



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ESTIMACIÓN DE LA REMOCIÓN DE PM_{2.5} POR
EL ARBOLADO URBANO EN EL VALLE DE
ABURRÁ**

Autor

Daniela Velásquez Ciro

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2019



ESTIMACIÓN DE LA REMOCIÓN DE PM_{2.5} POR EL ARBOLADO URBANO EN EL VALLE DE ABURRÁ

Daniela Velásquez Ciro

Trabajo de Investigación
como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Ambiental

Director:

Julio Eduardo Cañón Barriga, MSc, Ph.D.

Codirectora:

Isabel Cristina Hoyos Rincón, MSc, Doctora

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2019

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al SIATA por proporcionarnos los datos de calidad del aire y meteorología y a la Secretaría de Medio Ambiente por facilitarnos la base datos SAU.

Este trabajo está financiado por el estímulo académico de Estudiante Instructor, otorgado por la Universidad de Antioquia en el marco del programa de Maestría en Ingeniería Ambiental.

Agradezco a la Escuela Ambiental por el apoyo durante la realización de la maestría.

Agradezco a mis directores por guiarme en esta investigación y a mi familia por el apoyo constante en esta etapa de mi vida.

RESUMEN DEL TRABAJO

El Valle de Aburrá, en Colombia, tiene un problema crónico de calidad de aire. Una alternativa para reducir los efectos de esa contaminación es aumentar las áreas arborizadas. En esta investigación calculamos la remoción de PM2.5 por el arbolado urbano y el efecto del cambio del área arborizada. En este sentido, codificamos la metodología UFORE en lenguaje Python para calcular la remoción espacialmente distribuida en el Valle. Utilizamos imágenes satelitales Sentinel 2A para identificar las coberturas arbóreas y estimar el Índice de Área Foliar (IAF), que es un insumo importante para los cálculos. Planteamos diferentes escenarios con cambios en las variables involucradas en el cálculo (concentración de PM2.5, precipitación, velocidad del viento y cobertura arbórea). Al calcular la remoción del PM2.5 para la condición base (2017), encontramos un valor cercano a 23 toneladas por año. Cuando aumentamos el área total arborizada en un 1% de manera proporcional en todo el Valle, el valor de la remoción aumenta en 1%. Por otro lado, al localizar la arborización en las zonas de mayor concentración del contaminante, la remoción total tiene un aumento cercano al 1,6 %, lo que implicaría que la decisión de arborización debe priorizarse en dichos lugares para que sea efectiva. Encontramos que una menor cantidad de estaciones puede sobrestimar el valor de la remoción total. De acuerdo al análisis de los escenarios, concluimos que la precipitación tiene un mayor efecto en el aumento o reducción de la remoción del contaminante, después de la cobertura arbórea. Especialmente, el aumento de la remoción total depende del aumento de la cobertura arbórea y durante el año la mayor remoción es en el mes donde los niveles de contaminación son más altos. Igualmente, estimamos preliminarmente que optimizar el IAF de la cobertura arbórea (p.ej. con un valor de 4) puede resultar más efectivo que aumentar el área. A pesar de que el arbolado urbano no tiene un efecto muy representativo en la eliminación de contaminantes atmosféricos, sí aumenta la remoción si se implementan otras medidas de mitigación para reducir la contaminación.

Palabras claves: Cobertura arbórea, arbolado urbano, PM2.5, modelo UFORE, calidad del aire, contaminación atmosférica.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN DEL TRABAJO	4
CONTENIDO.....	5
1 INTRODUCCIÓN	7
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
3 OBJETIVOS.....	11
3.1 OBJETIVO GENERAL	11
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
4 MARCO TEÓRICO.....	12
4.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN VALLES	12
4.2 PAPEL DE LA VEGETACIÓN EN ENTORNOS URBANOS.....	13
4.2.1 Vegetación urbana en el Valle de Aburrá	14
4.3 ESTIMACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS POR ÁRBOLES.....	15
4.3.1 Metodología del Modelo UFORE.....	16
4.3.2 Escenarios de remoción de contaminantes por árboles	19
5 METODOLOGÍA	20
5.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	20
5.2 ESTACIONES DE CALIDAD DEL AIRE Y DATOS METEOROLÓGICOS	20
5.3 CÁLCULO DE LA REMOCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM _{2.5})	22
5.4 ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA ARBÓREA Y DEL IAF.....	22
5.5 DISEÑO DE ESCENARIOS	23
5.5.1 Proyección de las precipitaciones	25
5.5.2 Proyección de la concentración del contaminante PM _{2.5} y velocidad del viento	26
5.5.3 Proyección de la cobertura arbórea.....	27
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
6.1 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES.....	29
6.1.1 Precipitación	30
6.1.2 Concentraciones de PM _{2.5}	31
6.1.3 Velocidad del viento	33
6.1.4 Cobertura arbórea y valores de IAF	35
6.2 PRUEBAS PRELIMINARES DEL MODELO Y VALIDACIÓN.....	37
6.3 REMOCIÓN DE PM _{2.5} EN MEDELLÍN Y EL VALLE DE ABURRÁ	39
6.4 REMOCIÓN EN LOS DIFERENTES ESCENARIOS PROYECTADOS.....	42

6.4.1	Análisis mensual	46
6.4.2	Análisis por estación	48
7	CONCLUSIONES.....	53
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1 INTRODUCCIÓN

En años recientes, el Valle de Aburrá ha presentado niveles muy altos de contaminación por PM2.5, superando los límites permisibles. Desde el año 2016, la Autoridad Ambiental ha declarado contingencias ambientales para toda el área metropolitana y ha implementado medidas a corto plazo para dar control inmediato a la emergencia (Alcaldía de Medellín, 2018; Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), 2019; Contraloría General de Medellín & Universidad Nacional de Colombia (UNAL), 2018; AMVA, 2019b). Estos aumentos en la contaminación atmosférica han motivado la movilización social y el desarrollo de medidas y planes para la gestión de la calidad del aire (Proantioquia et. al., 2019).

Las autoridades gubernamentales y la autoridad ambiental han desarrollado diferentes planes dirigidos a mejorar la calidad del aire, entre estos se encuentra el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire (PIGECA), que contiene medidas a mediano y largo plazo que buscan mitigar las condiciones desfavorables de la calidad del aire e incluye un protocolo con un plan de acción para Índices de Calidad del Aire (ICA) muy altos, y el Plan Operacional para enfrentar Episodios de Contaminación Atmosférica en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (POECA), que contiene las medidas de choque dentro del plan general de acciones por el aire y puede aplicarse en cualquier momento del año (AMVA, 2018; MADS, 2017). También, existe un proyecto para emplazar un cinturón verde alrededor del área urbana para detener su expansión (Agudelo-Patiño & Miralles-García, 2015). Entre estos planes, la reforestación y la arborización de diferentes áreas son medidas muy populares y promovidas. En particular, el Área Metropolitana creó el Plan de Siembra del Valle de Aburrá para sembrar un millón de árboles a 2019 (AMVA, 2018b; Alcaldía de Medellín, AMVA & urban (EAFIT), 2011).

Para el año 2015, Arroyave et al. (2019) identificaron una remoción de 32.1 toneladas de PM2.5 por el arbolado urbano en el Valle de Aburrá. Para ello se enviaron datos de calidad del aire y meteorológicos del 2014 al Servicio Forestal de Estados Unidos, los cuales administran el Modelo i-Tree Eco. Sin embargo, no existe información de los efectos en la remoción de PM2.5 por el cambio

de la cobertura arbórea. Además, no hay ninguna herramienta disponible para calcular y proyectar la remoción de contaminantes del aire por los árboles en esta región.

En la presente investigación buscamos calcular la remoción de PM_{2.5} que realiza el arbolado urbano del Valle de Aburrá, utilizando una versión espacialmente distribuida del modelo UFORE programada en lenguaje Python. Planteamos diferentes escenarios donde consideramos cambios meteorológicos, de calidad del aire y cobertura arbórea, así como el impacto de la densidad de la vegetación, con el fin de estimar la efectividad de los árboles en la remoción frente a diferentes condiciones en el Valle.

Primero presentamos de forma resumida la problemática de contaminación atmosférica y la implementación de coberturas arbóreas como medidas de mitigación. Luego, planteamos los objetivos que conducen a responder la pregunta de nuestra investigación. Después, explicamos de forma concisa cómo es la contaminación atmosférica en los valles urbanos, cuál es el papel que cumplen los árboles en la remoción de contaminantes atmosféricos y la metodología del modelo UFORE. Después, presentamos la metodología de cómo completamos los datos faltantes, proyectamos las series de tiempo, calculamos el Índice del Área Foliar (IAF), codificamos las ecuaciones del modelo en Python, y planteamos los escenarios que analizamos en la investigación. Finalmente, presentamos los resultados y conclusiones donde analizamos el efecto de la cantidad de estaciones de calidad del aire a tener en cuenta, la remoción para el escenario actual y para los otros escenarios, y principalmente, el efecto de la lluvia y la cobertura arbórea en la remoción de PM_{2.5}.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Valle de Aburrá presenta altos niveles de contaminación del aire debido en parte a la emisión de gases y partículas lanzadas por la industria y el transporte vehicular (Gómez, 2017; AMVA & Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), 2017). Los niveles desfavorables de contaminación se ven empeorados por la estabilidad atmosférica y la inversión térmica, la cual suele presentarse en horas de la noche, debidas a las condiciones climáticas y topográficas particulares del Valle (AMVA, 2018c; Rendón et al., 2015).

Es así que, desde 2012, las concentraciones de PM10 y PM2.5 en el Valle han aumentado, lo que lleva a la región a experimentar contingencias frecuentes de la calidad del aire ambiental, especialmente en los meses de marzo y octubre (Alcaldía de Medellín, 2018; AMVA, 2019; AMVA, 2019b). Esta contaminación atmosférica por PM2.5 constituye un riesgo para la salud pública, propiciando en la población síntomas y enfermedades, como cáncer de pulmón, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, infartos cardiovasculares y respiratorios, entre otros, que pueden llevar a la muerte y afectan a grupos vulnerables tales como adultos mayores, niños e individuos en condiciones de salud precarias (Organización mundial de la Salud (OMS), 2018; AMVA & Clean Air Institute, 2017; World Bank & Institute for Health Metrics and Evaluation, 2016). Estas enfermedades implican gastos de atención médica que las familias deben asumir, así como la utilización de servicios de asistencia hospitalaria (consultas, visitas a salas de emergencia y hospitalizaciones) por causas respiratorias y cardiovasculares, además de ausentismo escolar y pérdida de productividad por incapacidades y días de actividad restringida, en consecuencia, hay un impacto económico negativo para las familias, la economía local y nacional (Contraloría General de Medellín & UNAL, 2018; AMVA & Clean Air Institute, 2017; World Bank & Institute for Health Metrics and Evaluation, 2016).

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la Alcaldía de Medellín y el Gobierno Nacional han considerado diferentes medidas para reducir la contaminación del aire, entre las que se encuentran la reforestación y la arborización de diferentes áreas del Valle, como lo establece el PIGECA en el

eje temático seis (6) de implementación de medidas (AMVA, 2018d; Alcaldía de Medellín, 2018; MADS, 2017). También han creado un proyecto para emplazar un cinturón verde alrededor de la zona urbana para evitar su eventual expansión (Agudelo-Patiño & Miralles-Garcia, 2015). En particular, el Área Metropolitana creó el Plan de Siembra Aburrá para sembrar un millón de árboles a 2019. Desde el 2016 se han sembrado especies de árboles nativos como el Guayacán Amarillo y Rosado, Aguacatillo, Balso, Búcaro, Samán, Cámbulos entre otras (AMVA, 2019b).

Con los impactos esperados del cambio climático, además del aumento latente en la flota de vehículos y el desarrollo urbano, es necesario comprender el papel de los árboles para establecer la vegetación estratégicamente y maximizar la eliminación potencial de contaminantes y los beneficios futuros en calidad del aire (Tallis et al, 2011).

En este sentido, la pregunta que pretendemos responder en este proyecto es: ¿cuál sería el efecto de las diferentes configuraciones de árboles urbanos en la remoción de PM_{2.5} en el aire del Valle de Aburrá? Utilizaremos el modelo UFORE para determinar el efecto de diferentes configuraciones de árboles en la remoción de PM_{2.5}, tanto para un escenario ambiental actual como para escenarios proyectados (Hirabayashi et al., 2015).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo de esta investigación es evaluar el efecto de diferentes coberturas de árboles urbanos y condiciones de precipitación en la remoción de partículas atmosféricas en el Valle de Aburrá con el modelo UFORE

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para lograr el objetivo, proponemos los siguientes objetivos específicos:

- Adaptar el modelo UFORE para estimar la remoción de material particulado en el Valle de Aburrá con base en la calibración de parámetros locales.
- Analizar los efectos de las variables meteorológicas en la eficiencia de los árboles para eliminar los contaminantes del aire.
- Estimar la remoción de material particulado para diferentes escenarios de cobertura arbórea, calidad del aire y condiciones meteorológicas en el Valle de Aburrá.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN VALLES

Los aumentos en las emisiones contaminantes, la complejidad del terreno y las condiciones meteorológicas son factores clave que causan altos niveles de contaminación del aire en los valles (Ning et al., 2018; Khedairia y Khadir, 2012). Las ciudades ubicadas en valles donde la ventilación es limitada muestran un deterioro en la calidad del aire y altos niveles de contaminación atmosférica (Ning et al., 2018, Rendón et al, 2015, Khedairia & Khadir, 2012). La dispersión de contaminantes atmosféricos puede reducirse por factores como las barreras orográficas, las circulaciones inducidas en las islas de calor urbanas y la nivelación de las inversiones de temperatura, alteradas por los procesos de urbanización (Crosman y Horel, 2017). Estos procesos condicionan el transporte de humedad y contaminantes emitidos desde la superficie (Rendón et al, 2014). La Figura 1 ilustra los principales factores que propician el aumento de la contaminación atmosférica en un valle urbano, como es el caso particular del Valle de Aburrá.

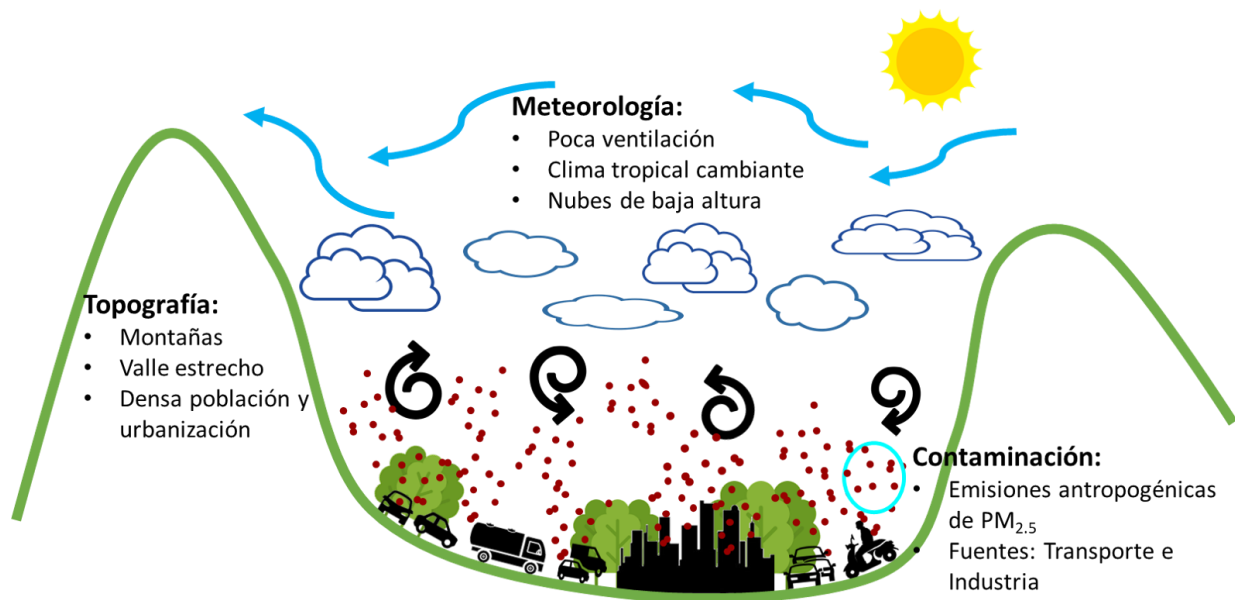


Figura 1. Factores que incrementan la contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá. Fuente: Creación propia con base en AMVA (2018c).

Las condiciones orográficas y meteorológicas del Valle de Aburrá propician el desarrollo de dos condiciones atmosféricas: la estabilidad atmosférica y la inversión térmica (que suele presentarse en horas de la noche). Estas dos condiciones impiden la dispersión y el ascenso de contaminantes (AMVA, 2018c; Sistema de Alerta Temprana del valle de Aburrá (SIATA), 2016; Herrera, 2015; UNAL, 2011).

4.2 PAPEL DE LA VEGETACIÓN EN ENTORNOS URBANOS

En los últimos años, los beneficios de las especies arbóreas y la vegetación en entornos urbanos se han investigado y descrito en profundidad. Estos beneficios incluyen: bajo consumo de energía, reducción de la contaminación del aire, protección contra los rayos ultravioleta, mitigación de las islas de calor, disminución de la escorrentía, reducción del mantenimiento del pavimento, reducción del consumo de energía, mejora del bienestar de la población urbana y reducción de los niveles de ruido del tráfico (Jeanjean et al., 2017; Rogers et al., 2015).

Hay resultados que respaldan el hecho de que la vegetación puede retener material particulado (PM), (Yli-Pelkonen, Setälä & Viippola, 2017), eliminar nitratos y sulfatos, capturar compuestos orgánicos volátiles de la atmósfera y transferirlos al suelo (Taborda, 2017; Cabaraban et al., 2013; Terzaghi et al., 2013). La cantidad de material particulado depositado depende de la concentración, del tamaño y forma de las partículas y de las condiciones atmosféricas (Alcalá, 2008).

Sin embargo, algunos estudios muestran que las velocidades de viento, en promedio, son más bajas dentro de la ciudad, lo que propicia el estancamiento del aire y, en consecuencia, un aumento de los niveles de contaminación y una disminución de la remoción por el bosque urbano (Jeanjean et al., 2017; Santiago, Martilli, & Martin, 2017). Por otra parte, la siembra de árboles con follaje muy denso en calles rodeadas de altos edificios podría inhibir el flujo ascendente y la mezcla de aire, propiciando el aumento de las concentraciones de contaminantes en el aire (Yli-Pelkonen, Setälä, & Viippola, 2017; Wania, et. al., 2012).

Las características fisicoquímicas y biológicas de la cobertura arbórea pueden determinar su viabilidad para la siembra. Esta debe ser lo suficientemente alta y porosa para filtrar el aire contaminado, y estar cerca a la fuente para incrementar la deposición y mejorar la intercepción. Las hojas deben tener vellosidades y el follaje un alto índice de área foliar (IAF) (Janhäll, 2015). La especie y las condiciones de exposición a la atmósfera de las plantas afectan su eficiencia para la captura de los contaminantes atmosféricos (Terzaghi et al., 2013).

Es así que los servicios ecosistémicos prestados por el arbolado urbano varían de acuerdo a su estructura y la problemática de contaminación atmosférica de cada ciudad (Escobedo, et. al., 2011; Rogers et al., 2015). Por tanto, el manejo adecuado de los árboles puede ser una estrategia viable para mejorar la calidad del aire (Yli-Pelkonen, et. al., 2017).

