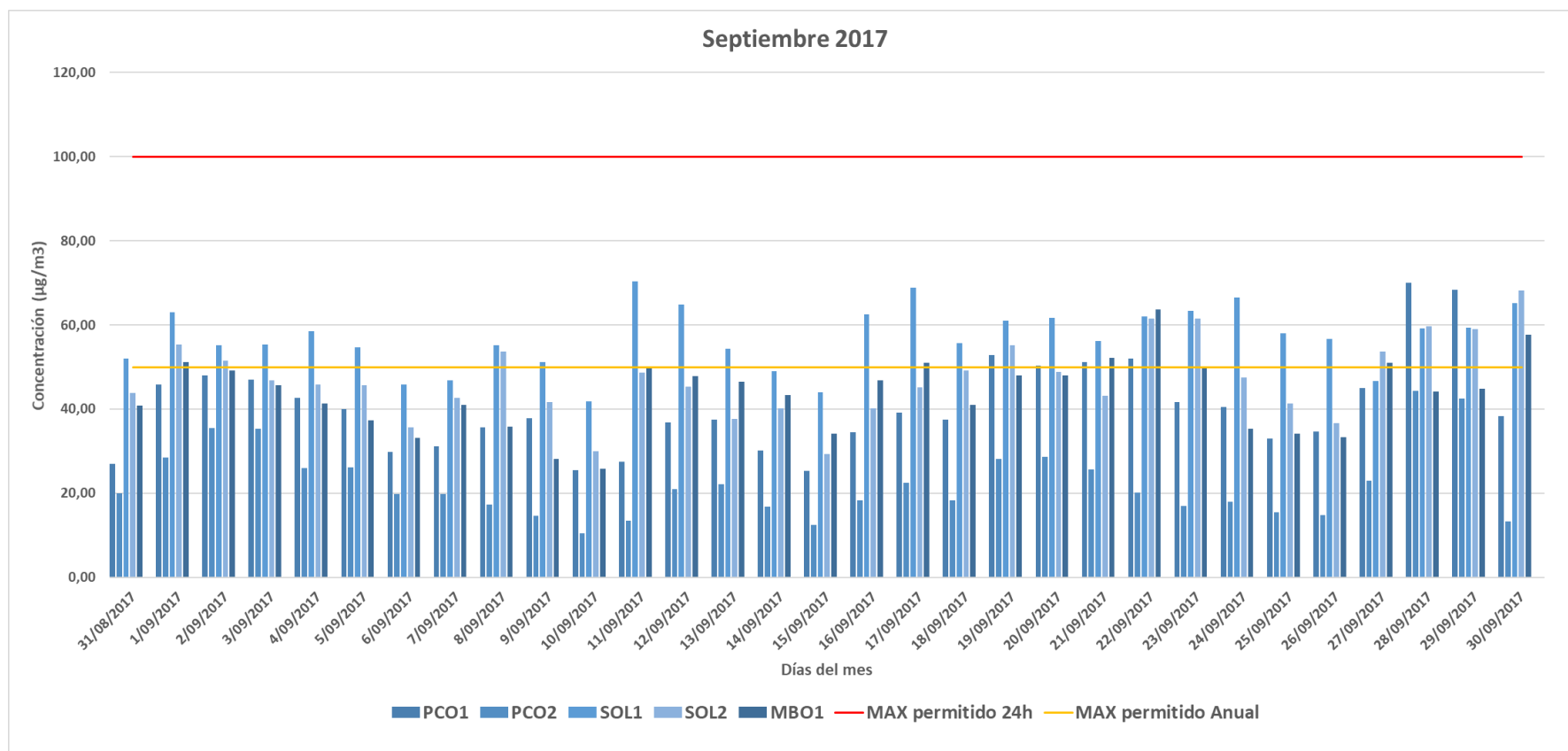
6.3.8. Concentraciones de PM10 durante septiembre de 2017.

En este mes el registro de mayor concentración de PM10 lo obtuvo la estación SOL1 con 70,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 11 a las 16:00 horas, el segundo mayor registro lo presentó la estación de PCO1 a las 16:00 horas del día 28 con una concentración de PM10 de 70,06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentración más baja la presentó la estación PCO2 a las 16:00 horas del día 10, no se presentaron eventos particulares y los equipos funcionaron correctamente (Gráfica 22).

Además, ninguna estación registró valores por encima del máximo permisible para PM10 según el MinAmbiente. También se evidenció que, aunque la velocidad del viento promedio descendió hasta 2,6 m/s se redujo la concentración de material particulado gracias al aumento de la precipitación con un total de 284,9 mm para las estaciones PCO1 y PCO2. Del mismo modo, la velocidad del viento promedio se redujo hasta 2,5 m/s y la precipitación aumento hasta 215 mm para las estaciones del sur (SOL1, SOL2 y MBO1), lo cual muestra porqué estas últimas estaciones registraron mayores concentraciones que las estaciones del norte.



Gráfica 21. Concentraciones de las estaciones en agosto. Fuente: autor.



Gráfica 22. Concentraciones de las estaciones en septiembre. Fuente: autor.

6.3.9. Concentraciones de PM10 durante octubre de 2017.

Durante este mes el registro más alto de concentración de PM10 lo mostró la estación SOL1 con 85,81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 16 a las 16:00 horas, la segunda mayor concentración registrada fue en PCO1 con 79,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 16 a las 02:00 horas. Se pudo observar una clonación de concentraciones en la estación SOL2 los días 26, 27 y desde el 29 hasta final de mes, también en la estación MBO1 desde el día 20 hasta el día 27 lo cual podría estar asociada a un error en la recepción de los datos por parte del equipo. El registro más bajo de concentración de PM10 se dio en PCO1 con 11,02 el día 30 a las 09:00 horas (Gráfica 23).