4.2.1 Vegetación urbana en el Valle de Aburrá

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá evaluó si la calidad del aire del Valle influye en el deterioro progresivo de los árboles urbanos. Aunque la contaminación del aire no está directamente relacionada, hace que los árboles sean más susceptibles a los ataques de patógenos (Arroyave et al., 2013). Durán y Alzate (2009) también evaluaron la intercepción de material particulado (PST) por las copas de cinco especies de árboles, encontrando que los árboles ubicados en el perímetro del área metropolitana de Medellín eliminaron hasta 658 kg/m²: *Syzygium Malaccense* y *Lagerstroemia Speciosa* son las especies más efectivas.

Otro estudio de Posada et al. (2009) evaluó el papel que juega la vegetación en el Valle de Aburrá en la reducción del ruido. El ruido ocurre en condiciones de pocos árboles o arbustos dispersos y no muy densos. Concluyeron que, para controlar el ruido en estas áreas urbanas es necesario tomar diferentes medidas para plantar árboles o establecer una cerca viva más amplia, más larga, más alta y más densa.

Reynolds et al. (2017) usaron el modelo i-Tree Streets Administrado por el Servicio Forestal de EE.UU. para determinar la captura de CO₂ por el arbolado urbano (la captura neta de CO₂ aproximada es 320 gCO₂/m² /año). En el año 2017, la captura total de CO₂ fue 2077 MgCO₂/año.

Arroyave et al. (2016) evaluaron los servicios ecosistémicos proporcionados por el bosque urbano en tres parques del Valle de Aburrá con el modelo i-Tree Eco. Los investigadores enviaron datos de calidad del aire y meteorológicos del 2014 al Servicio Forestal de Estados Unidos, que administra el modelo. Con el mismo modelo, identificaron que la remoción de PM_{2.5} en el año 2015 fue 32,1 toneladas por el arbolado urbano del Valle de Aburrá (Arroyave et. al., 2019). En la actualidad no hay una herramienta disponible para calcular y proyectar la remoción de contaminantes del aire por los árboles en esta región.

4.3 ESTIMACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS POR ÁRBOLES

A pesar de la importancia reconocida de los árboles urbanos para mejorar la calidad del aire en las zonas urbanas, todavía existe una falta de información sobre su potencial real para mejorar los entornos urbanos y su interacción con la atmósfera. Esto se debe a la complejidad de los procesos químicos y físicos que ocurren en los árboles y a la falta de modelos numéricos que cuantifiquen estos procesos (Selmi et al., 2016; Cherin et al., 2015; Tallis et al, 2011).

Con herramientas de modelado como ANSYS, OpenFOAM o ENVI-METT, la dinámica computacional de los fluidos es útil para simular estas interacciones y estimar la eliminación de contaminantes atmosféricos (Gromke, C. & Blocken, B., 2015; Vranckx et al., 2015). La aplicación de Dinámica Computacional de Fluidos para el análisis de los árboles como sumideros de contaminación atmosférica describe mejor la influencia que tienen las variables meteorológicas y las edificaciones (Jeanjean et al., 2017; Santiago, et. al., 2017).

Por otro lado, modelos como Citygreen, UFORE (i-Tree Eco), STRATUM (i-Tree Street) y CHIMERE (modificado) han sido creados para analizar estos y otros servicios ecológicos proporcionados por

árboles urbanos (Nowak et al., 2018; Forest Services U. S., 2017; Selmi et al., 2016). En la presente investigación aplicaremos la metodología del modelo UFORE descrita a continuación.

4.3.1 Metodología del Modelo UFORE

El modelo UFORE es la base metodológica de los paquetes de software como i-Tree Eco, que se utilizan para estimar los servicios del ecosistema. i-Tree Eco es uno de los más completos para estimar los servicios ambientales proporcionados por árboles urbanos y también presenta resultados sobre la estructura y funciones para optimizar la siembra de árboles (Grêt-Regamey et al., 2017, Forest Services U. S., 2017, Rogers et al., 2015). La Tabla 1 resume algunas aplicaciones del modelo UFORE.

Tabla 1. Aplicaciones del modelo UFORE

Propósito	Fuentes bibliográficas	Ciudad
Estimate atmospheric pollution removal by urban trees	Bottalico et al. (2017)	Florence, Italy
Resultados del inventario urbano de Playa del Carmen	De la Concha & Reynoso (2017)	Playa del Carmen (Quintana Roo), México
Efectos de la colección de árboles de la Universidad de Antioquia en la calidad del aire del campus.	Taborda (2017)	Medellín, Colombia
Estimate the rates of air pollution removal by dry deposition, in stratified areas of vegetation, and compare with emission rates	Selmi et al. (2016)	Strasbourg, France
Evaluate ecosystem services provided by urban trees	Rogers, Sacre, Goodenough, & Kieron Doick (2015)	London, United Kingdom
Estimación de servicios ecosistémicos del bosque urbano en el Valle de Aburrá, Colombia mediante LAI-2200	Arroyave Maya, M., Gutiérrez Lagoueyt, M., Posada Posada, M., & Osorio, K. (2016)	Medellín, Colombia

El componente de deposición seca de la contaminación atmosférica del modelo UFORE (UFORE - D) calcula la remoción de contaminantes del aire en función de la capacidad de los árboles para filtrar cinco contaminantes: monóxido de carbono, ozono, óxido de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas (Jantz & Manuel, 2013; Hirabayashi, et. al., 2011). El cálculo de la remoción de contaminantes gaseosos es diferente al de material particulado.

El flujo de contaminantes (F) es producto de la velocidad de deposición (V_d) y la concentración de contaminantes (C).

$$F = V_d \cdot C$$

En el caso del contaminante $PM_{2.5}$, la velocidad de deposición seca y la resuspensión desde las hojas de los árboles varía en función de la velocidad del viento, como muestra la literatura (Freer-Smith et al., 2004; Beckett et al., 2000 & Pullman, 2009), modificados y adaptados por Hirabayashi y otros (2015), como se muestra la Tabla 2. Para cada velocidad del viento, calculamos V_d para $PM_{2.5}$ ($V_{d,PM_{2.5}}$) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V_d = V_{d,PM_{2.5}} \cdot IAF$$

Tabla 2. Velocidades de depositación y porcentaje de resuspensión por unidad de área

Vel. viento (m/s)	Velocidad de depositación promedio (cm/s)	Resuspensión (%)
0	0.00	0.0
1	0.03	1.5
2	0.09	3.0
3	0.15	4.5
4	0.17	6.0
5	0.19	7.5
6	0.20	9.0
7	0.56	10.0
8	0.92	11.0
9	0.92	12.0
10	2.11	13.0
11	2.11	16.0
12	2.11	20.0
13	2.11	23.0

Fuente: Hirabayashi et al. (2015).

Los valores de flujo acumulado para cada hora se calculan sumando el flujo de PM_{2.5} con el flujo acumulado de la hora anterior menos un porcentaje resuspendido a la atmósfera. Durante los eventos de precipitación, el modelo asume que el PM_{2.5} acumulado se lava cuando supera la capacidad máxima acumulable de precipitación en el dosel ($0,2 \text{ mm} \cdot \text{IAF}$) (Hirabayashi et al., 2015; Nowak et. al., 2013). El flujo anual sobre las hojas de los árboles se estima como el PM_{2.5} total lavado durante el año más la cantidad restante al final del año.

Como muestra la Figura 2, la remoción de PM_{2.5} (R) sería este flujo total lavado por el área total de la cobertura arbórea.

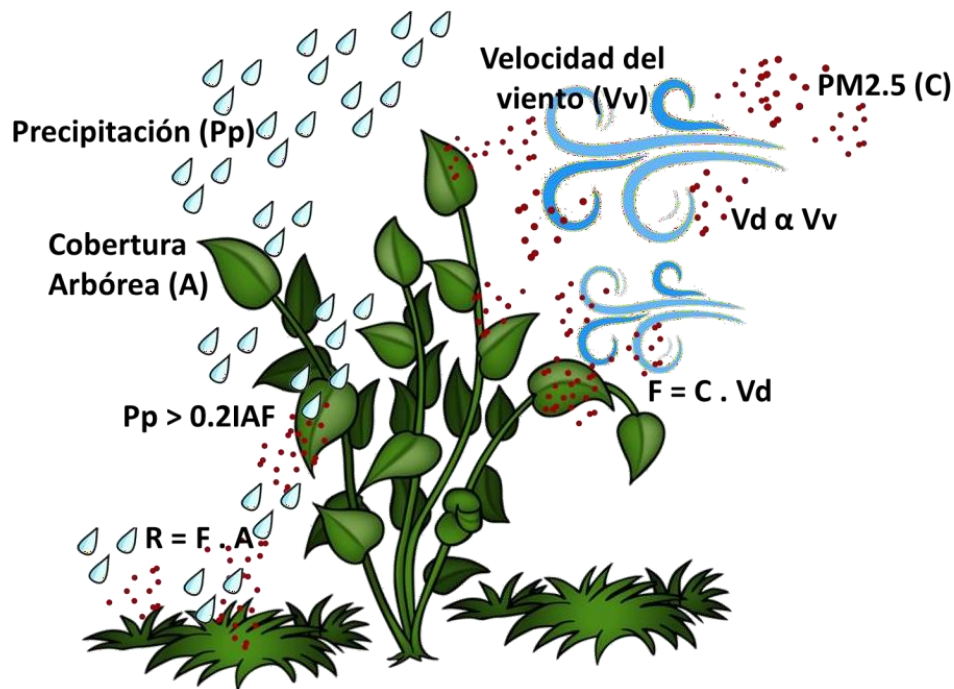


Figura 2. Esquema de la remoción de PM_{2.5} por arbolado urbano. Creado con base en Nowak et al. (2013) y Hirabayashi et al. (2015).

Para estimar el IAF de los árboles, algunos estudios utilizan promedios o bases de datos del IAF (Forest Services U.S., 2017), mientras que otros implementan el IAF 2200 -Plant Canopy Analyzer- (Arroyave et al., 2016). Otra opción es utilizar fotografías aéreas, geomática y modelos para determinar IAF (Cabaraban et al., 2013). Además, el registro histórico de fotografías aéreas y

ortofotos es muy importante para seleccionar las zonas de análisis y su tamaño (Forest Services U.S, 2017).

La plataforma i-Tree Eco está adaptada para las condiciones de Estados Unidos, Australia, Canadá e Inglaterra. Aunque puede usarse para otras regiones, los datos deben ingresarse manualmente (Forest Services U.S., 2017) y los resultados obtenidos son solo representativos de las regiones templadas (Acosta, 2010). El software también puede sobreestimar el cálculo de la eliminación de contaminantes, especialmente en estaciones secas (Morani et. al., 2014). También es importante tener en cuenta la precipitación en el cálculo de la eliminación de material particulado para no sobreestimar los valores (Forest Services U. S., 2017b).

4.3.2 Escenarios de remoción de contaminantes por árboles

Muchos estudios sólo se centran en las condiciones existentes del área de estudio para estimar la eliminación de contaminantes del aire (Bottalico et al., 2017; Selmi et al., 2016), mientras que otros presentan escenarios alternativos de diferentes áreas plantadas para simular eficiencias de eliminación (Jayasooriya et al., 2017).

En Londres, se realizó un estudio para determinar la resiliencia de los bosques urbanos bajo diferentes escenarios futuros, que fueron adaptados de los presentados por el Grupo de Escenarios Globales (Hale et al., 2015). Además de los futuros escenarios de cobertura arbórea, el estudio consideró también las condiciones meteorológicas futuras para determinar los posibles efectos sobre las tasas de remoción (Tallis, et al., 2011).

De acuerdo con Vailshery et. al. (2013), esperamos que las áreas con menos o ninguna área boscosa presenten un aumento en los niveles de contaminación del aire (v.gr., menores tasas de eliminación de la contaminación). Morani y otros (2011) también muestran que la eliminación de contaminantes del aire variará con el tiempo, de acuerdo con los cambios en las cubiertas de los árboles y los ciclos meteorológicos.

5 METODOLOGÍA

5.1 ÁREA DE ESTUDIO

En la Figura 3 presentamos el Valle de Aburrá y los municipios que lo conforman (Medellín, Bello, Itagüí, Envigado, La Estrella, Copacabana, Girardota, Barbosa, Caldas, Sabaneta). Esta es un área metropolitana en crecimiento de aproximadamente 1552 km² y una población cercana a los 3,9 millones (Agudelo-Patiño & Miralles-Garcia, 2015; DANE, 2019).

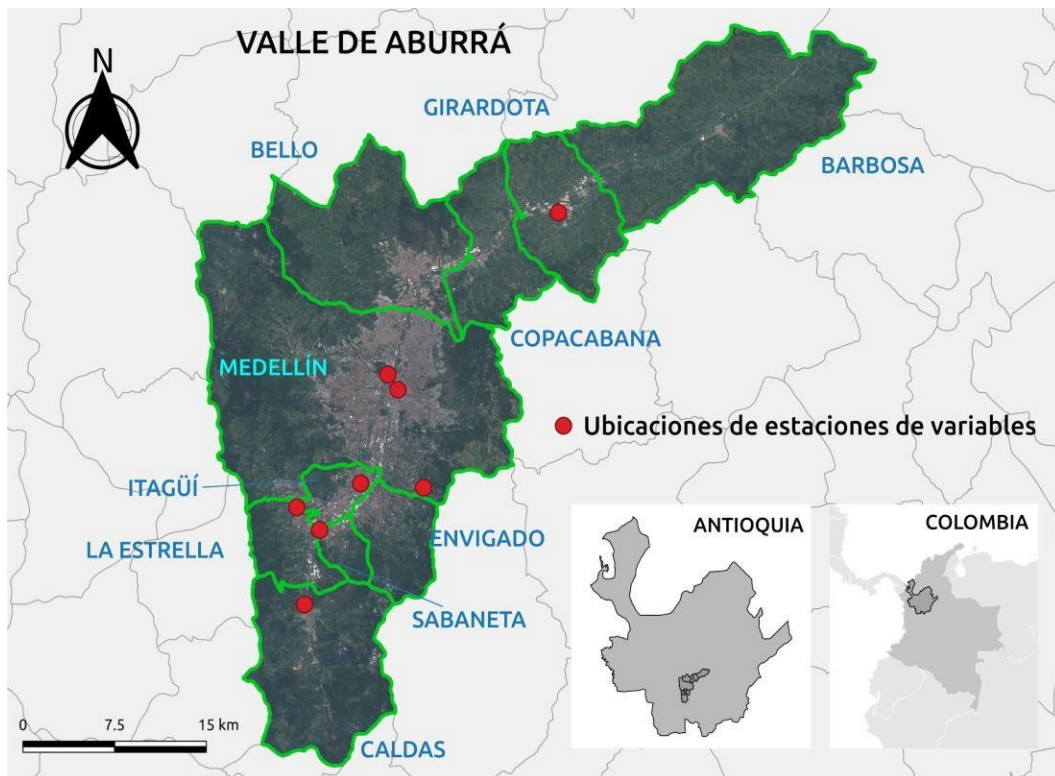


Figura 3. Medellín y los municipios que conforman el Valle de Aburrá. Punto rojo: ubicación de estaciones. Línea verde: delimita los municipios.

5.2 ESTACIONES DE CALIDAD DEL AIRE Y DATOS METEOROLÓGICOS

El Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) nos suministró los registros horarios de PM_{2.5} y meteorológicos de las estaciones descritas en la Tabla 3.

Tabla 3. Estaciones de Monitoreo de Calidad del Aire y Meteorología

Número	Longitud	Latitud	Nombre	Código	Área de Influencia (Ha)
3	-75.45091	6.37904	SOS Aburrá Norte - Girardota	GIR-SOS	265613.25
12	-75.56958	6.25256	Estación Tráfico Centro	MED-MANT	179479.16
25	-75.57700	6.26337	Universidad Nacional de Colombia	MED-UNNV	35378.36
28	-75.59721	6.18567	Casa de Justicia Itagüí	ITA-CJUS	45219.05
31	-75.63863	6.09908	Corporación Lasallista	CAL-LASA	21384.8
38	-75.64436	6.16850	Colegio Concejo de Itagüí	ITA-CONC	62822.54
44	-75.55064	6.18254	Tanques La YE	MED-LAYE	104984.14
48	-75.62749	6.15231	Estación Tráfico Sur	EST-METR	20621.95

Fuente: SIATA (2018)

En la Figura 4 presentamos un mapa con la ubicación de las estaciones en todo el Valle de Aburrá con el área de influencia que le asignamos a cada una, por medio de la técnica de Polígonos de Thiessen.

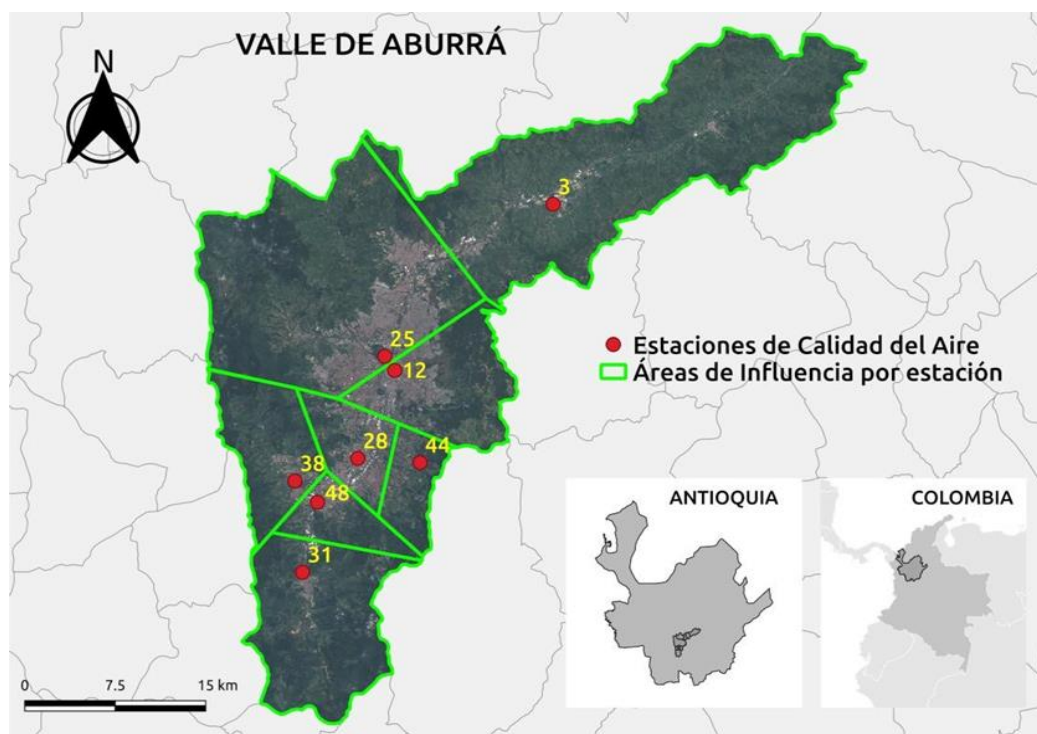


Figura 4. Estaciones de Calidad de aire y área de influencia asignada. Punto rojo: estaciones de calidad del aire. Línea verde: delimita el área de influencia.

Analizamos estadísticamente datos horarios, recogidos durante tres años (2015 - 2017), para identificar tendencias diarias o mensuales de las variables y a partir de esta establecer el escenario actual de base. Por ende, los datos horarios faltantes fueron completados con el método de la media móvil. En el caso de la precipitación utilizamos el método de razones promedio. Los porcentajes reconstruidos de las series de datos de precipitación, PM_{2.5} y velocidad del viento fueron 8,3%, 12,4% y 17,8%, respectivamente.