Para este mes, la estación meteorológica ubicada en la zona norte registró datos de velocidad del viento promedio de 2,7 m/s y precipitación total de 127,6 mm, lo cual podría indicar la razón por la que las concentraciones en las estaciones PCO1 y POC2 no superaron el límite establecido para PM10 en 24h. Para las estaciones ubicadas en la zona sur los registros de meteorología arrojaron para la velocidad del viento promedio un 2,4 m/s y precipitación total de 55,4 mm lo cual puede justificar por qué las estaciones ubicadas en esta zona, SOL1, SOL2 y MBO1 presentaron concentraciones de PM10 mucho mayores a las estaciones del norte.

6.3.10. Concentraciones de PM10 durante noviembre de 2017.

Para este periodo el registro con mayor concentración de PM10 se obtuvo en SOL1 con 72,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 23 a las 21:00 horas, el segundo mayor registro se observó en MBO1 a las 16:00 del día 2 con 68,51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a pesar de esto el equipo quedó fuera de servicio después del día 10 a las 11:00 horas. También se pudo evidenciar la clonación de registros en la estación SOL2 con la que comenzó este periodo, mostrando restablecimiento a partir del día 14. El registro más bajo de concentración de PM10 se evidenció en la estación de PCO2 a las 04:00 del día 18 con 7,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gráfica 24).

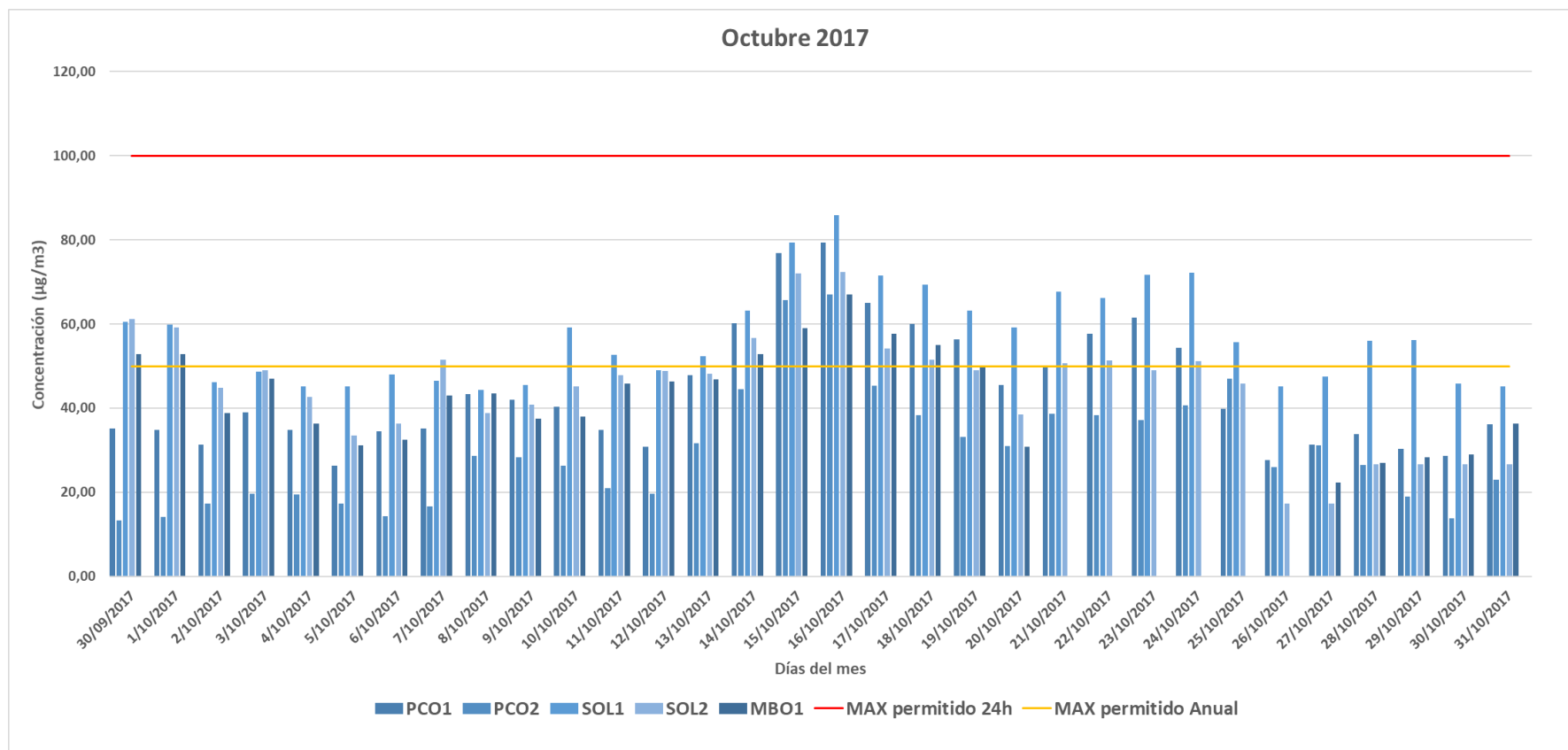
En adición, las estaciones meteorológicas registraron en el norte un aumento del promedio de velocidad del viento con 3,7 m/s y una precipitación total de 61,8 mm, lo cual propicia que en la estación de PCO1 y PCO2 se disminuya los registros de concentración y que se produzca una mejor mezcla y dispersión del material particulado. Por otra parte, la estación del sur registro un incremento poco significativo en la velocidad el viento promedio con respecto al mes anterior con 2,7 m/s, sin embargo, la precipitación aumento a 98,4 mm lo cual ayudó a que no se incrementaran las concentraciones de manera significativa en las estaciones de SOL1, SOL2 y MBO1.

6.3.11. Concentraciones de PM10 durante diciembre de 2017.

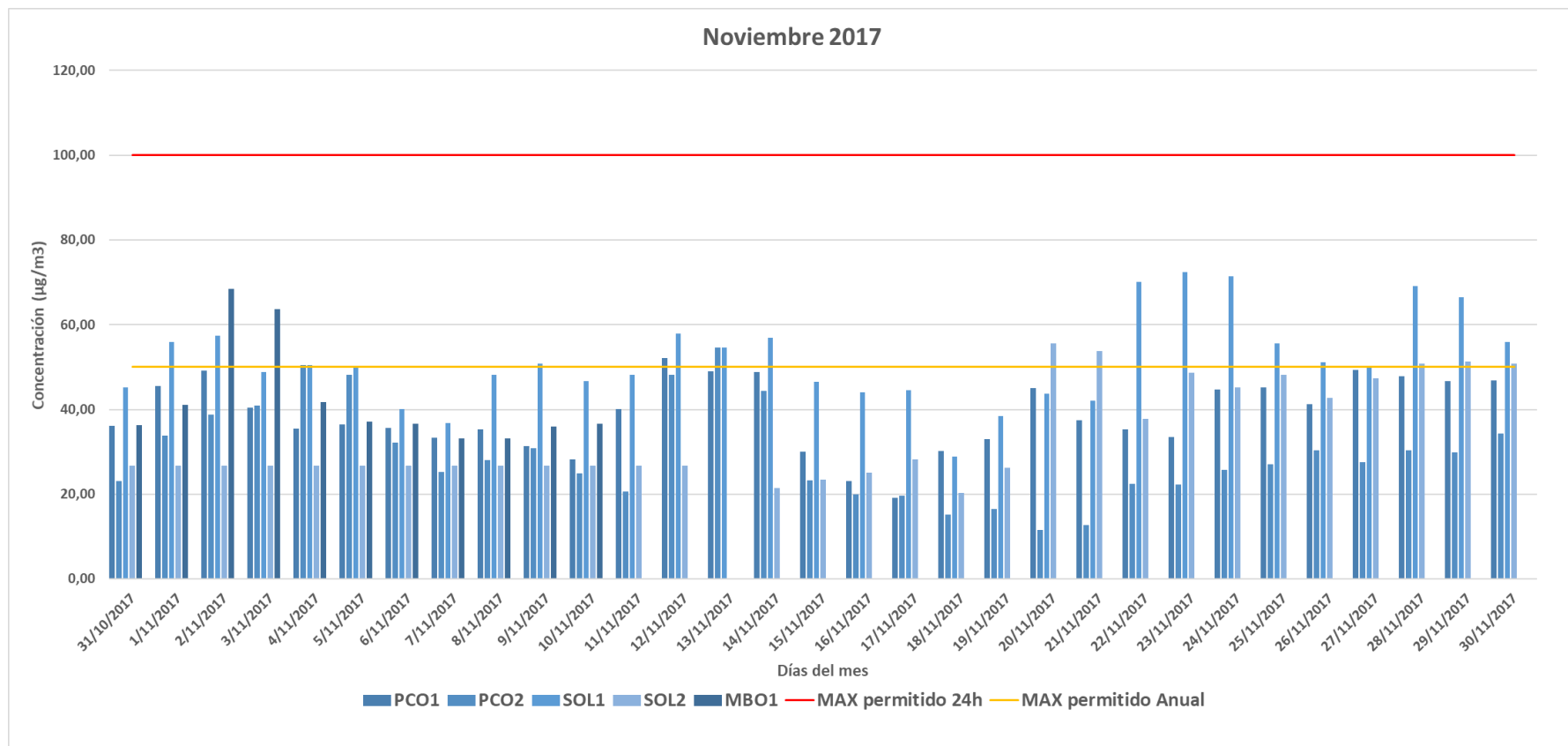
Durante este mes el mayor registro de concentración de PM10 se generó en SOL1 con 96,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 8 a las 11:00 horas, el segundo mayor registro se obtuvo en PCO1 con 74,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 13 a las 16:00 horas. Cabe destacar que, durante

este mes se presentaron los mayores vacíos en los registros, empezando por el fuera de servicio total de MBO1, la clonación en PCO1 desde el día 28, el fuera de servicio de PCO2 desde el día 21 hasta el 29 y el fuera de servicio de SOL2 desde el día 6. El menor registro de concentración de PM10 se evidenció en PCO2 con 8,64 el día 29 a las 22:00 horas (Gráfica 25).