5.3 CÁLCULO DE LA REMOCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM2.5)

Para realizar el cálculo de la remoción de PM_{2.5} creamos un código en lenguaje Python, como se ejemplifica en el anexo, siguiendo la metodología UFORE presentada por Hirabayashi et al. (2015), en la que el flujo horario de remoción del contaminante por la vegetación se estima con la siguiente ecuación:

$$F = V_{d,PM2.5} \cdot C \quad (1)$$

Donde $V_{d, PM2.5}$ es la velocidad de deposición del contaminante en la superficie de la hoja y C es la concentración del contaminante. La remoción se calcula con la siguiente ecuación:

$$R = F \cdot A \quad (2)$$

Donde R es la remoción de contaminación, F es el flujo contaminante y A es la cobertura arbórea. La remoción la calculamos a nivel horario acumulada para todo el año. En el capítulo 4.3.1 presentamos la metodología de cálculo de remoción de PM_{2.5} completa.

5.4 ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA ARBÓREA Y DEL IAF

Para estimar el IAF, identificamos primero las coberturas arbóreas con imágenes satelitales Sentinel 2A, utilizando la plataforma de Google Earth Engine (GEE) y un código en JavaScript adaptado a la plataforma. Seleccionamos la cobertura arbórea para el año 2017 como base para la estimación del IAF. Dada la dificultad de encontrar imágenes satelitales sin nubosidad, filtramos las imágenes del año con un máximo de 20% de nubosidad, luego extrajimos la nubosidad de las imágenes restantes

y por último promediamos pixel a pixel para todas las imágenes disponibles y calculamos el valor del NDVI. A partir del NDVI calculamos el IAF con la siguiente ecuación, determinada experimentalmente por Mora et al. (2014):

$$IAF = 0,4 + (9,96 \cdot NDVI) \quad (3)$$

Para validar la ubicación de cobertura arbórea y los rangos de valores de IAF a partir del análisis de imágenes satelitales utilizamos el inventario de la siembra y seguimiento forestal que nos proporcionó el Sistema de Árbol Urbano (SAU), que es administrado por la Secretaría de Medio Ambiente de Medellín.

5.5 DISEÑO DE ESCENARIOS

Los escenarios que se plantean son la combinación de proyecciones que establecimos para cada una de las variables que se involucran en la estimación, así:

- Sobre la precipitación media horaria mensual exploramos un porcentaje de aumento o disminución, de acuerdo con los escenarios climáticos presentados por el IDEAM (IDEAM, s.f.)
- Sobre la concentración media horaria mensual de PM2.5 exploramos un porcentaje de aumento o disminución como presentamos en la Tabla 4.
- Sobre la cobertura arbórea exploramos un aumento de acuerdo a las arborizaciones proyectadas por la Alcaldía de Medellín y AMVA, además de un porcentaje de disminución y aumento como presentamos en la Tabla 4.

Definimos un escenario como la proyección de un año resultante de la combinación de las proyecciones para cada variable. En la Tabla 4 presentamos los cambios que tuvimos en cuenta en las variables.

Tabla 4. Proyecciones de cambios en las variables

Cobertura Arbórea	Concentración PM2.5	Precipitación *
±1%	±20% ±50% +100%	±15% ±36% +100%
±50%	-90%	-90%

Los escenarios están clasificados como:

- Condición actual: las variables tienen un comportamiento similar a las estadísticas del período 2015-2017.
- Planificación y programas: la autoridad ambiental y gubernamental ejecuta el POECA, el PIGECA y los programas planteados con el fin de reducir las concentraciones de PM_{2.5}
- Transporte e Industria: no existe control para la industria y transporte, por tanto, hay un aumento en las concentraciones de PM_{2.5}
- Cambios Meteorología: cambios solo en las variables meteorológicas (velocidad del viento y precipitación)
- Extremo: todos los valores de las variables (velocidad del viento, PM_{2.5} y precipitación) se duplican.

Para cada escenario se genera un remuestreo con cien series de tiempo sintéticas para cada variable con respecto a las estadísticas de los años base, para así obtener como resultado cien series de remoción para cada escenario. De acuerdo a la literatura científica, lo adecuado para realizar el remuestreo sería tener en cuenta mínimo 1000 series (Mundelsee, 2010). Sin embargo, luego de realizar pruebas con el modelo corriendo en lenguaje Python llegamos a la conclusión de que implementar las 100 series es igual de representativo que implementar las 1000 series, y así podemos aumentar de la capacidad de cálculo del modelo.

5.5.1 Proyección de las precipitaciones

Las distribuciones Pareto, Exponencial, Beta y Gamma, pueden describir la intensidad de las precipitaciones, además de la distribución lognormal y la de Poisson, esta última la más recomendada para describir la duración de los eventos de lluvia (Dan'azumi, 2010; Acreman, 1990). Después de realizar pruebas con los datos de lluvia horarios para los años disponibles, utilizamos la distribución exponencial para generar la intensidad de la precipitación horaria. Generamos la precipitación por bloques de tres horas, con lo que logramos representar mejor el ciclo horario y la continuidad de lluvia, variando la probabilidad de ocurrencia por cada mes. La media horaria para cada mes es la base para generar cada escenario. Aplicamos a ésta un factor para aumentar o disminuir la media y así obtener diferentes escenarios.

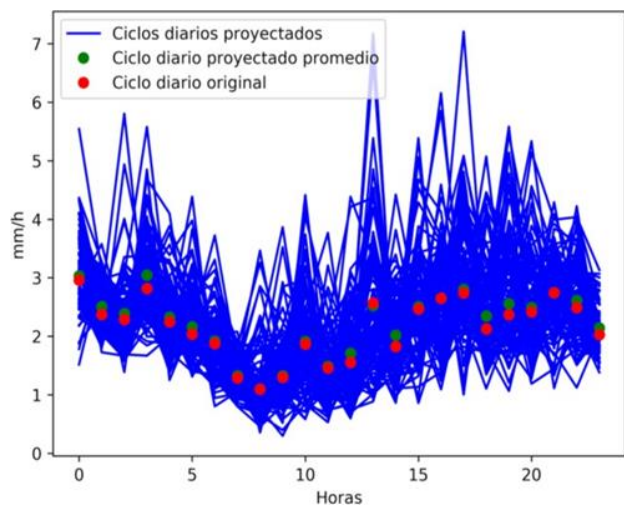


Figura 5. Ciclo diario anual proyectado de la estación 3

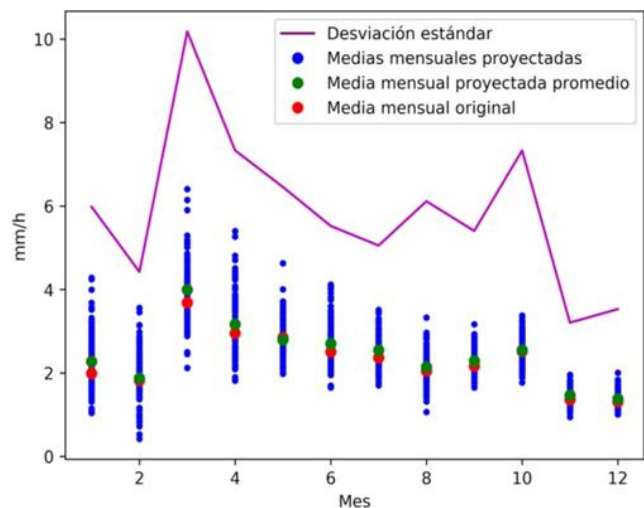


Figura 6. Media horaria del mes proyectada de la estación 3

En la Figura 5 y Figura 6 comparamos como ejemplo el ciclo diario original (excluyendo los ceros) y el promedio horario mensual con el proyectado para la estación 3.

Para verificar las proyecciones realizadas, comparamos el ciclo diario anual, el promedio horario de precipitación por mes, el promedio de la distancia en horas del evento de lluvia por mes y el promedio de la distancia en horas entre la ocurrencia de los eventos por mes del escenario generado a partir

de las estadísticas de los años base con las observadas. En la Figura 7 y la Figura 8 comparamos las proyecciones de la precipitación para la estación 3. Las comparaciones de las proyecciones para las demás estaciones las incluimos en los anexos.

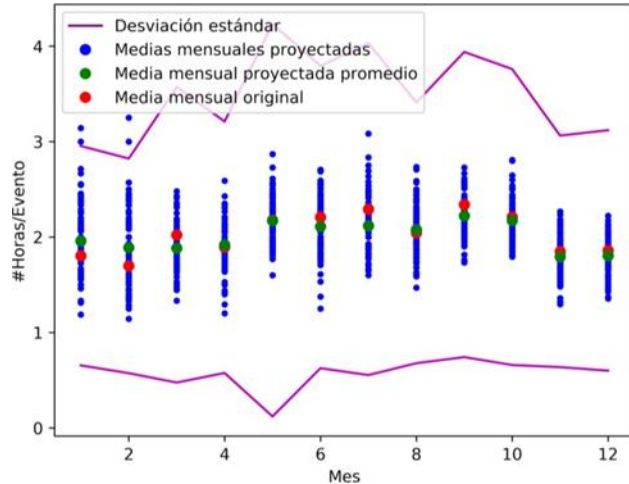


Figura 7. Media de duración de eventos proyectados por mes

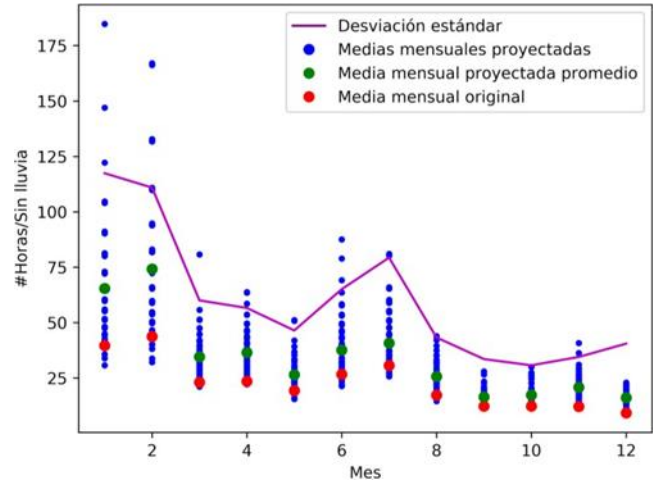


Figura 8. Distancia media entre eventos proyectados por mes

5.5.2 Proyección de la concentración del contaminante PM_{2.5} y velocidad del viento

Proyectamos las concentraciones de PM_{2.5} y las velocidades del viento usando un modelo de media móvil de primer orden. Comparamos las estadísticas de las cien series aleatorias con las de los años disponibles con el fin de validar las proyecciones. De igual forma que la precipitación, la media horaria mensual es la base para generar cada proyección, con un peso que se ajusta de acuerdo con la disminución o el aumento esperado. En la Figura 9 presentamos la comparación del ciclo diario de velocidades de viento para la estación 3 con los ciclos diarios de las proyecciones realizadas.

En la Figura 10 presentamos la comparación del ciclo mensual original con los ciclos mensuales de las series proyectadas de las concentraciones horarias de PM_{2.5} para la estación 3. En los anexos incluimos las demás gráficas de comparación para la variable PM_{2.5} y para la velocidad del viento.

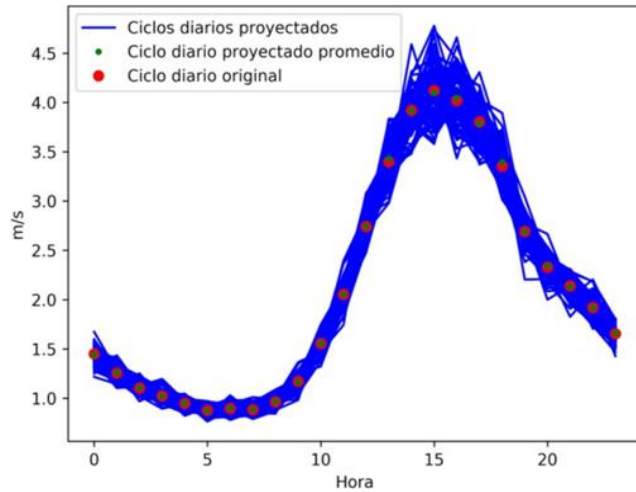


Figura 9. Ciclo diario anual proyectado de velocidades de viento en la estación 3

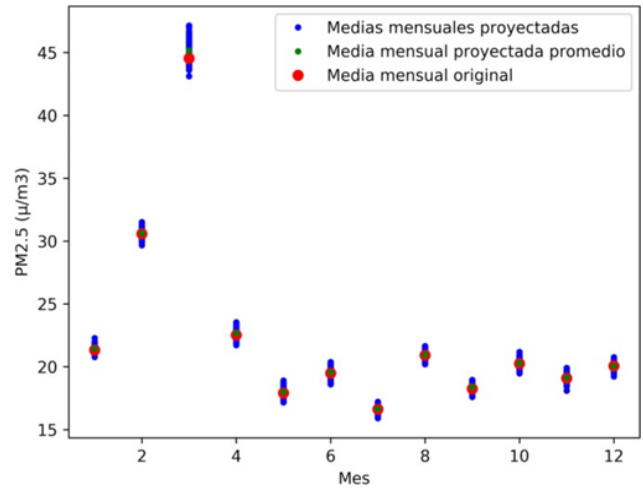


Figura 10. Ciclo mensual proyectado de PM_{2.5} en la estación 3

5.5.3 Proyección de la cobertura arbórea

En la Tabla 4 presentamos los aumentos de cobertura arbórea que aplicamos para cada escenario.

En el mapa de la Figura 11 presentamos los escenarios de arborización localizados espacialmente.

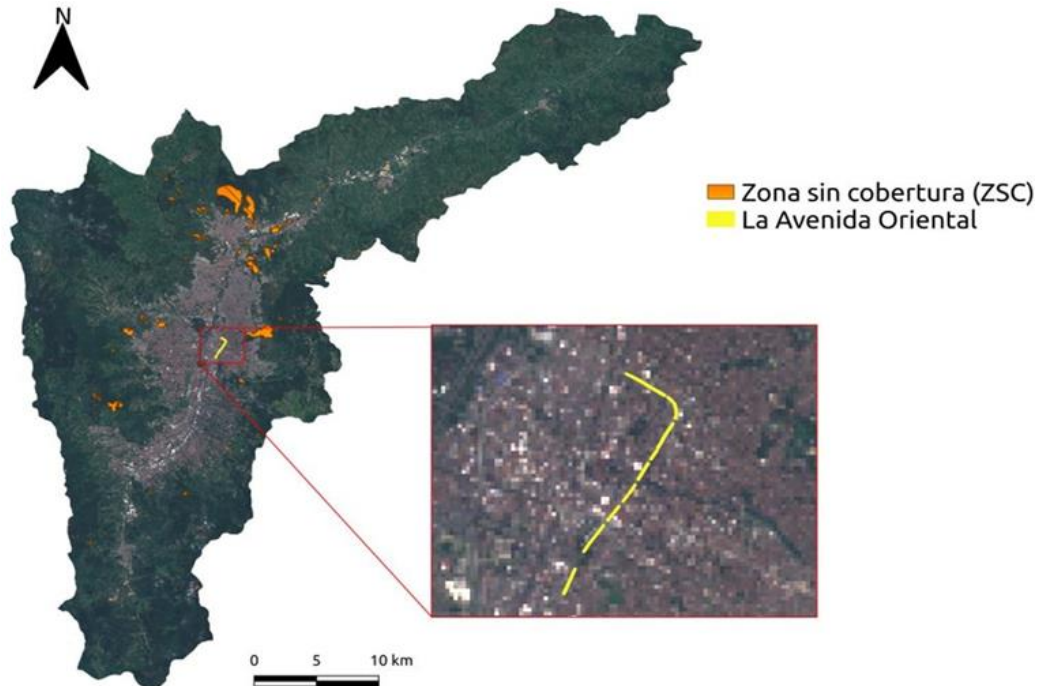


Figura 11. Mapa con las coberturas arbóreas a agregar a la actual

La Alcaldía de Medellín proyectó el arbolado ubicado en la avenida oriental en el año 2017 y en el 2019 la arborización ya está finalizada. El arbolado que establecemos como cobertura arbórea actual es la presente durante el año 2017. También realizamos un diagnóstico en campo donde localizamos zonas sin arborizar alrededor del área urbanizada en el año 2018 (ZSC).

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES

Las proyecciones de los datos fueron validadas estadísticamente. Para ello, identificamos ciclos diarios, mensuales y anuales. En la Figura 12 y la Figura 13 comparamos espacialmente los ciclos diarios y promedios mensuales de las variables meteorológicas, normalizados entre 0 y 1 para propósitos de comparación entre series.

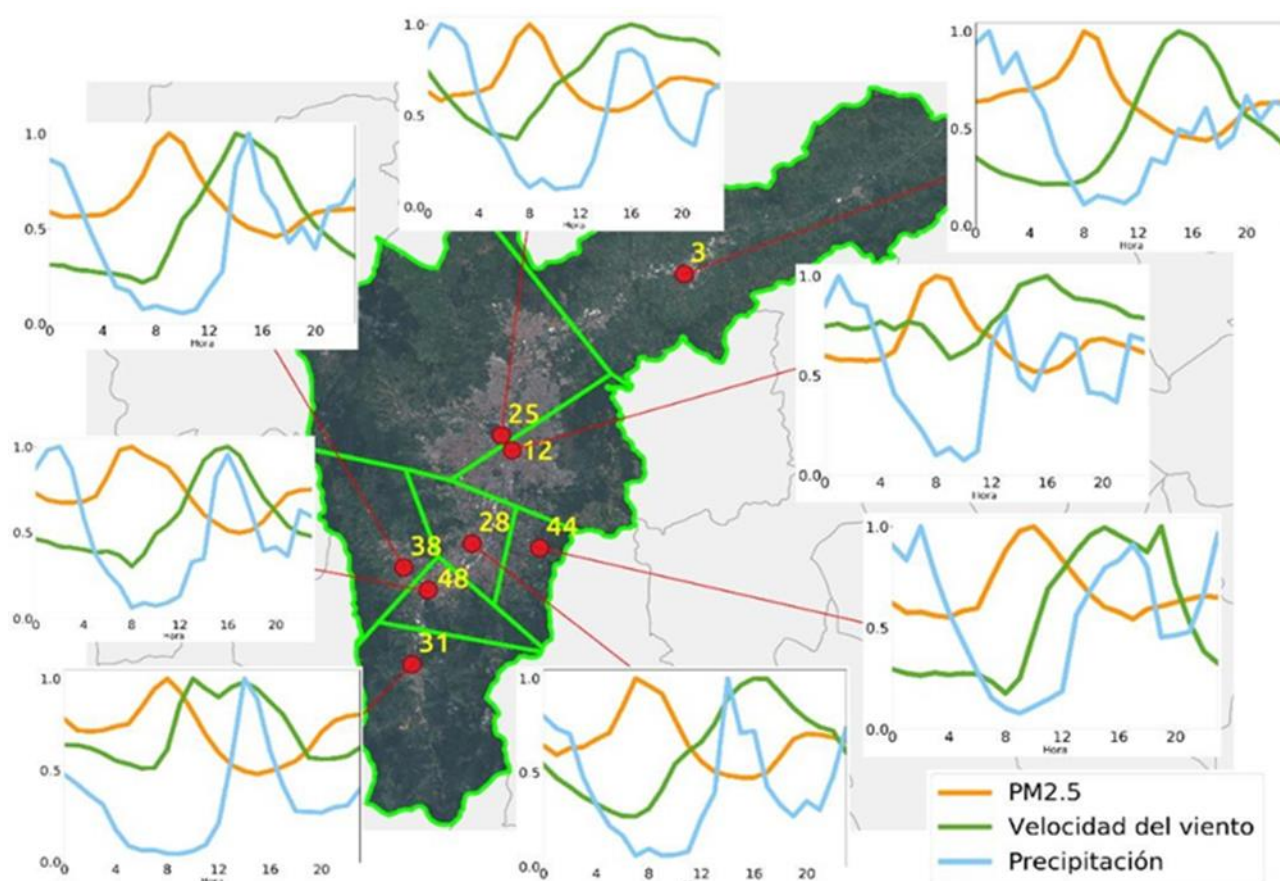


Figura 12. Distribución espacial del ciclo diario normalizado de las variables PM2.5, precipitación y velocidad del viento