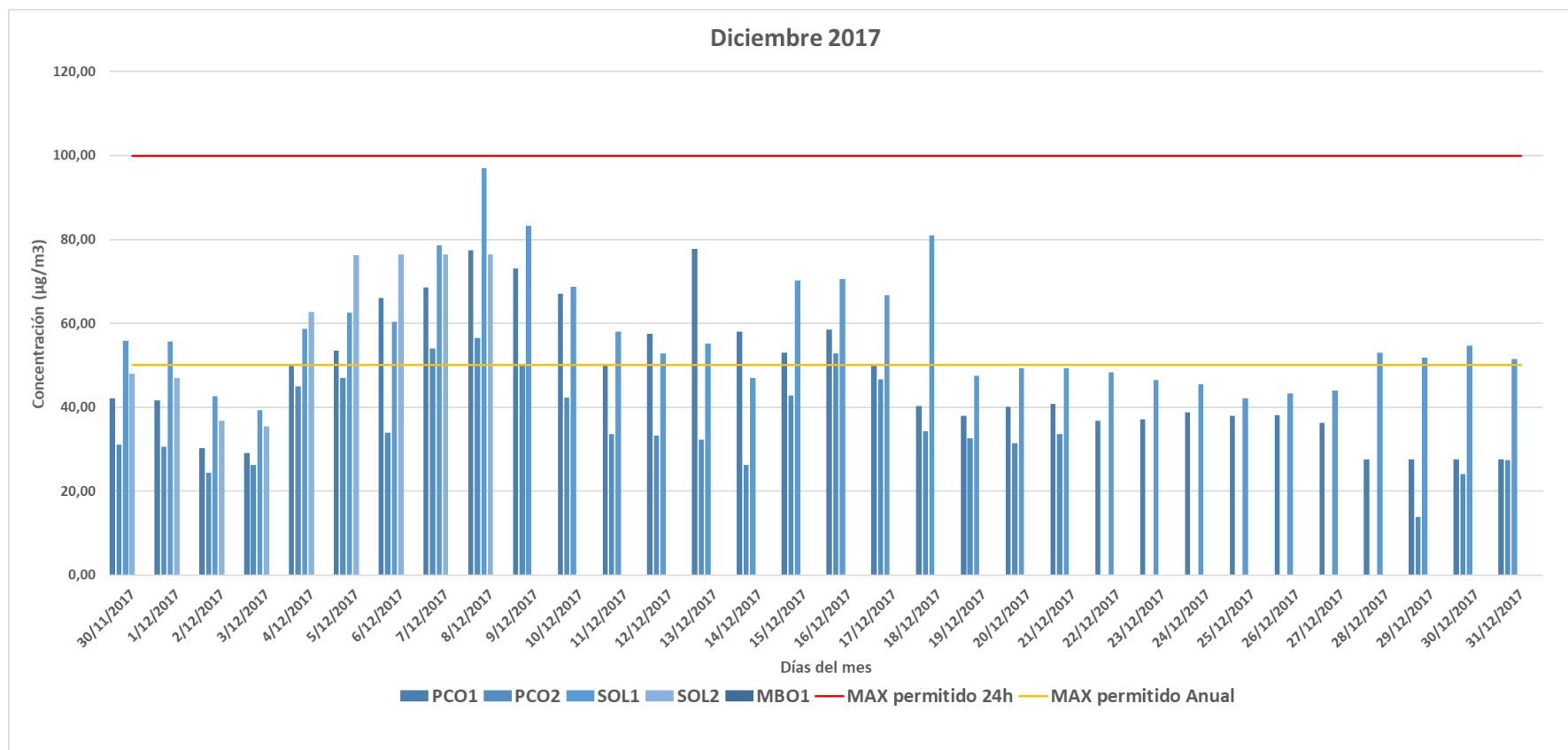
A pesar de los pocos datos de concentración, la estación meteorológica en la zona norte registró un promedio para velocidad del viento de 5,1 m/s y un total de precipitación de 2,7 mm, lo cual muestra la razón por la que las concentraciones descendieron en las estaciones PCO1 y PCO2. En la zona sur se presentó velocidad del viento promedio de 3,8 m/s y registros de precipitación total de 38,5 mm, por lo cual las estaciones de SSOL1 y SOL2 tuvieron mayores registros de concentración para PM10 que las estaciones del norte.



Gráfica 23. Concentraciones de las estaciones en octubre. Fuente: autor.



Gráfica 24. Concentraciones de las estaciones en noviembre. Fuente: autor.



Gráfica 25. Concentraciones de las estaciones en diciembre. Fuente: autor.

6.4. Análisis espacial.

En estos resultados se puede observar el comportamiento de cada una de las estaciones durante todo el periodo de marzo a diciembre del año 2017. De esta manera se puede ir construyendo junto a otras investigaciones el comportamiento típico de cada punto de muestreo, para así poder realizar evaluaciones de cómo incrementa o disminuye la concentración de PM10 dependiendo del mes del año.

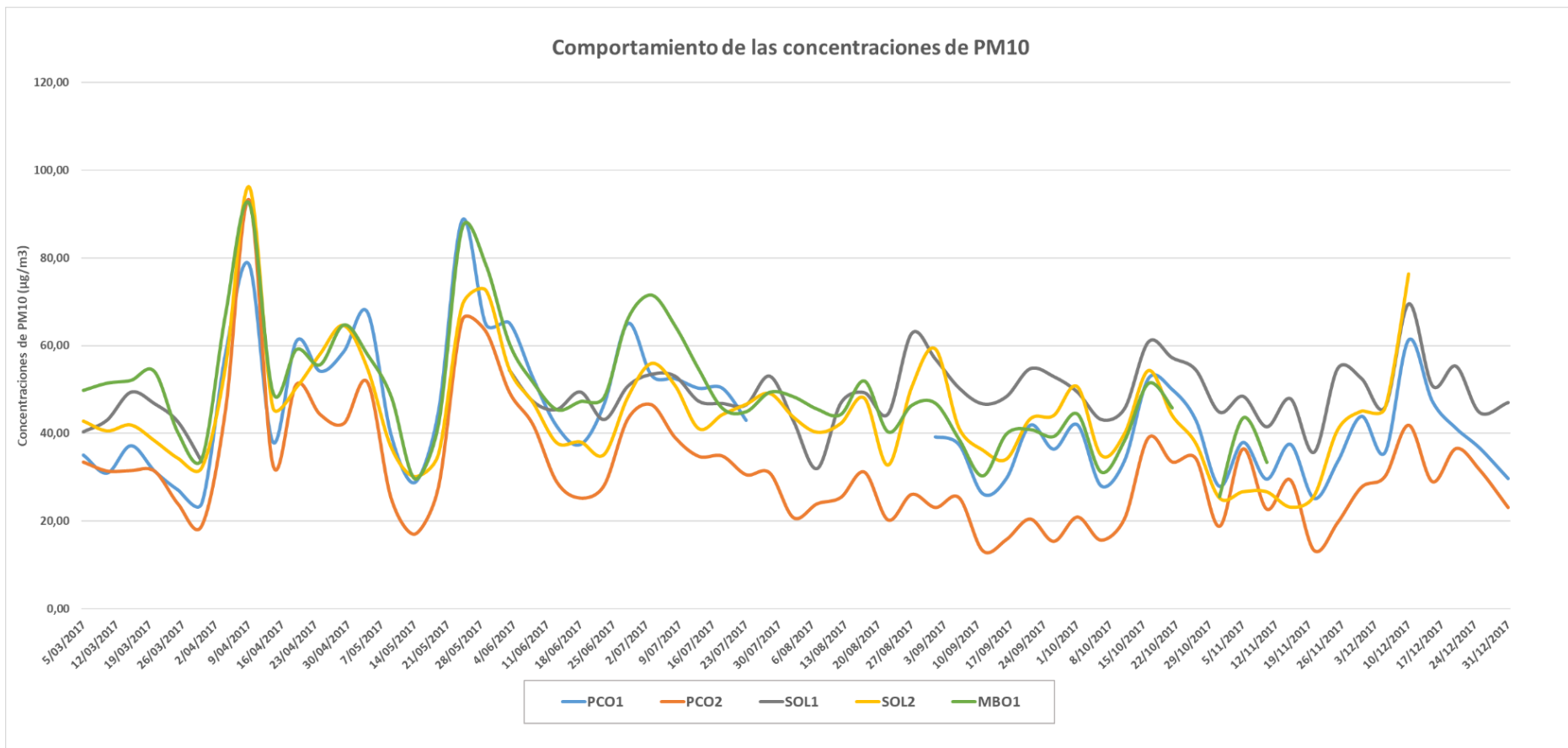
La siguiente gráfica (Gráfica 26) fue construida con promedios de concentración de PM10 cada cinco días, esto garantiza que exista por lo menos cuatro datos representativos por mes investigado, además en la ilustración se muestra representada con líneas y no con barras, esto para facilitar la visualización del comportamiento de las estaciones. Los colores también ayudan a que se logre diferenciar un punto de muestreo de otro, además no se colocaran límites permisibles dentro de la gráfica.

Teniendo en cuenta lo anterior, se procede a revisar la gráfica desde el mes de marzo encontrando que las cinco estaciones evaluadas poseen un comportamiento similar arrancando en concentraciones entre los 35 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con un leve ascenso que luego cae a finales del mes de marzo a concentraciones por debajo de los 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para el mes de abril, las estaciones registraron un ascenso casi vertical hasta alcanzar valores de concentración entre los 80 – 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, esto solo durante las primeras dos semanas de este mes. Resaltando el hecho de que todas las estaciones presentaron el mismo comportamiento, se podría decir que no se trata de evento aislado ya que hay estaciones que están separadas por más 24 kilómetros lineales. Este pico de concentración desciende hasta presentar concentraciones entre los 35 – 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para luego subir por encima de los 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y así terminar el mes. Además, se comienza a visualizar la primera separación de comportamientos entre las estaciones del norte (PCO1 y PCO2) y las estaciones en el sur (SOL1, SOL2 y MBO1).

Durante el mes de mayo, se presentó un descenso coordinado de las cinco estaciones hasta alcanzar concentraciones promedio entre los 20 – 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para luego presentar un aumento hasta encontrarse entre los 65 – 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mostrando el segundo pico más alto de PM10 de toda la investigación a casi un mes del primer registro. De esta manera culminó el mes sin antes presentar un descenso de las concentraciones más suave.

El mes de junio presentó la segunda división de las estaciones entre aquellas ubicadas en el norte (PCO1 y PCO2) y las que se encuentran en el sur (SOL1, SOL2 y MBO1). Las dos primeras en azul y rojo presentan un comportamiento diferenciado a las otras tres estaciones, esto puede presentarse gracias a la cercanía entre las estaciones. Sin embargo, cabe resaltar que las estaciones del norte muestran concentraciones por debajo de las que se encuentran al sur, lo que podría dar los primeros indicios del aporte de la de PM10 por parte de todo el asentamiento urbano-industrial que se encuentra entre la zona norte y sur.



Gráfica 26. Comportamiento de las concentraciones de PM10. Fuente: autor.

A comienzos del mes de julio podemos observar un ascenso coordinado entre tres estaciones (PCO2, SOL2 y MBO1) cada una en concentraciones diferentes, pero con el mismo comportamiento, que indica el transporte equitativo de partículas en el aire. Nuevamente, una de las estaciones ubicadas en el norte posee la concentración más baja lo que podría ser un índice, de una “base de concentración de PM10”. Con esto, es posible pensar que la diferencia entre esta estación que presenta una base de concentración y las estaciones más al sur, podría determinarse el aporte directo de la urbe sobre los municipios al sur de Barranquilla. Además, se registró un descenso suave de las concentraciones hasta quedar en concentraciones entre 35 – 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y así finalizó este periodo.