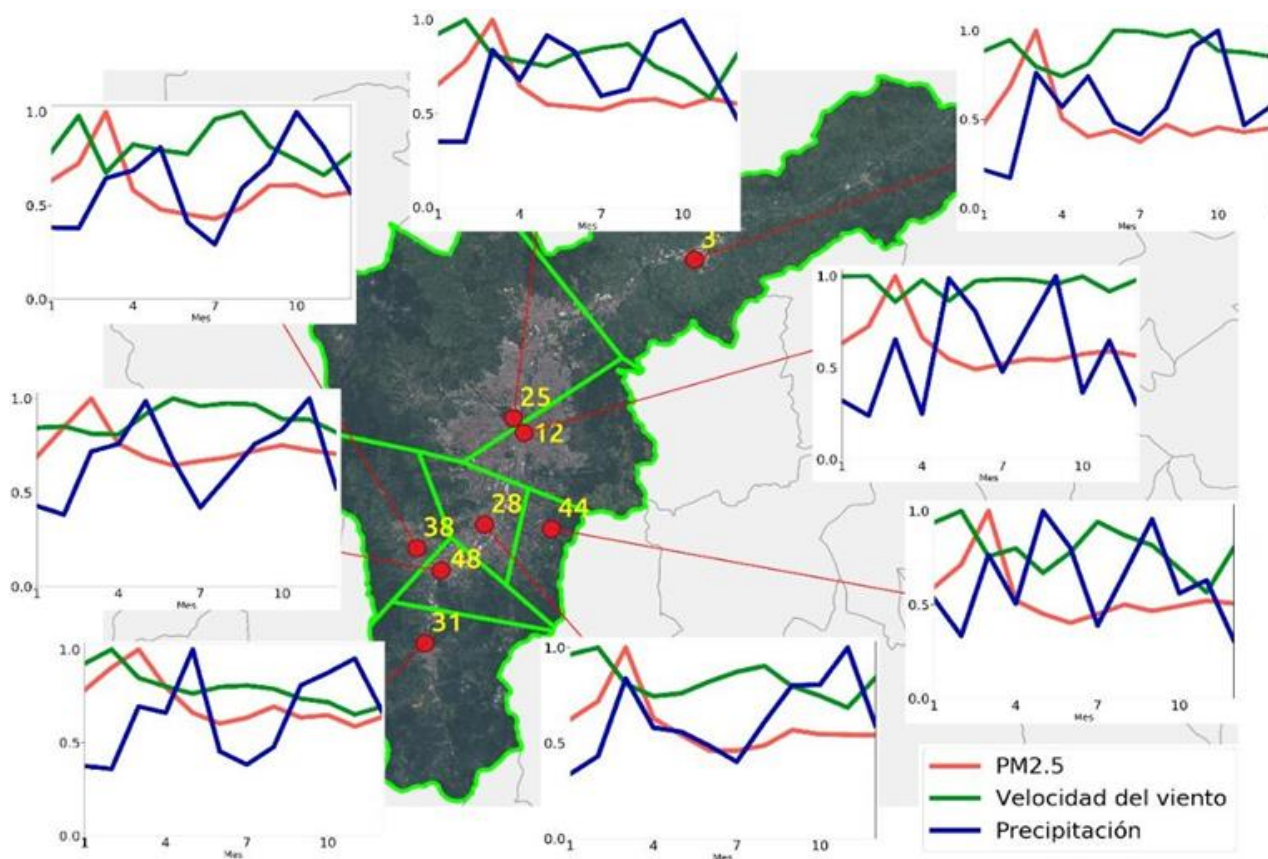


Figura 13. Distribución espacial del promedio horario mensual normalizado de las variables PM2.5, precipitación y velocidad del viento en el Valle

6.1.1 Precipitación

El ciclo anual y el ciclo diario de precipitación es consistente con lo que se presenta en el trabajo de Bedoya-Soto et al. (2019) sobre las precipitaciones en el Valle de Aburrá. Los períodos de mayor precipitación ocurren entre marzo y mayo (M-A-M) y entre septiembre y octubre (S-O); por otro lado, los períodos con menos lluvia ocurren entre diciembre y febrero (D-E-F) y entre junio y agosto (J-J-A) (Figura 13). En el caso del ciclo diario promedio anual, se evidencia un ciclo diurno bimodal con dos máximos de precipitación durante la tarde, entre las 15:00 y las 17:00, y en la media noche y horas tempranas, entre las 23:00 y las 02:00, incluso hasta las 04:00 en algunos casos (Figura 12).

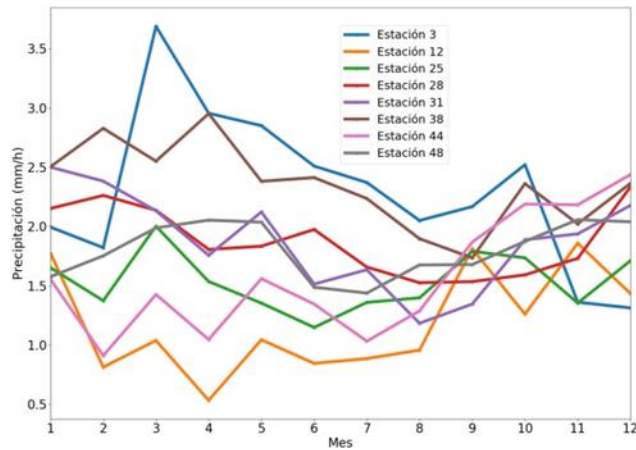


Figura 14. Media horaria mensual de la precipitación (mm/h)

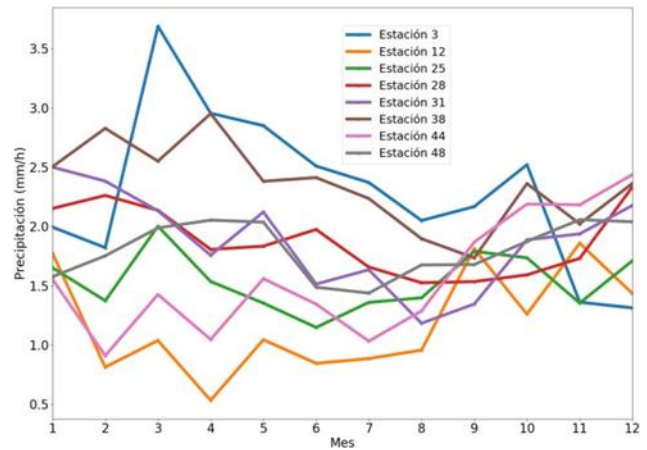


Figura 15. Ciclo diario promedio de la precipitación (mm/h)

El valor mínimo de precipitación entre los datos de las estaciones es 0.1 mm, lo cual tuvimos en cuenta en el momento estimar los datos faltantes en las series y proyectar los escenarios. La precipitación en el Valle de Aburrá, dada la topografía del lugar, varía como evidencia la comparación de los ciclos diarios anuales (Figura 12) y las medias mensuales (Figura 13) de las estaciones. No obstante, los ciclos bimodales anuales y los ciclos diarios son consistentes a través del Valle. A nivel mensual (Figura 14), las estaciones 3 y 38 son las más lluviosas durante el año. Estas estaciones están ubicadas hacia el sureste y hacia el sur en el municipio de Itagüí Medellín, respectivamente.

El énfasis de este trabajo es la modelación de la remoción de PM2.5. El cálculo de este valor es a nivel horario, por tanto, la cantidad de precipitación horaria lo afecta directamente. Por ende, representar el ciclo diario de precipitaciones es muy importante. De igual forma las concentraciones de PM2.5 también presentan un ciclo diario, como podemos observar en el mapa de la Figura 15. Mantener la coherencia de estos ciclos en las simulaciones de los escenarios es importante para estimar valores realistas de remoción horaria.

6.1.2 Concentraciones de PM2.5

Las concentraciones de PM2.5 (Figura 13) presentan dos períodos de mayores niveles de contaminación durante el año, entre marzo y abril (M-A) y entre septiembre y octubre (S-O).

Normalmente el período de M-A tiene la peor calidad del aire. En estos dos períodos, las autoridades ambientales del Valle han declarado contingencia ambiental, con alertas rojas por contaminación atmosférica (AMVA, 2017).

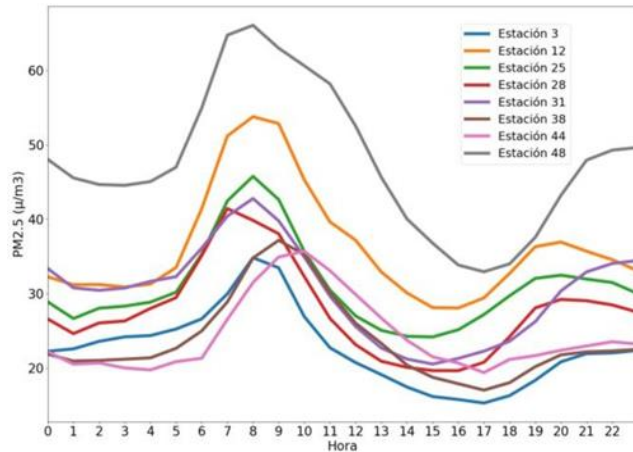


Figura 16. Ciclo diario promedio de las concentraciones horarias de $PM_{2.5}$

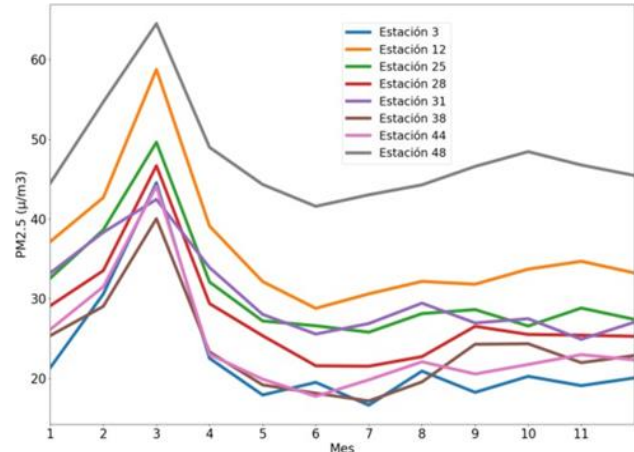


Figura 17. Concentraciones horarias de $PM_{2.5}$ promedio mensuales

La Figura 16 evidencia que hay picos de contaminación por $PM_{2.5}$ en la mañana que inician a las 07:00 y descienden alrededor de las 10:00, cuando la temperatura empieza a aumentar y la contaminación a dispersarse desde el Valle. En la tarde, el pico inicia alrededor de las 18:00. Es decir, los picos ocurren en los horarios donde hay más tráfico vehicular, dado que son los horarios en los que generalmente la población se dirige hacia y desde sus actividades diarias como el colegio, el trabajo, la universidad, entre otros.

Como se muestra en las Figura 17 y Figura 18, la estación 48 ubicada al sur del Valle en el municipio de Itagüí es la que tiene mayores concentraciones de $PM_{2.5}$, seguida de la estación 12 que se encuentra al oriente de la ciudad de Medellín. Basados en la Figura 18, podemos decir que el año 2017 tiene menores concentraciones horarias de $PM_{2.5}$ entre las estaciones seleccionadas, mientras que las concentraciones del año 2016 son levemente mayores que las del año 2015.

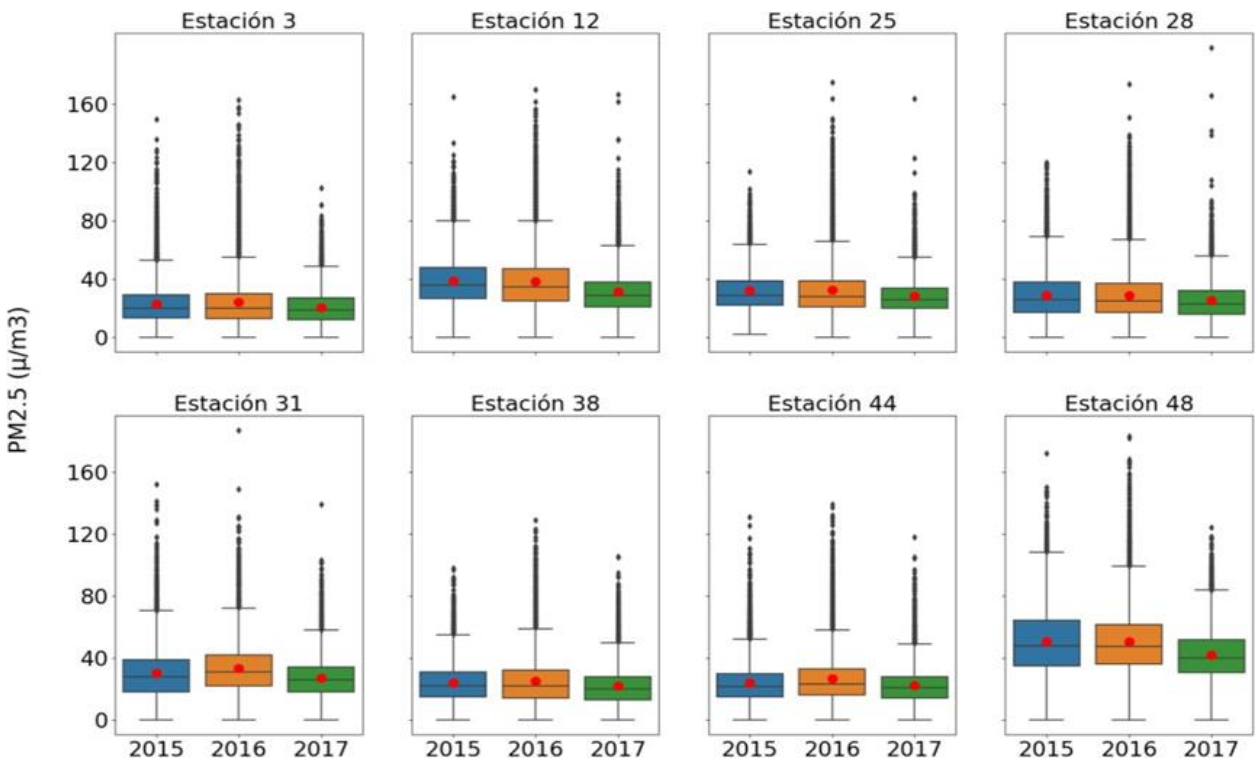


Figura 18. Concentraciones horarias de $PM_{2.5}$ para todas las estaciones seleccionadas.

6.1.3 Velocidad del viento

Cuando observamos el comportamiento de las variables vemos que tienen ciclos bimodales marcados durante el día. La velocidad del viento tiene sus máximos alrededor de la 00:00 horas y el más alto alrededor de las 15:00 horas (Figura 12). Las velocidades de viento afectan directamente al modelo, ya que de éstas depende la velocidad de deposición del material particulado. Por ende, es importante representar adecuadamente este ciclo diario en los escenarios.

Durante el año las velocidades horarias de viento son mayores alrededor del mes de agosto, que históricamente en Colombia tiene los días con mayor velocidad de viento, y alrededor de febrero, que es uno de los meses más secos (ver la Figura 13). El régimen de vientos de Colombia es particular, su variabilidad está influenciada por el movimiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), definida por el encuentro de los vientos alisios, desde el sureste y desde el noreste. Sin embargo, estas direcciones cambian, en menor medida, por la acción de la fuerza de

Coriolis (por estar cerca al Ecuador) y, en mayor medida, por la orografía. Por ende, los fenómenos climáticos locales dependen de las condiciones del terreno (Agudelo, 2013 & Hastenrath, 1991).

Como se observa en las Figura 19 y Figura 20, la estación 3, que se ubica al norte del Valle de Aburrá, tiene mayores velocidades de viento y la mayor variación de los valores horarios entre los meses, seguida por las estaciones 25 (hacia el centro del Valle) y 31 (hacia el sur del Valle). Este gradiente espacial de vientos en parte puede explicar que las concentraciones de $PM_{2.5}$ aumentan hacia el sur.

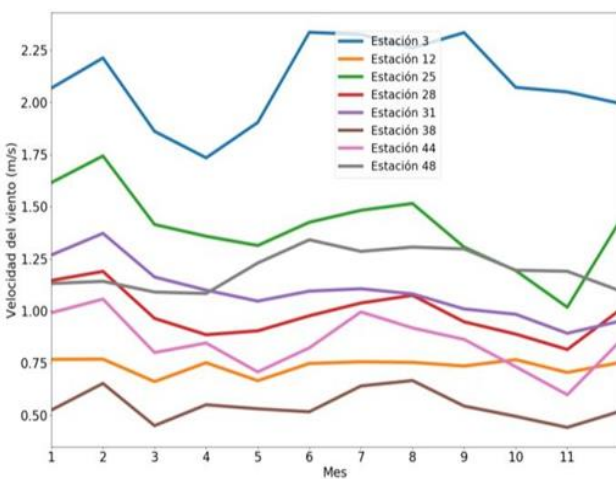


Figura 19. Velocidad horaria media mensual para todas las estaciones seleccionadas

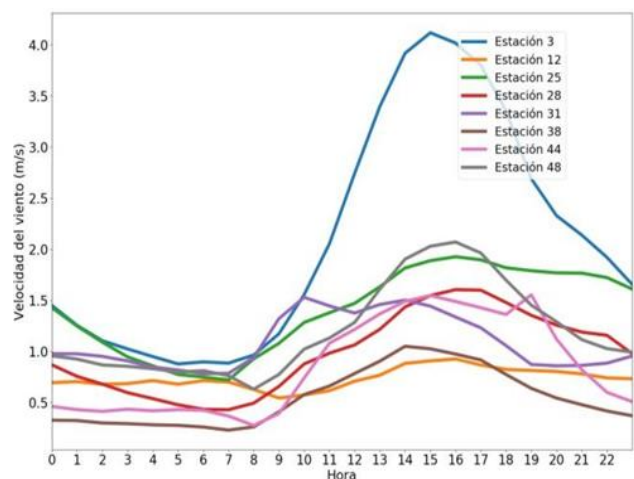


Figura 20. Ciclo diario anual para todas las estaciones seleccionadas

La distribución de la velocidad del viento entre los últimos tres años es variable, además entre estaciones el comportamiento es muy diferente (Figura 21). El año 2017 tiene menores velocidades del viento entre las estaciones seleccionadas. Los valores del año 2016 son levemente mayores que los del año 2015. En la estación 31, la velocidad del viento varía mucho entre años y se reduce para el año 2017. En la estación 25 ocurre algo similar. Así mismo, la estación 3 tiene una alta variación, pero tiende a la reducción en el año 2017. En las otras estaciones la variación es estable entre los años y hay una leve reducción para el año 2017.