Igual que el mes anterior, agosto inició con un comportamiento coordinado entre las estaciones PCO2, SOL2 y MBO1 mostrando picos y valles que van desde los 20 – 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Es de resaltar que la estación PCO1 quedó fuera de servicio durante este mes por lo que no existen datos para referenciar. Además, se comienza a evidenciar que la estación SOL1 tiene un comportamiento independiente al resto de las estaciones, a pesar que por momentos muestra indicios de coordinación o similitud, la mayor parte del tiempo tiene un comportamiento autónomo, esto podría indicar que este punto se encuentra influenciado por eventos muy particulares que solo afectan a estación. Sin embargo, para final de mes las cuatro estaciones presentan comportamiento coordinado con concentraciones entre los 20 – 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Septiembre inició con el arranque del equipo ubicado en PCO1 y mostrando un descenso de las concentraciones en las cinco estaciones, además se puede evidenciar que la estaciones en norte se encuentran por debajo del resto de las estaciones con respecto a las concentraciones que registran, entre 15 – 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A mediados de mes, se puede ver que las estaciones PCO1, SOL2 y MBO1 tienen concentraciones muy similares alrededor de los 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual puede ser una señal de que en ese momento ocurrió un evento meteorológico que ayudo a que las estaciones registraran la misma concentración promedio. Sin embargo, como se evidenció en el mes anterior, SOL1 muestra un comportamiento muy particular y diferenciado al resto de las estaciones.

Durante el mes de octubre, se presentó un comportamiento coordinado entre las cinco estaciones con un valle y luego un pico que va desde los 40 – 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mostrando siempre a la estación PCO2 por debajo y a SOL1 por encima de todas. Además, se vuelve a presentar el mismo fenómeno del mes anterior, donde las tres estaciones restantes presentaron concentraciones promedio iguales en el mismo punto, esta vez entre 40 – 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Luego, a final de mes, se presentó un descenso coordinado en las concentraciones promedio en la que se evidencia la estación PCO2 por debajo del promedio y a la estación SOL1 por encima del resto de las estaciones.

Para el mes de noviembre, la mayoría de las estaciones presentaron un comportamiento coordinado, pero a diferentes rangos de concentraciones promedio manteniendo por debajo a las estaciones ubicadas en el norte (PCO1 y PCO29) y por encima a las del sur. No obstante, la estación SOL2 presentó un comportamiento diferenciado en el que se mantuvo por debajo del resto de las estaciones. También, se puede observar que las

concentraciones promedio de PM10 estuvieron alrededor de los 10 – 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con picos y valles bastante marcado en la mayoría de las estaciones. Además, la estación SOL1 mostró el promedio de concentración más alto y MBO1 quedó fuera de servicio a partir de este mes.

En diciembre, la estación SOL2 sigue presentando un comportamiento diferenciado pero similar en el aumento de las concentraciones promedio. Por otra parte, las estaciones PCO1, PCO2, y SOL1 muestran un comportamiento coordinado en los picos y valles de las concentraciones promedio, siempre manteniéndose por encima la estación SOL1 y por debajo la estación PCO2. Las concentraciones estuvieron entre los rangos de 30 – 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, después de mitad de mes se presentó un descenso pronunciado en las concentraciones hasta los 20 – 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y así finaliza el último mes de investigación.

Finalmente, se puede observar en términos generales un comportamiento uniforme por parte de todas las estaciones esto, puede deberse a varios factores climatológicos y geográficos que condicionan las concentraciones de PM10 en toda el área de estudio. En el primer caso, la velocidad del viento, la precipitación, la temperatura y la humedad relativa juegan un papel importante en los niveles de concentraciones de material particulado, como se explicó anteriormente. Por otra parte, la geografía del área de estudios permite una mayor velocidad en el transporte de materiales suspendidos, lo cual podría ser la razón por la cual observamos un comportamiento uniforme y estable en la mayoría de las estaciones del estudio.

7. CONCLUSIONES

En la evaluación de la calidad del aire registrada por los equipos analizadores de PM10 del SVCA C.R.A. se descubrió que las concentraciones para este contaminante solo superaron los límites establecidos por la resolución 2254 de 2017, para concentraciones horarias de promedio 24h el límite establecido de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a principios del mes de abril y a finales del mes de mayo, las estaciones PCO1, SOL2 y MBO1 en abril, y solo MBO1 para mayo. Durante el resto de la investigación las concentraciones no superaron el este límite.

De la validez estadística se encontró que la mayoría de los datos no validos surgieron de los equipos que quedaron fuera de servicio durante el periodo de investigación, y que en algunos casos estos datos correspondieron a valores de concentración duplicados que se repitieron hasta que el equipo dejaba de funcionar, sin embargo, no fueron suficientes para descartar la totalidad de los datos de la investigación. Las estaciones que presentaron este fenómeno fueron PCO1 a finales de julio y la estaciones de SOL2 y MBO1 a finales de noviembre.

De la construcción de las distribuciones temporales y espaciales se evidenció que, el comportamiento del PM10 para esta investigación fue muy uniforme en todas las estaciones de muestreo. Además, que los parámetros meteorológicos evaluados influyeron considerablemente en las concentraciones del material en suspensión, sobre todo la velocidad del viento, la precipitación y la humedad relativa. Donde la primera ayuda a la dispersión y las dos últimas a “lavar” el aire, todas en beneficio de la calidad del aire.

De los puntos de muestreo se encontraron dos puntos atípicos entre las estaciones evaluadas, PCO2 y SOL1, que fueron directamente influenciada por el régimen de vientos provenientes del NORTE y el Este. La primera estación ubicada en el norte de la ciudad de Barranquilla presenta las condiciones óptimas de concentración de PM10 y los registros más bajos, dado a que su única influencia son los vientos que circulan desde el mar Caribe. La segunda ubicada al sur y la primera de Este a Oeste, es la estación con el comportamiento más diferenciado, dado a que se encuentra influenciada por la zona portuaria e industrial de Barranquilla y Soledad.