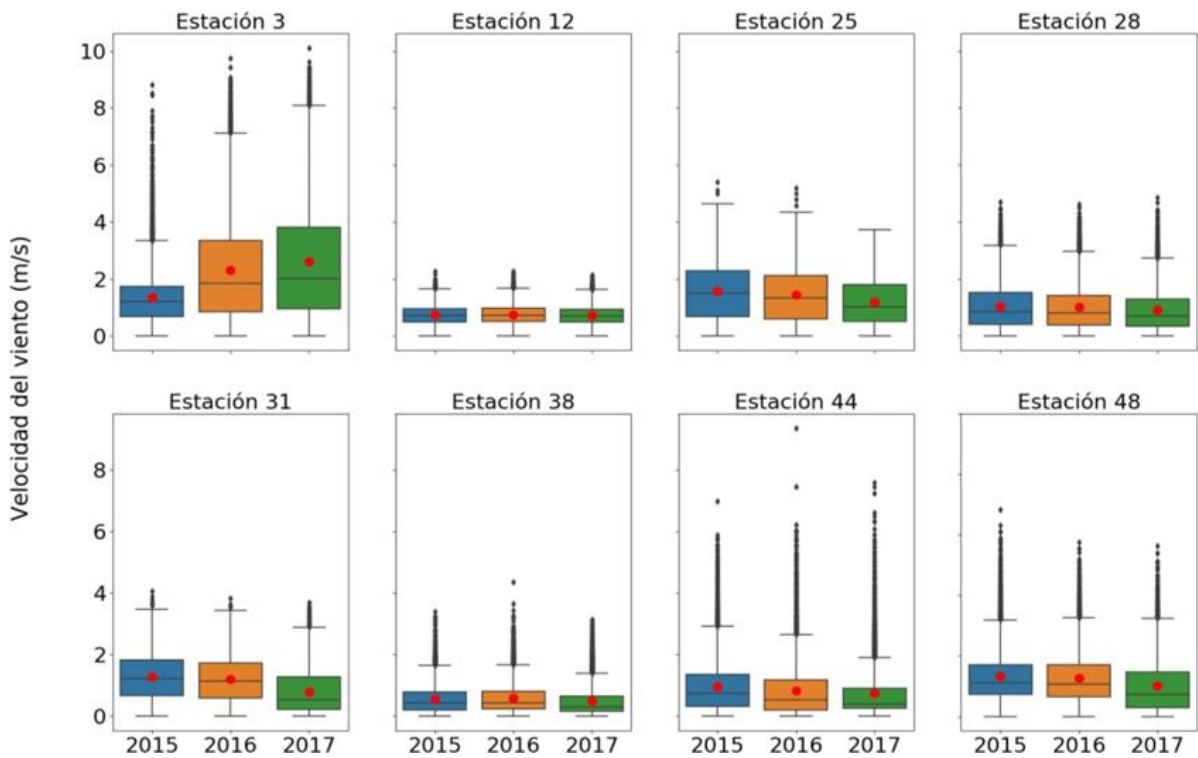


Figura 21. Velocidad horaria media mensual para todas las estaciones seleccionadas

6.1.4 Cobertura arbórea y valores de IAF

La Figura 22 muestra los valores medios de IAF que obtuvimos en todo el Valle para el año 2017. Verificamos que los IAF tuvieron un valor mayor que 4 en las zonas con ubicación conocida de árboles adultos (Bonan, 2016; Kricher, 2011), así mismo localizamos las áreas arbóreas que tuvimos en cuenta para correr el modelo. Clasificamos los valores de IAF de forma que pudiéramos asignarles un valor discreto a ciertas áreas de cobertura arbórea, con el fin de hacer más eficiente el cálculo de la remoción.

De acuerdo con los resultados, el valor máximo de IAF en el Valle es nueve (9) y la cobertura total de árboles es 99128.04 ha. En la Tabla 5 presentamos cuántas hectáreas de cobertura arbórea asignamos a cada estación por medio de la metodología de los polígonos de Thiessen. Así mismo, separamos por valor del IAF y podemos observar que los IAF de 8 y 7 son los que predominan sobre el arbolado urbano en el Valle, lo que coincide con árboles tropicales (Kricher, 2011).

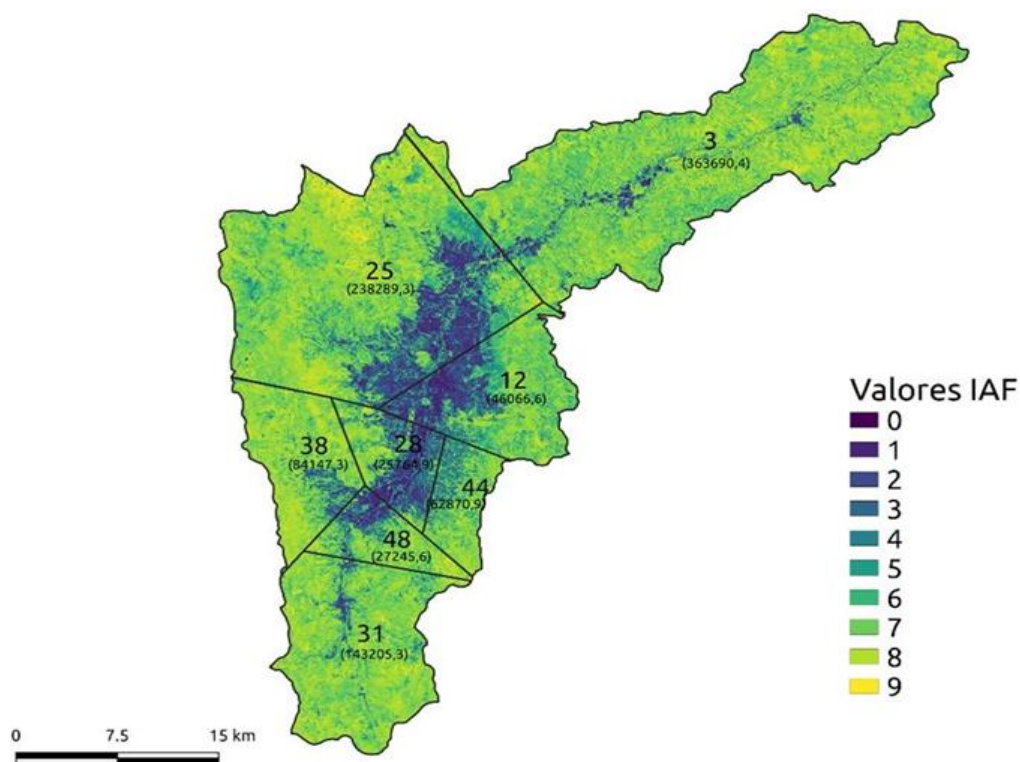


Figura 22. Valores de IAF para el Valle de Aburrá y áreas arborizadas (ha) según polígonos de Thiessen por estación de medición.

Tabla 5. Área de cobertura arbórea (ha) por índice de área foliar y estaciones en el Valle de Aburrá

Estación	4	5	6	7	8	9	Total
3	466.92	1482.39	4861.04	16241.77	13158.89	158.02	36369.04
25	704.71	1609.18	3389.93	9877.77	7960.31	287.02	23828.93
12	222.23	498.62	1032.94	2169.30	683.31	0.25	4606.66
44	232.08	535.55	1090.63	2865.35	1552.87	10.62	6287.09
28	210.95	339.22	438.62	987.98	599.56	0.15	2576.49
38	106.41	250.25	664.22	3842.76	3544.62	6.46	8414.73
31	146.32	420.19	1439.60	7402.37	4901.96	10.10	14320.53
48	100.70	193.74	418.73	1328.17	682.93	0.30	2724.56
Total	2190.33	5329.16	13335.72	44715.47	33084.45	472.92	99128.04

6.2 PRUEBAS PRELIMINARES DEL MODELO Y VALIDACIÓN

Realizamos cálculos preliminares de la remoción para validar los resultados proporcionados por el modelo que corremos en lenguaje Python. De acuerdo con la investigación de Arroyave et al. (2019), el valor de remoción de $PM_{2.5}$ fue de 32.1 ton para el año 2015 (su estudio se plantea con la cobertura arbórea del año 2015, los datos meteorológicos y de calidad del aire del año 2014 y utiliza sólo dos estaciones ubicadas en el centro y norte del Valle). Por tanto, en la prueba incluimos los años 2014 y 2015, usando diferentes cantidades de estaciones como se observa en la Figura 23. También realizamos el cálculo de la remoción para los años 2016 y 2017.

De acuerdo con los resultados, para el año 2015 la remoción calculada con dos estaciones es de 32.05 ton/año, valor muy cercano a la investigación previa de Arroyave et al. (2019). Cuando consideramos las ocho estaciones en los cálculos, vemos que la remoción desciende a 20.45 ton/año. Para el año 2017, la remoción calculada con dos estaciones es de 27.87 ton/año y cuando incluimos las ocho estaciones es de 22.86 ton/año. Es decir que el número de estaciones afecta el resultado de la remoción y valida la necesidad de un modelo distribuido.

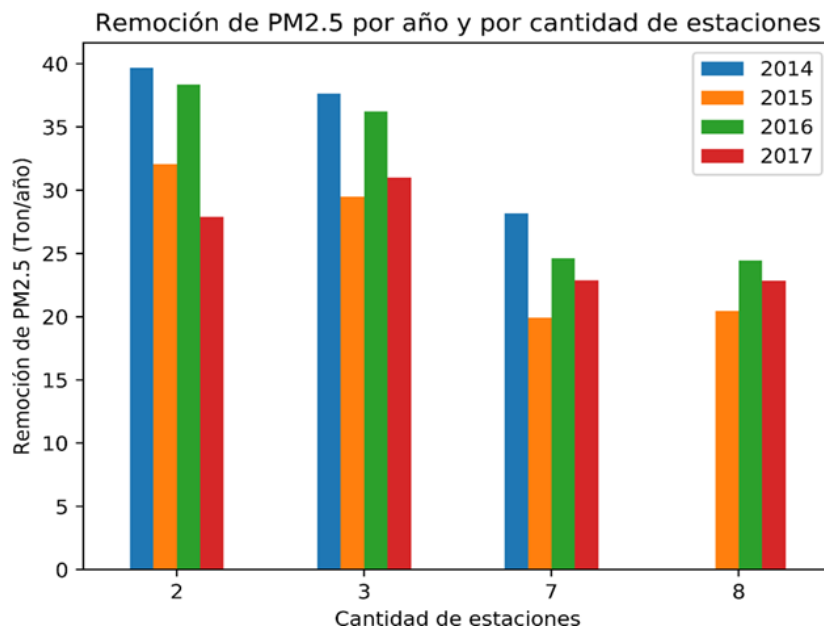


Figura 23. Remoción de $PM_{2.5}$ anual para diferentes años y cantidad de estaciones

Para nuestras estimaciones, procuramos que las estaciones escogidas estuvieran bien distribuidas sobre el Valle (Figura 24). En general, podemos observar que un mayor número de estaciones mejora la representación de la distribución de las variables en el Valle, disminuyendo el valor de la remoción. Por ende, es probable que mientras menos estaciones tengamos en cuenta, el valor total de remoción se sobreestime. Comparando entre los años, las mayores remociones ocurrieron en 2014 y 2016, lo cual coincide con las mayores concentraciones promedio anuales de $PM_{2.5}$ para estos años.

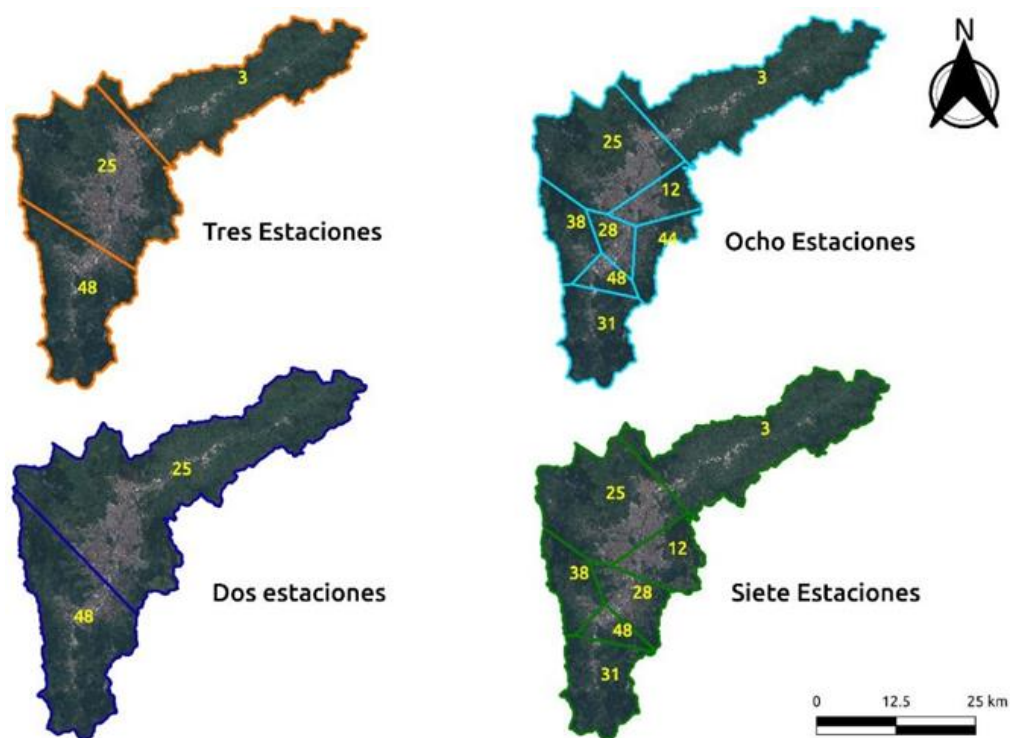


Figura 24. Áreas aferentes para cálculo de la remoción anual de $PM_{2.5}$ en función del número de estaciones.

Entre considerar siete u ocho estaciones para el cálculo de remoción, no hay una diferencia significativa entre los resultados. Sin embargo, con ocho estaciones hay un pequeño aumento en la remoción con respecto a considerar siete estaciones, lo cual puede deberse a la variación que existe en las variables que tienen las estaciones 28, 48, 12 y 44, las cuales cambian su distribución dentro de los polígonos, ya que con la inclusión de la estación 44, ésta obtiene una mayor cobertura arbórea asignada comparada con las colindantes, que tienen valores promedios de contaminación similares.

Es decir que, la variación de la cantidad de estaciones modifica la distribución de las coberturas arbóreas asociadas a cada polígono y estación, lo que afecta el cálculo de la remoción total.

Si consideramos diferentes cantidades de estaciones, la distribución de coberturas y promedios espaciales de las variables cambiarán. Por ejemplo, la ocurrencia y cantidad de precipitación cambian considerablemente entre el sur, centro y norte del Valle. Por consiguiente, si asignamos un gran polígono a una sola estación del sur (donde la ocurrencia y cantidad de lluvia es mayor) y no incluimos una estación en el norte (donde la zona es menos lluviosa) generamos datos de remoción poco realistas. En consecuencia, la sola diferenciación de la lluvia cambia los valores de remoción a lo largo del Valle. Lo mismo ocurre con los niveles de $PM_{2.5}$, ya que las concentraciones de la estación del sur (48) son mucho más altas que las concentraciones de las estaciones que se encuentran más cercanas al norte. Entonces tendríamos una consideración errónea de la distribución de la contaminación. Resumiendo, tener más estaciones adecuadamente espaciadas nos da una representación más realista de las variables meteorológicas locales involucradas en el cálculo, especialmente cuando se utilizan métodos de ponderación por área aferente como el de los polígonos de Thiessen.

6.3 REMOCIÓN DE $PM_{2.5}$ EN MEDELLÍN Y EL VALLE DE ABURRÁ

En la Tabla 6 presentamos los resultados de la estimación del modelo UFORE para diferentes condiciones de cobertura arbórea.

Primero calculamos la remoción de $PM_{2.5}$ para los niveles de contaminación y cobertura arbórea con el IAF de base del año 2017 (la remoción anual fue 23.636 ton). En el valle se tiene un inventario de emisiones actualizado para el 2016, donde se indica que el valor total de emisiones de $PM_{2.5}$ es de 1816.1 ton/año (AMVA & UPB, 2017; AMVA & UPB, 2018). Asumiendo que los valores se conservan para 2017, el porcentaje de remoción sería del 1.30%, lo cual concuerda con resultados previos, donde la remoción de $PM_{2.5}$ corresponde a porcentajes muy bajos (Selmi et al. 2016).

Tabla 6. Remoción de material particulado en diferentes condiciones

Condición	R (ton/año) ^a	% R ^b	% AR ^c	% A Ar ^d
Base (2017)	23.636	1.301	0.000	0.000
Inicial + 1%	23.872	1.314	0.997	1.000
Inicial + 1% ZC	24.031	1.323	1.671	1.000
Inicial + Oriental	23.637	1.302	0.001	0.002
Inicial + ZSC	23.815	1.311	0.756	0.849
Inicial + ZSC (8)	23.799	1.310	0.690	0.849
				% R Ar ^e
Inicial con IAF 8	19.886	1.095	-15.866	33.375
Inicial con IAF 4	45.725	2.518	93.452	2.210

^a Remoción de PM_{2.5}. ^b Porcentaje de remoción con respecto a la emisión total anual. ^c Porcentaje que aumenta la remoción con respecto a la inicial. ^d Porcentaje en que aumenta cobertura arbórea respecto a la inicial. ^e Porcentaje que representa el IAF inicialmente en la cobertura arbórea.

Cuando aumentamos el área total arborizada en un 1% de forma proporcional sobre los valores de IAF del área metropolitana, la remoción aumenta a 23.87 ton, es decir un incremento del 1% con respecto a la remoción inicial. Por otro lado, cuando localizamos ese 1% de aumento de cobertura arbórea en las zonas de mayor concentración del contaminante, la remoción total es de 24.03 ton, que representa un aumento de 1.67% en la remoción inicial.

A partir de los avances que se han dado de las siembras de árboles en el Valle, se ha determinado que en el área urbana no hay espacios suficientes, por tanto, la mayoría de siembras se han dado en la zona rural y alrededor del Valle (AMVA, 2018b; Benincore, 2018). Un ejemplo de arborización reciente fue el de la avenida Oriental en Medellín (Figura 11) en 2018. Esta arborización, que representa un 0.002% de aumento en el área arbórea, ha tenido cierto impacto en el imaginario de los ciudadanos, aunque la remoción adicional que genera esta zona sería sólo de 236.737 gramos, si está completamente arborizada y con un IAF óptimo de ocho (8), que es el valor máximo más común para los árboles existentes de acuerdo con lo analizado en la base de datos de la SAU (Secretaría de Medio Ambiente, 2018), lo que representa un aumento de 0.001% sobre la remoción inicial. Esta remoción representa el 0.03% de la remoción total realizada por el arbolado en el área de la estación 12.

Dado lo anterior, localizamos zonas alrededor del área urbanizada (ZSC) que posiblemente se pudieran arborizar (Figura 11), lo que representa un aumento del 0.85% del área arbórea inicial. Primero, aumentamos la arborización en estas zonas con un IAF proporcional a los que existen en 2017, dando como resultado una remoción de 23.81 ton/año. Luego, aumentamos esta arborización con un IAF de ocho (8), dando como resultado una remoción 23.80 ton/año.

Por otro lado, proyectamos que todas las zonas con arbolado urbano del año 2017 tuvieran un IAF máximo de ocho (8) o que fueran árboles que pudieran alcanzarlo (p.ej., *Bauhinia picta*, *Terminalia catappa*), con el fin de determinar el efecto de la densidad de vegetación. En este caso, la remoción sería de 19.89 ton, lo que representa una disminución de alrededor de un 15.87% sobre la remoción base. También proyectamos que todas las zonas tuvieran árboles con un IAF de cuatro (4) (p.ej., *Erythrina fusca*). En este caso la remoción aumentó a 42.72 ton, lo que representa un aumento de 93.45% sobre la remoción base.

Normalmente, esperaríamos que el aumento de la densidad del arbolado aumentaría la remoción de $PM_{2.5}$, sin embargo, ocurre lo contrario. Podríamos explicar esto analizando el modelo, ya que este calcula la remoción en función del lavado que produce la lluvia por encima de un umbral en función del IAF; así mismo, la resuspensión depende del viento sobre las hojas, por tanto, las especies de alto valor de IAF (óptimo de 8) en la cobertura arbórea no serían tan efectivas como las del IAF en la condición actual, mientras que un IAF más bajo (mínimo de 4) si representaría un aumento. No obstante, el modelo no tiene en cuenta las características de las hojas (ya que algunas tienen vellosidades y/o ceras que pueden afectar la resuspensión y acumulación de partículas), ni considera una capacidad máxima de almacenamiento de $PM_{2.5}$ en las hojas.

Al calcular la remoción de $PM_{2.5}$ para la zona urbana del municipio de Medellín obtuvimos un valor de 3,02 toneladas. Cuando aumentamos el área arbórea de Medellín en 1%, la remoción aumenta en 1,3%. Si localizamos el aumento en una zona con mayor contaminación, la remoción aumenta en un 2% con respecto al valor inicial.

6.4 REMOCIÓN EN LOS DIFERENTES ESCENARIOS PROYECTADOS

En la Tabla 7 presentamos la descripción de todos los escenarios. En la Figura 25 presentamos la variación de la remoción entre los 24 escenarios que se evaluaron y en la Figura 26 presentamos el porcentaje de remoción relativo a las emisiones anuales.

Tabla 7. Escenarios planteados para el cálculo de remoción de PM_{2.5}

Escenario	C. Arbórea (factor)	PM _{2.5} (factor)	Viento (factor)	Lluvia (factor)	Clasificación
E0 ^a	1	1	1	1	Sin cambios
E1	1	0.5	1	1	Planes y programas
E2	ZDA ^b	0.5	1	1	
E3	1.1	0.8	1	1.36	
E4	ZDA	1	1	1.36	
E5	1.5	1	1	1	
E6	ZDA	1	1	1	
E7	ZDA	1.2	0.8	0.64	Transporte e Industria
E8	1.5	1.2	1	1.15	
E9	ZDA	1.5	1	1	
E10	1	1.5	1.5	1	
E11	1	1.5	1	1	
E12	1	1.2	1	1.15	
E13	0.5	1	1	1	
E14	1	2	1	1	
E15	0.5	1.5	1.2	0.85	
E16	0.5	2	0.5	0.1	
E17	1	2	1	0.1	
E18	1	1	1	1.36	Cambios Meteorología
E19	1	1	1	0.1	
E20	1	1	1	2	
E21	1	1	1.5	1	
E22	1	1	0.5	1	
E23	1	1	1	0.6	
E24	1.1	2	2	2	Extremo

^a Escenario con estadísticas actuales (sobre 3 años: 2015-2017). ^b Cobertura arbórea en el 2017. ^c Zona Disponible para Arborizar (ZSC + Oriental, ver 5.5.3).

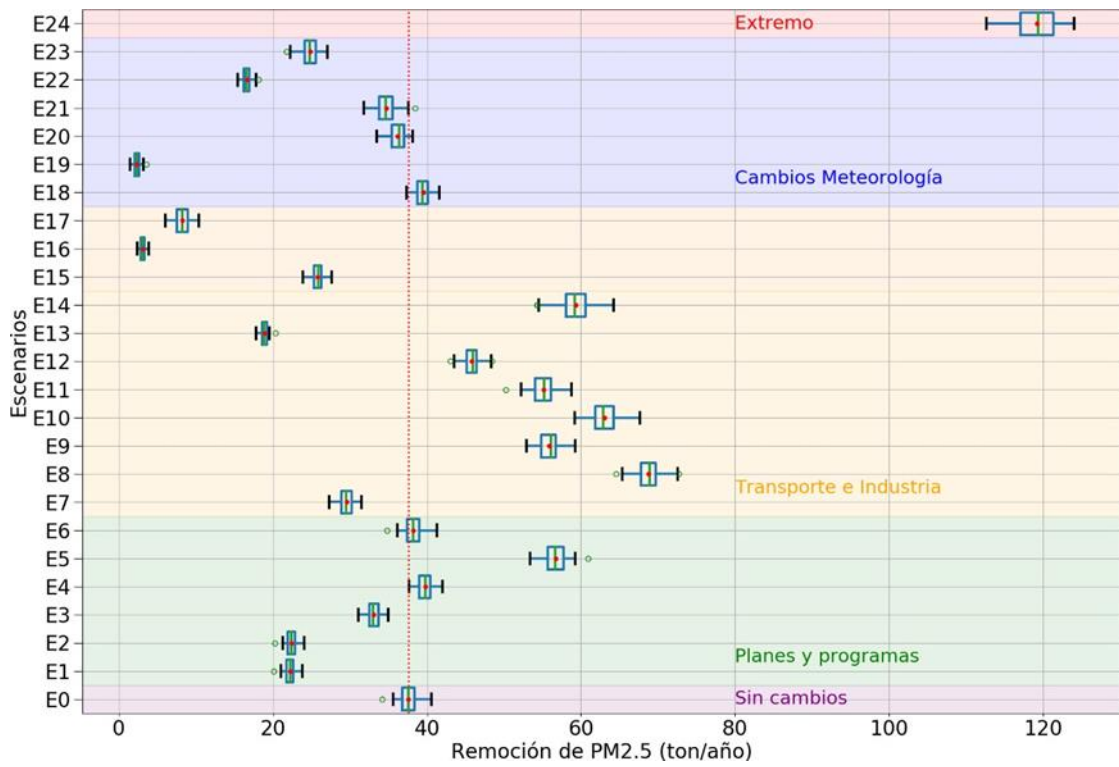


Figura 25. Remoción de PM2.5 (ton/año) para cada uno de los escenarios

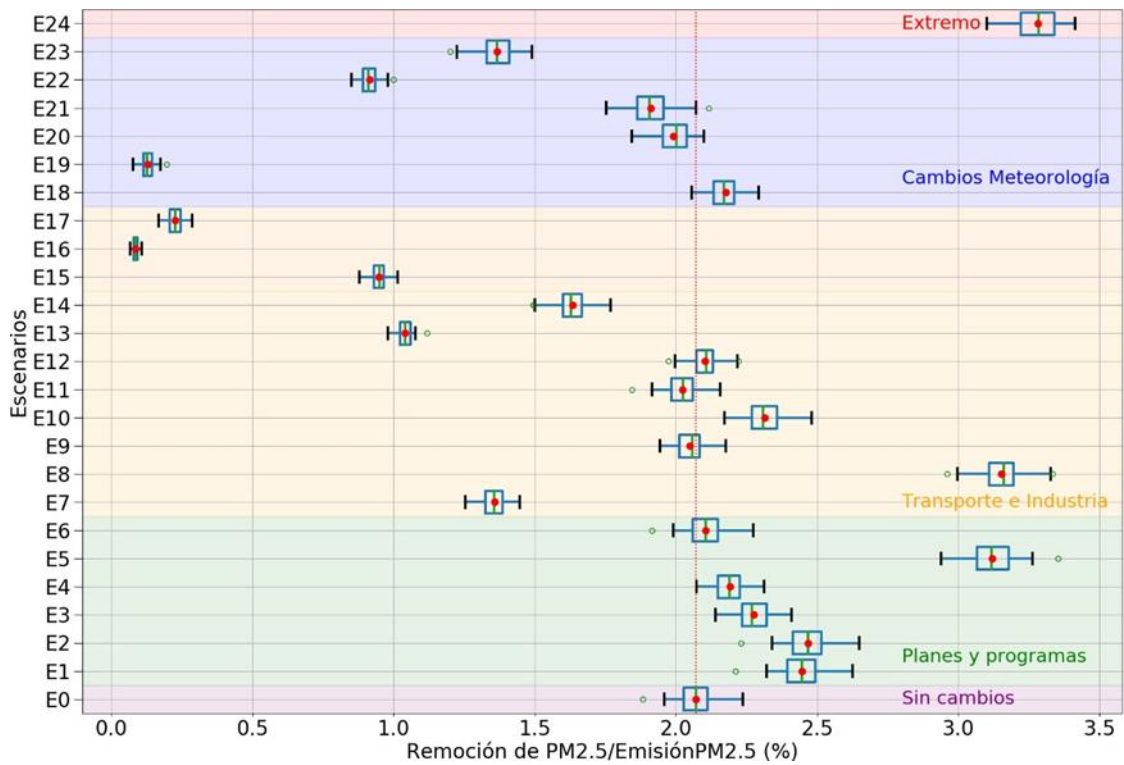


Figura 26. Porcentaje de remoción de PM2.5 (%) con respecto a la emisión anual

En primer lugar, encontramos el escenario actual (E0), el cual muestra la remoción de PM2.5 que tendría lugar para un año con el comportamiento meteorológico y de calidad del aire de los últimos tres años, con un valor promedio de 37.64 ton/año. La media de este valor se encuentra casi 15 ton por encima del valor de remoción del año 2017. Con respecto a la emisión, el porcentaje promedio es de 2.07%.

Los escenarios clasificados en el grupo Planes y Programas no necesariamente presentan valores más altos de remoción con respecto a E0, ya que las variaciones de las variables condicionan de forma diferente la remoción de PM2.5, especialmente, podemos ver que la disminución de la concentración de PM2.5 disminuye el valor de la remoción y el aumento de precipitación (36%) la aumenta. Incluso pueden tener valores de remoción (ton/año) similares o menores a los escenarios de Transporte e Industria. Sin embargo, siendo la remoción efectiva de E0 cercana a 2.01%, si presentan un mayor beneficio en la remoción efectiva con respecto a las emisiones. Igualmente, podemos observar que dos de los escenarios con mayor remoción en este grupo tienen las menores concentraciones de PM2.5, siendo E2 el más alto con un cambio realista de cobertura (ZDS). La mayor remoción efectiva (E5) dentro Planes y Programas alcanza un valor cercano 3%, con un aumento de cobertura de arbórea poco factible (50%), y con un aumento probable (ZDS) podemos ver que la remoción efectiva puede alcanzar hasta 2.5%.

Los escenarios dentro del grupo de Transporte e Industria presentan, excluyendo el escenario Extremo, los valores de remoción (ton/año) mayores entre todos los evaluados. Además de realizar cambios en las variables que puedan ser influidos por el aumento de emisión, también combinamos cambios en la meteorología. Los mayores valores de remoción los presentan los escenarios con mayores concentraciones de PM2.5. Sin embargo, al quitar el efecto directo de las concentraciones de PM2.5, podemos observar que las remociones efectivas con respecto a las emisiones están por debajo del escenario base, excepto por E10 y E12, los cuales tienen en común que aumentan las concentraciones del contaminante, pero E8 es el más alto, que además de aumentar las concentraciones, aumenta la cobertura arbórea (50%) y como resultado obtiene resultados similares

a E5 (que solo aumenta la cobertura), por ende, este aumento puede deber al cambio drástico de cobertura arbórea, es decir, que se debe generar este tipo de cambio en estos escenarios negativos para lograr una mayor remoción por parte del arbolado urbano.

En particular, en los escenarios E5 y E13 aumentamos y disminuimos, respectivamente, la cobertura arbórea en un 50%, mientras mantenemos las otras variables sin cambios. En este caso podemos observar que la remoción (ton/año) aumenta y disminuye, respectivamente, en un 50%. Por tanto, el cambio sería directamente proporcional al cambio de la cobertura, si las otras variables no fueran afectadas. Y representa una disminución y aumento del 1% en la remoción efectiva con respecto a las emisiones. Esto corrobora que los cambios de área tienen que ser grandes para que el efecto se note (incrementar 50% la cobertura en el Valle es impracticable dada la urbanización existente).

Por otro lado, la mayor diferencia de los escenarios con menor remoción efectiva (E16 y E17) con los demás del grupo de Transporte e Industria es la reducción drástica de precipitación (90%). Es decir, que a pesar que las concentraciones se dupliquen, la remoción se mantendrá cercana a cero, dado que no hay precipitación suficiente disponible para remover el PM2.5 que podría llegar a acumularse sobre el arbolado. Además, E16 tiene la remoción más baja, lo cual es probable dada que la poca cobertura arbórea no ofrece área suficiente para la deposición de material particulado.

Entre los escenarios de Cambios Meteorología, el único escenario con la remoción por encima de E0 es el que tiene un aumento de precipitación del 36%, por el contrario, una intensidad de precipitación más alta y la reducción en cualquier porcentaje disminuye los valores de remoción. Incluso el aumento drástico de la intensidad de precipitación puede reducir la remoción mucho más que la reducción de esta. Por tanto, los aumentos de la precipitación deben ser bajos para que puedan influir en un aumento de la remoción. No obstante, los escenarios con la disminución drástica de precipitación (90%) son los menores.

La remoción de E21 disminuye respecto a E0 y E22 disminuye aún más. Por tanto, variaciones en la velocidad del viento pueden influir en la reducción de la remoción de PM2.5. Si hay un aumento

de la velocidad del viento, habría un aumento de la deposición de material particulado, pero la resuspensión de material particulado también aumentaría y no se podría acumular suficiente material particulado en las superficies de las hojas, para luego ser removido por la lluvia.

El escenario E24 es el más extremo, la remoción efectiva es cercana a un 3.3%, que es el valor más alto entre todos los escenarios, sin embargo, sería bajo las condiciones que llevarían a tener unos niveles de contaminación que doblan las actuales, así que con esta perspectiva no habría un beneficio real (sería mejor una remoción cercana al 2% con respecto a las emisiones actuales, que es lo que presenta el E0).

Hasta el momento podemos observar que el aumento de la remoción está principalmente influenciado por los aumentos drásticos de cobertura arbórea, luego por el aumento de la concentración de PM_{2.5} y, finalmente, por el aumento leve de la precipitación. La disminución de la remoción por su parte está más afectada por la disminución de la precipitación. También observamos la dependencia entre la cobertura arbórea y la precipitación, por ejemplo, si una disminuye y la otra no, si podemos observar un efecto, pero cuando las dos cambian, el efecto de la precipitación predomina. Esto es más evidente al analizar la remoción efectiva. Así podemos confirmar que los mayores aumentos de las remociones efectivas se deben al aumento de la cobertura arbórea y la disminución se debe a la reducción de la precipitación.

6.4.1 Análisis mensual

Cuando revisamos los escenarios mes a mes, podemos ver que las mayores remociones ocurren en los meses cercanos a marzo, donde se presentan las mayores concentraciones de PM_{2.5}, pero no en octubre y/o noviembre cuando ocurren generalmente los episodios altos de contaminación. Se puede observar cómo alrededor de agosto y/o septiembre hay picos de contaminación, donde hay un aumento de las velocidades del viento y coincide con el inicio del segundo período de precipitaciones en el valle.

Cuando analizamos el escenario actual (Figura 27), observamos que en febrero y marzo existe la mayor remoción de $PM_{2.5}$ con una mayor variación en los posibles valores. Existe un leve aumento en la remoción de agosto y posteriormente disminuye. En este escenario se observan las variaciones promedio de la remoción en el año y cómo las variables afectan estos valores. Los escenarios entre E1 y E6 (Programas y Planes) tienen un comportamiento mensual muy similar (Figura 28). Los escenarios entre E5 y E17 están clasificados como Transporte e Industria y su comportamiento mensual es muy similar (ver anexos).

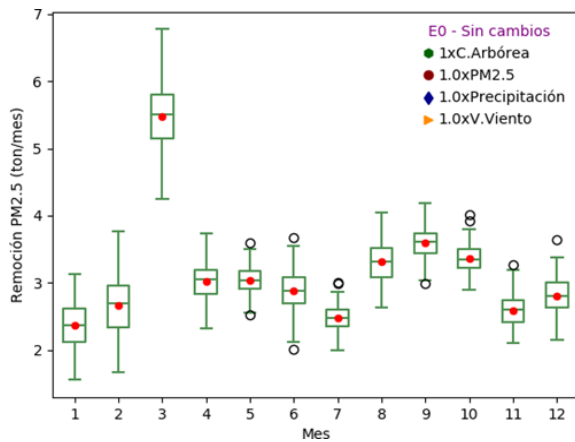


Figura 27. Remoción de $PM_{2.5}$ (ton/mes) por mes para escenario actual (E0)

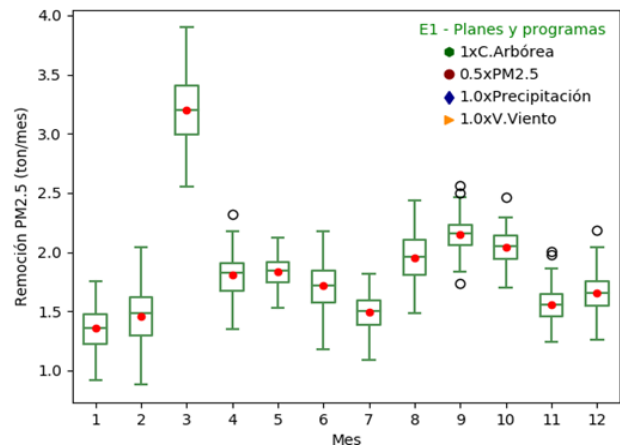


Figura 28. Remoción de $PM_{2.5}$ (ton/mes) por mes para escenario uno (E1)

Como muestra la Figura 29, en marzo existe la mayor remoción con mayor variación. El comportamiento por mes del escenario E17 (Figura 30), que es uno de los que aumenta drásticamente los niveles de contaminación, la mayor variación y magnitud se da en marzo, que es el mes de las mayores concentraciones. Por tanto, al doblar las concentraciones, este mes sería el que más variación y remoción aportaría.

Los escenarios entre E18 y E23 están clasificados como Cambios Meteorología y su comportamiento mensual es muy similar (ver anexos), al igual que los escenarios anteriores. Dentro de este grupo vemos que E18 tiene la mayor variación entre meses, especialmente en el mes de marzo (Figura 31). En la Figura 32 presentamos el escenario E24, uno de los más extremos y dónde más remoción existe, se repite que la mayor remoción ocurre en marzo.