El Índice de Calidad del Aire estipulado por MinAmbiente, demostró que las estaciones de esta investigación no superaron la alerta amarilla (Aceptable) durante todo el periodo. Además, indicó que las estaciones con peor calidad de aire teniendo como referencias las mismas, fueron SOL1 y MBO1. En adición, la estación donde se respira el aire más limpio es PCO2.

El mes con mayores concentraciones de PM10 fue abril, un periodo con escasas lluvias y poco viento que permitió que no se realizara una buena mezcla del material particulado, provocando que estos cayeran y fueran registrados por los equipos. Durante este periodo, tres de las cuatro estaciones en funcionamiento registraron concentraciones en categoría ICA “aceptable” (amarillo) por encima del 52,8% del total de datos.

Los meses con menores concentraciones fueron los mismos con mayor precipitación acumulada y humedad relativa, es decir, que las lluvias contribuyeron a que los meses de septiembre, octubre y noviembre obtuvieran una mejor calidad del aire. Durante estos tres meses, se evidenció que en nueve ocasiones las concentraciones de PM10 estuvieron por encima del 90% dentro de la categoría ICA “bueno” (verde). La estación SOL1 solo alcanzó el 81,1% del total de datos para la misma categoría.

El recorrido del PM10 es muy rápido, esto se comprobó por el comportamiento sincronizado de estaciones que se encuentran a más de 24 kilómetros lineales, PCO2 y MBO1. Se observó que este comportamiento se debe a la escasa geografía montañosa y el régimen de vientos característicos de zonas costeras.

Las estaciones ubicadas al norte de la ciudad de Barranquilla son las que obtuvieron mejor calidad del aire con respecto a las concentraciones de PM10. Esto se debe a que los vientos provienen del mar caribe, arrastran un técnicamente libre de contaminantes generados por actividades antropogénica. Sin embargo, la estación PCO1, igualmente en el norte, mostró el aporte de PM10 proveniente la población urbana del municipio de Puerto Colombia.

8. RECOMENDACIONES

De los datos no válidos, se encontró que entre mayor sea el porcentaje de estos más cerca se encuentra el equipo analizador de partículas de salir de funcionamiento. Es importante sugerir entonces, que realicen correcciones, arreglos y cambio de suministro de manera oportuna, esto se puede apreciar al momento de revisar los datos registrados por el equipo. Con la finalidad de que los equipos puedan adquirir la mayor cantidad de datos y así construir informes de desempeño y comportamiento más completos y certeros.

Se encontró que dos estaciones poseen registros atípicos con respecto a las estaciones evaluadas, PCO2 y SOL1. La primera con las mejores condiciones de calidad del aire y manteniéndose en su comportamiento de concentraciones por debajo de las otras estaciones, por este motivo, la estación de PCO2 debe ser utilizada como punto de partida o como una “base de concentración de PM10”, y así determinar el aporte de material particulado de la ciudad hacia los municipios al sur. Por otra parte, la estación SOL1 posee un comportamiento diferenciado lo cual es influenciado por las zonas portuarias e industriales de Barranquilla y Soledad.

Se evidenció igualmente que la estaciones de PCO1 y PCO2 siempre estuvieron por debajo de las concentraciones del resto de las estaciones, además el comportamiento sincronizado de las estaciones muestra los aportes directo de PM10 de la ciudad de Barranquilla sobre el área metropolitana, se sugiere tomar mediad en conjunto con las entidades involucradas para evitar incrementos de contaminación.

Se recomiendo entonces que los cambios de filtros y suministros se hagan de manera oportuna para evitar que se pierdan datos de concentraciones vitales para la evaluación de la calidad del aire. Además, se recomienda tener como punto de referencia la estación de PCO2 con el mejor ICA de todo el estudio y prestar atención a la estación de SOL1 que está siendo influenciada por condiciones particulares de este punto y que no afectan al resto.

BIBLIOGRAFÍA

- Amorocho J. (2016). Centro de Medellín tiene uno de los aires más contaminados del país, según IDEAM. En: El Colombiano. Medellín. Recuperado de: <https://www.elcolombiano.com/ideam-revelo-su-estudio-de-calidad-de-aire-y-medellin-tiene-uno-del-punto-mas-contaminado-EA54244643famp=1>.
- Bogotá Cómo Vamos, (2017). Informe de Calidad de Vida de Bogotá, 252.
- California Environmental Protection Agency. Air Resources Board, ed. (26 de septiembre de 2011). Particulate Matter Program. Recuperado de: <https://www.arb.ca.gov/pm/pm.htm>.
- El Heraldo, (2016). Atlántico tendrá nueva red de monitoreo de calidad del aire. Barranquilla, Colombia. Recuperado de: <https://www.elheraldo.co/barranquilla/atlantico-tendra-nueva-red-de-monitoreo-de-calidad-del-aire-299486>.
- IDEAM, MINAMBIENTE, (2016). Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011- 2015, 6-69.
- Martínez, E., & Díaz, Y. (2004) Contaminación atmosférica. Universidad de Castilla-La Mancha. 13.
- MAVDT, (2008). Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, 281-282.
- OULAMB, (2016). Libro de Indicadores del Observatorio Urbano Local del Área Metropolitana de Barranquilla, 31-44.
- Pan American Health Organización (2016). Conceptos Básicos de la Meteorología de la Contaminación del Aire. 6.
- Revista Semana, (2017). ¿Qué tan mala es la calidad del aire en Bogotá? Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://www.semana.com/nacion/articulo/calidad-del-aire-en-bogota-personeria-denuncia-buses-de-transmilenio/534677>.
- Spiro, T., & Stigliani, W. Química Medioambiental. 2a. edición. Pearson Prentice Hall. Madrid. 1996, 225.
- US-EPA, (2017). Particulate Matter (PM) Pollution. Table of Historical Particulate Matter (PM) National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). Washington, Estados Unidos. Recuperado de: <https://www.epa.gov/pm-pollution/table-historical-particulate-matter-pm-national-ambient-air-quality-standards-naaqs>.
- WHO (2016). Organización Mundial de la Salud. Centro de Prensa. Recuperado de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es>.