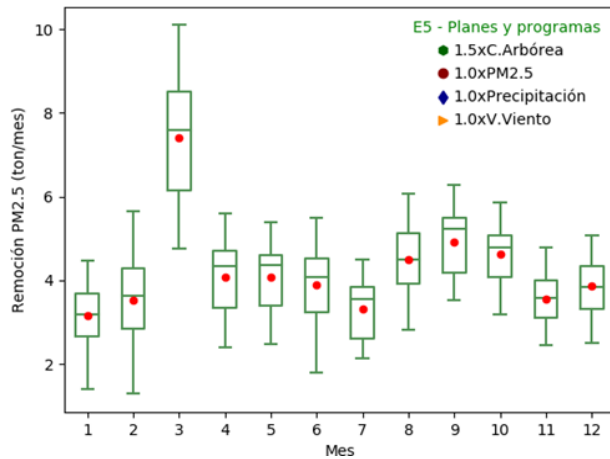


Figura 29. Remoción de PM_{2.5} (ton/mes) por mes para escenario cinco (E5)

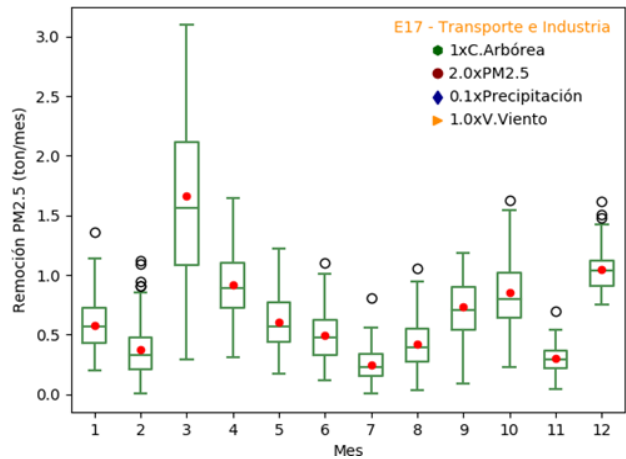


Figura 30. Remoción de PM_{2.5} (ton/mes) por mes para escenario diecisiete (E17)

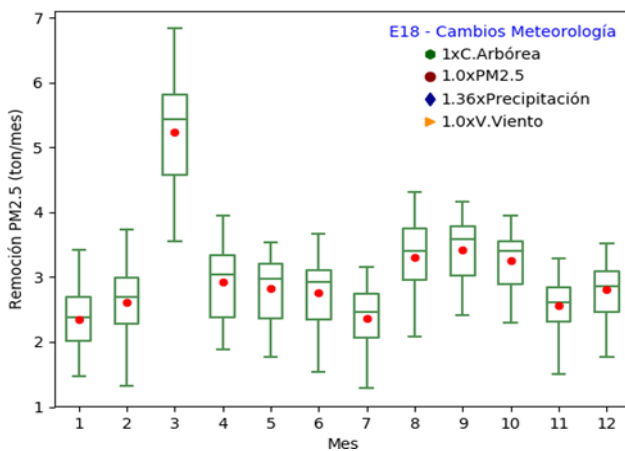


Figura 31. Remoción de PM_{2.5} (ton/mes) por mes para escenario dieciocho (E18)

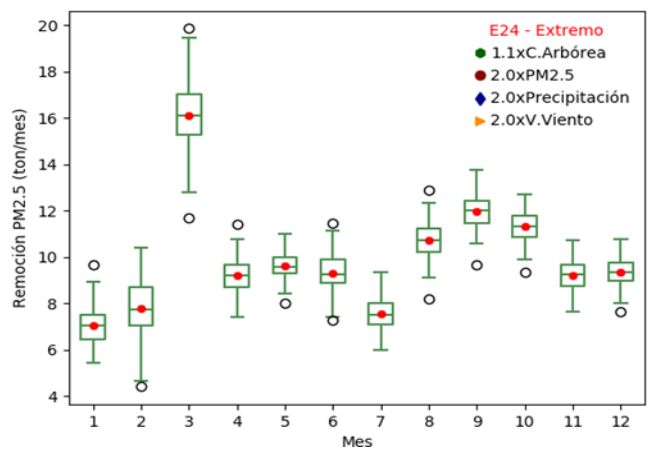


Figura 32. Remoción de PM_{2.5} (ton/mes) por mes para escenario veinticuatro (E24)

Entre los escenarios siempre predomina marzo como el mes con mayor remoción. Este mes siempre coincide con la mayor concentración de PM_{2.5}, por lo tanto, podríamos decir que a lo largo del año el comportamiento de la remoción depende de la variación del material particulado como cabría esperar, sin embargo, para los demás meses aparentemente la remoción está en función de la precipitación.

6.4.2 Análisis por estación

En una primera revisión por estación, la cobertura arbórea define en mayor medida el cambio de remoción, es decir, depende del área de arbolado urbano. Si existe una reducción drástica de la

precipitación, puede variar la remoción entre las estaciones con mayor cobertura asignada, pero estas siguen siendo mayores con respecto a las otras.

En el escenario E0, la mayor variación y la mayor remoción ocurren en las estaciones 3, 25 y 31, en este orden (Figura 33), que como se puede observar en el mapa de la cobertura arbórea (Figura 22), corresponden a las zonas con mayor arborización y también a las medias de velocidad del viento más altas.

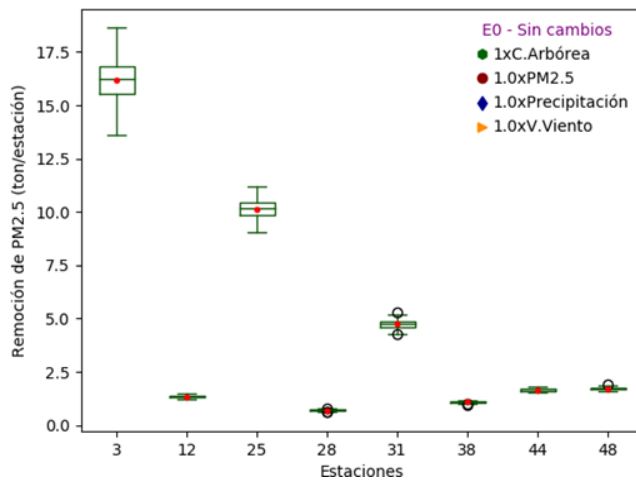


Figura 33. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario actual (E0)

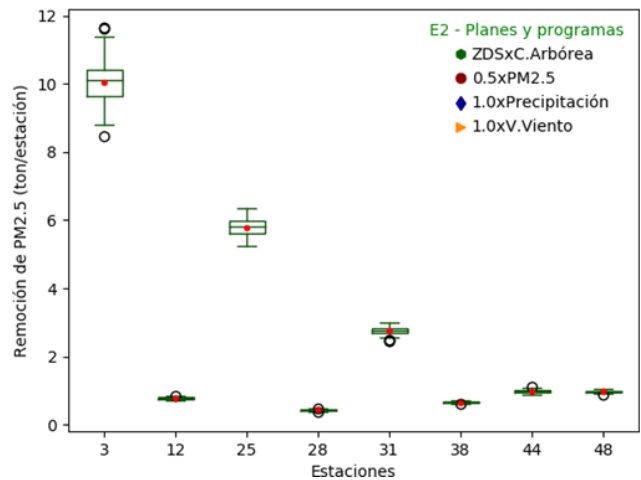


Figura 34. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario dos (E2)

El comportamiento del escenario E2 (Figura 34) es similar al anterior, variando más en la estación 3. El comportamiento de los escenarios (E1 - E6) dentro de la clasificación de Planes y Programas es similar (Figura 35). En el escenario E12 (Figura 36), el comportamiento es similar al E0, aunque, la remoción varía menos en las estaciones con valores más y la mayor variación sigue presentándose en la estación 3. El comportamiento de los escenarios entre E7 y E15 es similar (ver anexos).

En el escenario E17, la mayor remoción sigue presentándose en las mismas estaciones (Figura 37), sin embargo, en este caso sobre estas estaciones, por ahora podríamos sugerir que la variación depende de las estaciones que predominen con mayor contaminación, ya que en este caso se duplican las concentraciones. Podemos ver cómo la remoción disminuye en la estación 25 y aunque

la de la estación 31 aumenta, en la estación 3 sigue variando ampliamente. El escenario E16 tiene un comportamiento similar a E17, pero, en este caso la cobertura arbórea disminuye a la mitad.

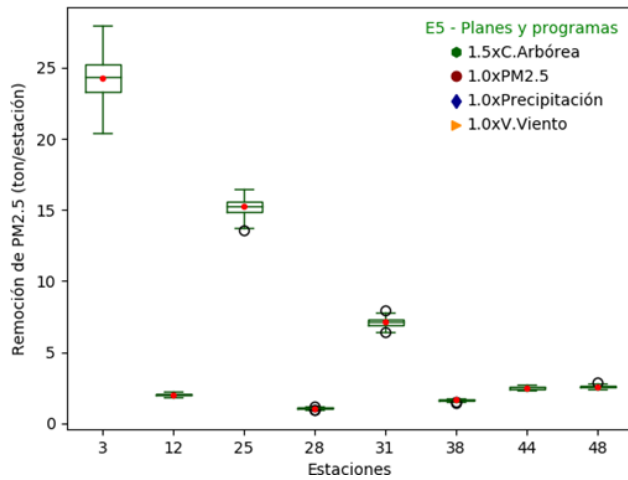


Figura 35. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario cinco (E5)

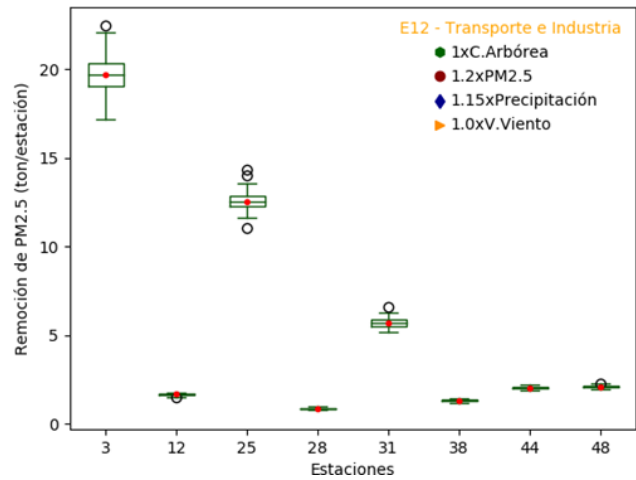


Figura 36. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario doce (E12)

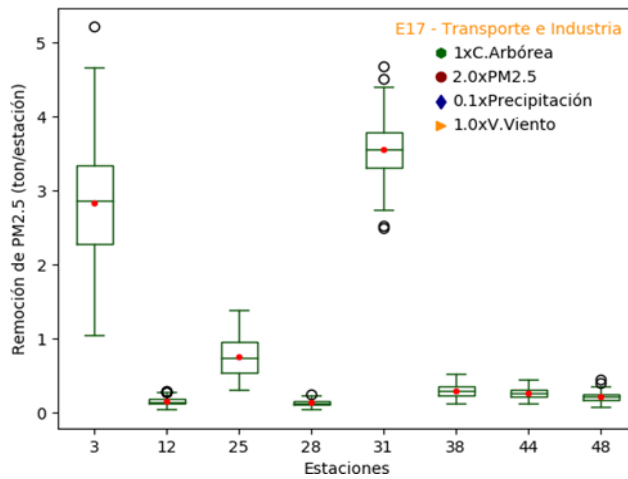


Figura 37. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario diecisiete (E17)

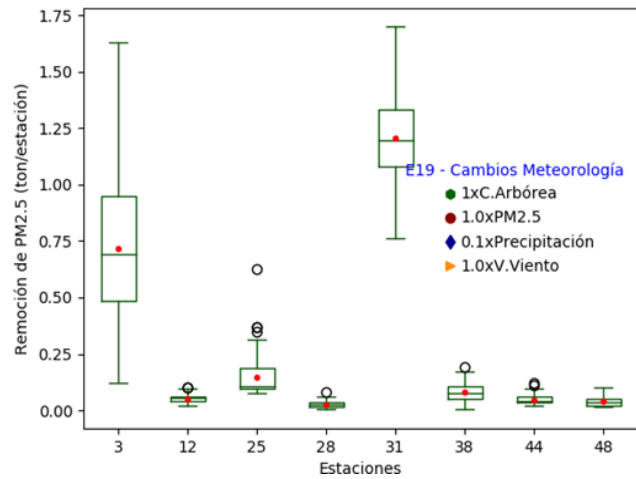


Figura 38. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario diecinueve (E19)

E17 y E16 tienen en común la disminución drástica (90%) de la precipitación y el escenario E19 (Figura 38) clasificado en Cambios Meteorología. Entonces, aparentemente este cambio logra hacer variar el comportamiento previo de las estaciones con mayor remoción, disminuyendo la remoción en la estación 25 y aumentando la remoción en estación 31.

El escenario E22 tiene una variación similar a los escenarios anteriores (Figura 39). E24 (extremo) tiene un comportamiento entre las estaciones similar al escenario actual (Figura 40). No obstante, la variación es muy pequeña.

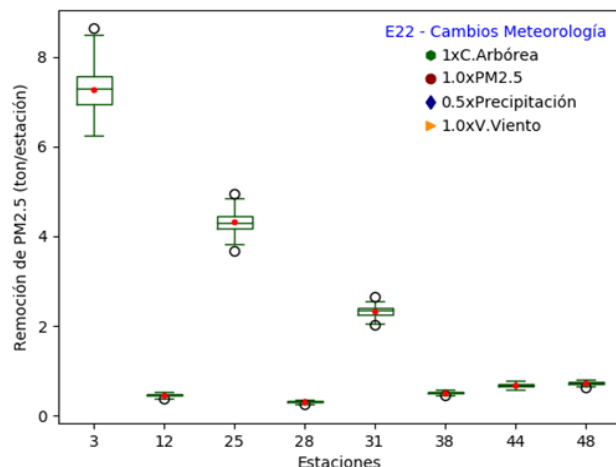


Figura 39. Remoción de PM_{2.5} (ton/estación) por estación para escenario veintidós (E22)

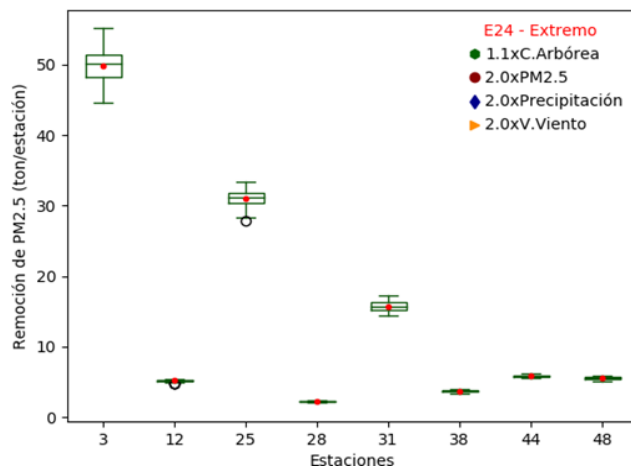


Figura 40. Remoción de PM_{2.5} (ton/estación) por estación para escenario veinticuatro (E24)

En el caso de la variación de la remoción entre las estaciones, la variable que domina es la cobertura arbórea, seguida de la precipitación. También podemos observar que la mayor remoción en el Valle ocurre en las zonas con mayor cobertura arbórea, con menor urbanización y, en consecuencia, con menores niveles de PM_{2.5}. Así, la mayor remoción no está en las zonas más críticas y dónde es más necesaria.

El aumento de cobertura en las zonas disponibles seleccionadas (ZDS) no tiene efectos muy diferenciables con respecto a un aumento del 1%, a pesar de que el aumento en ZDS tiene ubicaciones fijas a diferencia del 1% donde el aumento es proporcional.

Como resumen del análisis de resultados, la Figura 41 presenta los factores ambientales que influyen en el aumento de la remoción de PM_{2.5}.



Factores que influyen en el aumento de la remoción de PM_{2.5}

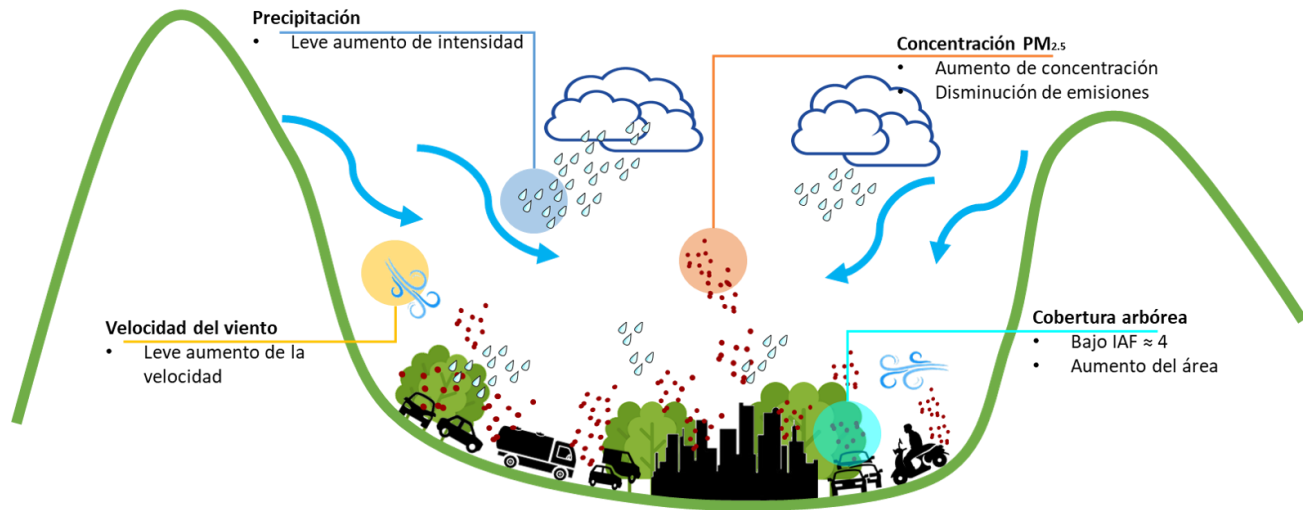


Figura 41. Factores que influyen en el aumento de la remoción de PM_{2.5}

7 CONCLUSIONES

El modelo UFORE semidistribuido que utilizamos en este trabajo permite estimar los efectos marginales de remoción de contaminación atmosférica teniendo en cuenta al menos dos condiciones del arbolado: su distribución espacial y su densidad de hojas. El conocimiento de estos efectos marginales permitiría mejorar la planeación de las siembras dirigidas a mejorar la calidad del aire, como es el caso actual con el Plan de Siembra.

De nuestros cálculos preliminares concluimos que la cantidad de estaciones y su distribución afectan el valor estimado de remoción. Tratando de mantener una distribución espacialmente distribuida, observamos que con menos estaciones se sobrestima el valor total de remoción. Por otro lado, la densidad de hojas juega un papel importante en la magnitud de la remoción. Aparentemente, la remoción de PM_{2.5} es más efectiva con valores bajos de IAF para una misma área de cobertura. Sin embargo, el modelo no tiene en cuenta otras características del dosel y las hojas que podrían afectar este resultado, como por ejemplo la forma de las hojas, la presencia de vellosidades y ceras, entre otras.

Aunque la remoción de PM_{2.5} que estimamos con el modelo UFORE para la cobertura arbórea del Valle de Aburrá representa un pequeño porcentaje del total de emisiones en un año (menos del 1%), es innegable que ofrece un beneficio adicional a otras medidas de mitigación de los efectos de la contaminación del aire por material particulado.

A partir de los resultados de los escenarios podemos concluir que, para un mismo nivel de contaminación, la disminución de la precipitación incide marcadamente en la disminución de la remoción de PM_{2.5}, pero un aumento de precipitación no necesariamente implica un aumento significativo de la remoción.

Aunque un aumento de cobertura arbórea mejora la remoción de PM_{2.5}, para que el cambio sea significativo se necesitarían áreas arborizadas imposibles de alcanzar con el nivel de urbanización actual en el Valle. Es decir que, con un cambio realista de cobertura (ZDS), no habría un cambio

significativo en el valor de la remoción. Otro factor significativo en el valor de la remoción sería la concentración, la cual es más probable que se dé por las condiciones topográficas del Valle y por la falta de control de emisiones. Además, queda claro que el efecto del arbolado sobre la remoción está condicionado por el cambio de las otras variables (por ejemplo, si hay una disminución de los niveles de PM2.5 y/o de la precipitación, en los que el área arborizada no tiene mayor efecto). En consecuencia, es probable que las siembras que se proyectan no representen un aumento sustancial en la remoción de contaminación por PM2.5, al menos en el corto plazo. Por tanto, es importante tener en cuenta otras medidas de mitigación de más corto plazo.

Una disminución drástica de precipitación, que es probable en un futuro pesimista, disminuye la remoción de PM2.5 de forma drástica y directa, así las concentraciones estén duplicadas y la cobertura cambie. La disminución de cobertura y niveles del contaminante también puede disminuir la remoción total, sin embargo, la precipitación es el factor que predomina en este cambio.

Durante el año, la remoción aumenta en los meses con mayores concentraciones de PM2.5. Con un análisis preliminar podríamos asumir que esto es un beneficio, pero el aumento de la remoción se da con el aumento de la concentración, es decir que el aumento es directamente proporcional y no hay valor agregado ni hay un efecto marginal entre los meses.