ANEXOS

Tabla A1. Valores totales mensuales de precipitación (mm) estación Las Flores.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Vr Anual
2012	0	0	0	16,6	197,3	29,8	0	82,3	140	125	32,1	0	632,2
2013	0	0	0	0	195,9	17,1	39,2	122,5	365	104,4	91,5	0	935,8
2014	0	0	0	0	14	0	0	59,1	349	153,4		8,2	584,1
2015	0	0	16,4	16,4	9,8	122,4	31,9						196,9
MEDIA	0	0	4,1	8,3	104,3	42,3	17,8	88,0	284,9	127,6	61,8	2,7	587,3

Fuente: IDEAM.

Tabla A2. Valores medios mensuales de velocidad del viento (m/s) estación Las Flores.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Vr Anual
2000	3,5	3,7	3,7	3,3	2,6	2,6	2,7	2,9	2,2	2	2,5	2,7	2,9
2001	3,5	4,2	3,7			5	4,4	4,4	3,2	3,2	4,1	5,3	4,1
2002	6,9	6,2	6,8	6,5	4,7	3,9	4,5	4,4	2,1	3,2	4,5	7,4	5,1
2003	7,4	7,5	6,5	5	3,9	3,1	4,8	4	2,7	2,3			4,7
MEDIA	5,3	5,4	5,2	4,9	3,7	3,7	4,1	3,9	2,6	2,7	3,7	5,1	4,2

Fuente: IDEAM.

Tabla A3. Valores medios mensuales de humedad relativa (%) estación Las Flores.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Vr Anual
2014	82	82	85	83		80.3							82
2015	81	83	83	83	82	81	83		85	84	84	86	83
2016	85	86	86	83			81	79	80	77	79	83	82
2017	83	84	82				77						82
MEDIA	82.8	83.8	84.0	83.0	82.0	80.7	80.3	79.0	82.5	80.5	81.5	84.5	82.3

Fuente: IDEAM.

Tabla A4. Valores medios mensuales de temperatura (°C) estación Las Flores.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Vr Anual
2012	26.7	26.4	26.2	27.5	28.3	28.5							27.3
2013	26.3	26.5	27.1	27.1	27.8	28.1	28.4	28.3	28	28	27.9	26.9	27.6
2014	26.4	26.2	26.5	27.7	28.1	28.3	28.2	28	28	28.8	28.4	27.6	27.7
2015	26.1	26.4	26.4	27.2	27.4	27.4	28.2						27
MEDIA	26.4	26.4	26.6	27.4	27.9	28.1	28.3	28.2	28.0	28.4	28.2	27.3	27.4

Fuente: IDEAM.

Tabla A5. Valores totales mensuales de precipitación (mm) estación Apto Ernesto Cortissoz.

<i>Año</i>	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>Vr Anual</i>
2014	0	0	0	0	62,7	30,1	1,3	77	254	124,8	112,6	69	731,5
2015	0	41,4	0,4	0	27,8	42,9	7,5	47	61	110,4	156,8	0	453,1
2016	0	0,3	0	73	112	96,5	28,7	125	43				678,3
2017								108	215	55,4	98,4		476,9
MEDIA	0	13,9	0,13	24	67,5	56,5	12,5	89,2	143	96,9	122,6	34,5	585,0

Fuente: IDEAM.

Tabla A6. Valores medios mensuales de velocidad del viento (m/s) estación Apto Ernesto Cortissoz

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Vr Anual
2014	4,3	4,7	4,8	4,3	3,5	3,3	3,8	3,3	2,6	2,4	2,8	3,5	3,6
2015	4,7	4,8	5,5	4,2	4			3,7	3,3	3	2,9		4
2016	4,8	5,2	5,2	4,7	3,1	3	3,3	3,2	2,9	2,3	2,4	4,1	3,7
2017	5,4	5,3	5,7	4,3	2,4	2,6	3,4	2,9	2,5	2,4			3,7
MEDIA	4,8	5,0	5,3	4,4	3,3	3,0	3,5	3,3	2,8	2,5	2,7	3,8	3,8

Fuente: IDEAM.

Tabla A7. Valores medios mensuales de humedad relativa (%) estación Apto Ernesto Cortissoz

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Vr Anual
2014	80	81	81	81	82	82	78	81	86	86	86	84	82
2015	81	80	79	81	81	79	78	79	83	84	87	81	81
2016	80	78	76	79	83	82	78	79	83				80
2017								84	85	84	85		85
MEDIA	80.3	79.7	78.7	80.3	82.0	81.0	78.0	80.8	84.3	84.7	86.0	82.5	82.0

Fuente: IDEAM.

Tabla A8. Valores medios mensuales de humedad relativa (%) estación Apto Ernesto Cortissoz

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Vr Anual
2014	26.8	26.7	27.3	28.1	28.7	29	29.1	28.9	28	28.1	28.1	27.8	28.1
2015	26.8	27.5	26.9	28.4	28.6	29	28.7	29.3	29	29.1	28	28.5	28.4
2016	27.5	27.6	28.1	28.8	29.3	28.6	28.9	29.2	28				28.5
2017								28.2	28	28.1	27.8		28
Media	27.0	27.3	27.4	28.4	28.9	28.9	28.9	28.9	28.5	28.4	28.0	28.2	28.3

Fuente: IDEAM.