Entre las estaciones, la mayor remoción depende de la cobertura, es decir, las áreas con una mayor cobertura asignada tendrán una mayor remoción, independiente de los valores de precipitación y concentraciones de PM2.5. Por tanto, la remoción estará ubicada en las zonas donde haya mayor cobertura arbórea, es decir, más área disponible para depositar el material particulado, que generalmente coincide con las zonas donde hay una menor concentración. Igualmente, el modelo asume que las concentraciones no tienen un efecto previo por el arbolado, por ende, no podemos establecer si la contaminación de estas zonas es representativa, aunque también debemos tener en cuenta que estos lugares más arborizados no permiten el acceso de vehículos que son las principales fuentes de PM2.5, según el inventario de emisiones del 2016. No obstante, cuando

realizamos una disminución drástica en la precipitación, se reduce la influencia espacial de la cobertura arbórea.

Con los diferentes escenarios observamos que la remoción total con respecto a las emisiones no es muy significativa. Se podría aumentar la remoción hasta un 3.5%, pero dependiendo de la disponibilidad de lluvia y contaminante a remover. Los escenarios con condiciones similares a las del escenario actual no superan el 2.5%. Es decir que, indiferente a los cambios que podríamos hacer sobre la cobertura, no podríamos elevar su efectividad más allá de un 3.5%. Esto sin tener en cuenta las emisiones de contaminantes, dado que, si bien el valor de remoción es directamente proporcional al aumento de cobertura y al aumento de niveles de concentración, el porcentaje de remoción efectiva con respecto a las emisiones no es directamente proporcional a las emisiones.

Los escenarios de Planes y Programas sí presentan una mejora de la remoción efectiva con respecto a los de Transporte e Industria. Por ende, podemos concluir que los escenarios que cumplan los planes y programas dirigidos a mejorar la calidad del aire, si lograrían una mayor efectividad de remoción por el arbolado urbano.

Sí existe un beneficio en la remoción de PM_{2.5} por el aumento, dentro de lo posible, del área del arbolado. Para que el arbolado urbano sea efectivo como medida para remover la contaminación, también es necesario implementar otras medidas de control y mitigación en lo que se refiere a la gestión de la calidad del aire que reduzcan las emisiones, dado que para que haya una remoción considerable dependiendo solo de la cobertura arbórea, el cambio debería ser muy drástico y en consecuencia menos factible.

La decisión de las siembras debe hacerse considerando otros beneficios al medio ambiente y salud pública que ofrecen los árboles, como, la remoción de CO₂, NO_x y ozono, que requiere árboles con mayor biomasa, la disminución de la temperatura ambiental en metrópolis tan urbanizadas, lo que representaría una mejora en la circulación atmosférica, la producción de oxígeno, su contribución al ciclo hidrológico, la mejora del bienestar de los habitantes del Valle, entre otros. Igualmente, la

planeación de las siembras debe tener en cuenta los efectos de los árboles en la circulación del aire en las ciudades y de la forma del follaje, aspectos que podrían aumentar localmente las concentraciones de los contaminantes aéreos.

Aunque la presencia de PM_{2.5} emitido por vehículos es más afectada por los efectos aerodinámicos producidos por la estructura de los árboles que por la deposición seca sobre las hojas, el modelo permite estimar, aproximadamente, el efecto del arbolado sobre los niveles de contaminación atmosférica y apoyar la planeación de las siembras dirigidas a contribuir en el mejoramiento de la calidad del aire. De igual forma, en el futuro, sería útil aplicar modelación computacional de fluidos para estimar y proyectar la captura de PM_{2.5} por los árboles urbanos teniendo en cuenta adecuadamente los flujos de aire entre los árboles y las edificaciones, y la topografía particular del Valle, especialmente en lugares de interés como vías principales y de mayor tráfico vehicular.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta Soto, M. F. (2010). Revisión de los modelos CITYgreen, i-tree Tools ECO y i-Tree Tools Streets, como herramientas para la cuantificación de los servicios Ecosistemicos prestados por el arbolado urbano de Bogotá. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/9862/tesis77.pdf?sequence=1>
- Agudelo-Patiño, L. C., & Miralles-Garcia, J. L. (2015). Design and management of the metropolitan green belt of Aburrá Valley, Colombia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 194, 193–203. <https://doi.org/10.2495/SC150181>
- Agudelo Uribe, a. (2013). estudio de aerogeneradores de baja velocidad para su implementación en el Valle de Aburrá. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Alcalá, J., Sosa, M., Moreno, M., Quintana, C., Campos, A., & Holguin, C. (2008). Retención de polvo atmosférico en especies arbóreas indicadoras de la planeación urbana sustentable: ciudad de Chihuahua, México. *Multequina*, 17(1), 17–28. Recuperado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-73292008000100001
- Alcaldía de Medellín. (2018). Calidad del Aire de Medellín. Recuperado de www.medellin.gov.co
- Alcaldía de Medellín, AMVA (Área Metropolitana Valle de Aburrá), & urbam (Centro de Estudios Ambientales - Universidad EAFIT). (2011). Bio 2030 - Plan Director Medellín, Valle de Aburrá. (Mesa Editores, Ed.) (Primera ed).
- Duran Rivera, B. D., & Alzate Guarín, F. A. (2009). Total suspended particles interception by five urban tree species in Valle de Aburrá | Intercepción de partículas suspendidas totales (PST) por cinco especies de árboles urbanos en el Valle de Aburrá. *Revista Facultad de Ingeniería*, 47(47), 59–66. Retrieved from

AMVA. (2019). Calidad del Aire. Recuperado de www.metropol.gov.co

AMVA. (2019). Área Metropolitana declara estado de prevención por calidad del aire. Recuperado de www.metropol.gov.co

AMVA. (2018). POECA, un protocolo en épocas de contingencia ambiental. Recuperado de www.metropol.gov.co

AMVA. (2018). Plan de Siembra Aburrá. Recuperado de www.metropol.gov.co

AMVA. (2018). Condiciones especiales del Valle de Aburrá. Recuperado de www.metropol.gov.co

AMVA. (2018). Plan Integral PIGECA: Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire del Valle de Aburrá. Tomado de: www.metropol.gov.co

AMVA, & Clean Air Institute. (2017). Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (PIGECA 2017-2030), 307.

AMVA, & UPB. (2018). Actualización Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá -año 2016. Convenio de Asociación No. CA 335 de 2016. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.0804341>

AMVA, & Universidad Pontificia Bolivariana (UPB). (2017). Actualización Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá -Año 2015-. Convenio de Asociación No. CA 335 de 2016. Retrieved from https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Inventario-de-emisiones/Inventario_FuentesFijas2016_FuentesMóviles2015.pdf

Arroyave Maya, M. D. P., Posada Posada, M. I., Nowak, D. J., & Hoehn, R. E. (2019). Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá. *Colombia Forestal*, 22(1), 5–16. <https://doi.org/10.14483/2256201X.13695>

Arroyave Maya, M., Gutiérrez Lagoueyt, M., Posada Posada, M., & Osorio, K. (2016).

Estimación de servicios ecosistémicos del bosque urbano en el Valle de Aburrá, Colombia mediante LAI-2200. In 7mo Simposio Nacional Forestal (Colombia).

Arroyave, M. del P., Ruiz, D., Londoño, C., & Betancur, S. (2013). Influencia del clima y la calidad del aire en la salud del arbolado urbano en el Valle de Aburrá. In Simposio Internaiconal Manejo Integral del Arbolado Urbano. Retrieved from

http://www.metropol.gov.co/ZonasVerdes/Eventos/Simposio_Componente_fisico.pdf

Beckett, K.P., Freer, P.H., Taylor, G., (2000). Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global Change Biology* 6, 995 - 1003.

Bedoya-Soto, J. M., Aristizábal, E., Carmona, A. M., & Poveda, G. (2019). Seasonal Shift of the Diurnal Cycle of Rainfall Over Medellín's Valley, Central Andes of Colombia (1998–2005). *Frontiers in Earth Science*, 7(May). <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00092>

Benincore Agudelo, M. (2018, May 7). Así se llegó a sembrar 500 mil árboles en el Aburrá. *Elcolombiano.Com*. Recuperado de <https://www.elcolombiano.com/antioquia/asi-se-llego-a-sembrar-500-mil-arboles-en-el-aburra-EI8659897>

Bonan, G. (2016). *Ecological Climatology*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107339200>

Bottalico, F., Travaglini, D., Chirici, G., Garfi, V., Giannetti, F., De Marco, A., Sanesi, G. (2017).

A spatially-explicit method to assess the dry deposition of air pollution by urban forests in the city of Florence, Italy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27, 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.08.013>

- Cabaraban, M. T. I., Kroll, C. N., Hirabayashi, S., & Nowak, D. J. (2013). Modeling of air pollutant removal by dry deposition to urban trees using a WRF/CMAQ/i-Tree Eco coupled system. *Environmental Pollution*, 176, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.006>
- Cherin, N., Roustan, Y., Musson-Genon, L., & Seigneur, C. (2015). Modelling atmospheric dry deposition in urban areas using an urban canopy approach. *Geoscientific Model Development*, 8(3), 893–910. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-893-2015>
- Contraloría General de Medellín & Universidad Nacional de Colombia. (2018). Cuantificación física y económica del impacto de la contaminación atmosférica en salud de la población de la ciudad de Medellín. Medellín.
- Crosman, E. T., & Horel, J. D. (2017). Large-eddy simulations of a Salt Lake Valley cold-air pool. *Atmospheric Research*, 193(March), 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.010>
- DANE. (2019). Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/>
- De la Concha, H., & Reynoso, R. (2017). Resultados del inventario urbano de Playa del Carmen. Q. Roo realizado de noviembre 2016 a abril 2017. Playa del Carmen. Recuperado de https://www.itreetools.org/resources/reports/Inventario_Urbano_de_Playa_del_Carmen_QR.pdf
- Duran Rivera, B. D., & Alzate Guarín, F. A. (2009). Total suspended particles interception by five urban tree species in Valle de Aburrá | Intercepción de partículas suspendidas totales (PST) por cinco especies de árboles urbanos en el Valle de Aburrá. *Revista Facultad de Ingeniería*, 47(47), 59–66. Retrieved from http://tesis.udea.edu.co/bitstream/10495/5008/1/RiveraByron_2009_intercepcionparticulassuspendidas.pdf

Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution* (Barking, Essex : 1987), 159(8–9), 2078–2087. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>

Forest Services U. S. (2017). i-Tree Eco Model. Retrieved September 19, 2017, from <https://www.itreetools.org/eco/>

Forest Services U. S. (2017). Supported Countries International Projects / i-Tree Eco Model. Retrieved from https://www.itreetools.org/resources/manuals/ECov6_ManualsGuides/ECov6Guide_InternationalProjects.pdf

+Freer-Smith, P.H., El-Khatib, A.A., & Taylor, G. (2004). Capture of particulate pollution by trees: a comparison of species typical of semi-arid areas (*Ficus nitida* and *Eucalyptus globulus*) with European and North American species. *Water, Air, and Soil Pollution* 155, 173 - 187

Gómez Comba, C. A. (2017). Contaminación del aire de Medellín por PM 10 y PM 2.5 y sus efectos en la salud. Universidad Militar Nueva Granada. Recuperado de <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17019#.WqHyFtbXPY.mendeley>

Grêt-Regamey, A., Sirén, E., Brunner, S. H., & Weibel, B. (2017). Review of decision support tools to operationalize the ecosystem services concept. *Ecosystem Services*, 26(April 2016), 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.10.012>

Gromke, C., & Blocken, B. (2015). Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale. Part II: Traffic pollutant concentrations at pedestrian level. *Environmental Pollution*, 196, 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.10.015>

Hastenrath, S. (1991). *Climate dynamics of the tropics*. Climate dynamics of the tropics.

Hale, J., Pugh, T., Sadler, J., Boyko, C., Brown, J., Caputo, S., ... MacKenzie, A. (2015).

- Delivering a Multi-Functional and Resilient Urban Forest. *Sustainability*, 7(12), 4600–4624.
<https://doi.org/10.3390/su7044600>
- Herrera, L. (2015). Caracterización de la Capa Límite Atmosférica en el valle de Aburrá a partir de la información de sensores remotos y radiosondeos. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/51042/1/1128283242.2015.pdf>
- Hirabayashi, S., Kroll, C. N., & Nowak, D. J. (2015). Urban Forest Effects-Dry Deposition (UFORE – D) Model Descriptions
- Hirabayashi, S., Kroll, C. N., & Nowak, D. J. (2011). Urban Forest Effects-Dry Deposition (UFORE – D) Model Descriptions, 1–23. Recuperado de [http://www.itreetools.org/eco/resources/UFORE-D Model Descriptions.pdf](http://www.itreetools.org/eco/resources/UFORE-D%20Model%20Descriptions.pdf)
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM). (s.f.). Escenarios de Cambio Climático. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/>
- Janhäll, S. (2015, March 1). Review on urban vegetation and particle air pollution - Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*. Pergamon.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052>
- Jantz, C. A., & Manuel, J. J. (2013). Estimating impacts of population growth and land use policy on ecosystem services: A community-level case study in Virginia, USA. *Ecosystem Services*, 5, 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.005>
- Jayasooriya, V. M., Ng, A. W. ., Muthukumaran, S., & Perera, B. J. C. (2017). Green infrastructure practices for improvement of urban air quality. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 34–47.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.11.007>

- Jeanjean, A. P. R., Buccolieri, R., Eddy, J., Monks, P. S., & Leigh, R. J. (2017). Air quality affected by trees in real street canyons: The case of Marylebone neighbourhood in central London. *Urban Forestry & Urban Greening*, 22, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.01.009>
- Khedairia, S., & Khadir, M. T. (2012). Impact of clustered meteorological parameters on air pollutants concentrations in the region of Annaba, Algeria. *Atmospheric Research*, 113, 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.002>
- Kricher, J. (2011). *Tropical Ecology*. Princeton University Press.
- MADS. (2017). Pronunciamiento situación calidad del aire de Medellín | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado dic. 28, 2017, de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/85-videos/2676-pronunciamiento-situacion-calidad-del-aire-de-medellin>
- Mora G, D. Y., Ulises Jiménez, J., & Fábrega, J. (2014). Relación Entre el Índice de Área Foliar y el Índice Normalizado de Vegetación en el Bosque Húmedo Tropical de Panamá, en Gamboa. *Revista de I+D Tecnológico*, 10(1), 28–40. <https://doi.org/978-9962-8984-1-2>
- Morani, A., Nowak, D., Hirabayashi, S., Guidolotti, G., Medori, M., Muzzini, V., Calfapietra, C. (2014). Comparing i-Tree modeled ozone deposition with field measurements in a periurban Mediterranean forest. *Environmental Pollution*, 195, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.08.031>
- Morani, A., Nowak, D. J., Hirabayashi, S., & Calfapietra, C. (2011). How to select the best tree planting locations to enhance air pollution removal in the MillionTreesNYC initiative. *Environmental Pollution*, 159(5), 1040–1047. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.11.022>
- Mudelsee, M. (2010). *Climate Time Series Analysis: Classical Statistical and Bootstrap Methods*. London.

- Ning, G., Wang, S., Ma, M., Ni, C., Shang, Z., Wang, J., & Li, J. (2018). Characteristics of air pollution in different zones of Sichuan Basin, China. *Science of the Total Environment*, 612, 975– 984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.205>
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M., & Pasher, J. (2018). Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.019>
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Hoehn, R. (2013). Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 178, 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.050>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). Calidad del aire y salud: Datos y cifras. Recuperado de www.who.int/es/
- Posada, M. I., Arroyave, M. del P., & Fernández, C. (2009). Influencia de la vegetación en los niveles de ruido urbano. *Revista EIA*, (12), 79–89. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/1492/149212815006/>
- Proantioquia, El Colombiano, Universidad Eafit, Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, Comfama, Comfenalco, Casa Editorial El Tiempo, la Cámara de Comercio de Bogotá,
- F. C. -Medellín Cómo Vamos- (2018). Memorias Mesa de trabajo sobre calidad del aire en el Valle de Aburrá: El reto de fortalecer la gobernanza del aire. Medellín.
- Pullman, M., (2009). Conifer PM_{2.5} Deposition and Re-suspension in Wind and Rain Events. Master's thesis. Cornell University, p. 51.
- Rendón, A. M., Salazar, J. F., Wirth, V., & Quintero, O. L. (2015). Mechanisms of air pollution transport in urban valleys. *CMAS South America*, 2–4.

- Rendón, A., Wirth, V., Salazar, J. F., Palacio, C. A., & Brötz, B. (2014, dic.). Mechanisms of Air Pollution Transport in Urban Valleys as a Result of the Interplay Between the Temperature Inversion and the Urban Heat Island Effect. En: AGU Fall Meeting Abstracts.
- Reynolds, C., Escobedo, F., Clerici, N., & Zea-Camaño, J. (2017). Does “Greening” of Neotropical Cities Considerably Mitigate Carbon Dioxide Emissions? The Case of Medellin, Colombia. *Sustainability*, 9(5), 785. <https://doi.org/10.3390/su9050785>
- Rogers, K., Sacre, K., Goodenough, J., & Kieron Doick. (2015). Valuing London’s Urban Forest. London. Retrieved from https://www.itreetools.org/resources/reports/Valuing_Londons_Urban_Forest.pdf
- Santiago, J.-L., Martilli, A., & Martin, F. (2017). On Dry Deposition Modelling of Atmospheric Pollutants on Vegetation at the Microscale: Application to the Impact of Street Vegetation on Air Quality. *Boundary-Layer Meteorology*, 162(3), 451–474. <https://doi.org/10.1007/s10546-016-0210-5>
- Secretaría de Medellín. (2018). Base de datos del Sistema de Árbol Urbano.
- Selmi, W., Weber, C., Rivière, E., Blond, N., Mehdi, L., & Nowak, D. (2016). Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry & Urban Greening*, 17, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.04.010>
- SIATA. (2019). Sistema de Alerta Temprana del valle de Aburrá. Disponible en: https://siata.gov.co/siata_nuevo/
- Taborda, E. (2017). Efectos de la colección de árboles de la Universidad de Antioquia en la calidad del aire del campus. Universidad de Antioquia. Recuperado de <http://portal.udea.edu.co/wps/portal/udea/>

Tallis, M., Taylor, G., Sinnett, D., & Freer-Smith, P. (2011). Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning*, 103(2), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.003>

Terzaghi, E., Wild, E., Zacchello, G., Cerabolini, B. E. L., Jones, K. C., & Di Guardo, A. (2013).

Forest Filter Effect: Role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs. *Atmospheric Environment*, 74, 378–384. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.013>

UNAL. (2011). Medellín: ahogada por el fenómeno de la inversión térmica. Tomado de: <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/>

US EPA(United States Environmental Protection Agency) y Distrito de Control de la Contaminación del Aire del Condado de Santa Bárbara. (2008). Efectos de los Contaminantes Comunes del Aire. Tomado de: <https://www3.epa.gov/>

Vailshery, L. S., Jaganmohan, M., & Nagendra, H. (2013). Effect of street trees on microclimate and air pollution in a tropical city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3), 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.03.002>

Vranckx, S., Vos, P., Maiheu, B., & Janssen, S. (2015). Impact of trees on pollutant dispersion in street canyons: A numerical study of the annual average effects in Antwerp, Belgium. *Science of the Total Environment*, 532, 474–483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.032>

Wania, A., Bruse, M., Blond, N., & Weber, C. (2012). Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management*, 94(1), 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.036>

World Bank & Institute for Health Metrics and Evaluation. (2016). The Cost of Air Pollution: Strengthening the Economic Case for Action. The World Bank and Institute for Health Metrics and Evaluation University of Washington, Seattle. <https://doi.org/10.1080/000368497326688>

Yli-Pelkonen, V., Setälä, H., & Viippola, V. (2017). Urban forests near roads do not reduce gaseous air pollutant concentrations but have an impact on particles levels. *Landscape and Urban Planning*, 158, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.09.014>

9 ANEXOS

9.1 COMPARACIONES DE LAS PROYECCIONES DE LAS VARIABLES

9.1.1 Precipitación

9.1.1.1 Ciclo diario excluyendo ceros

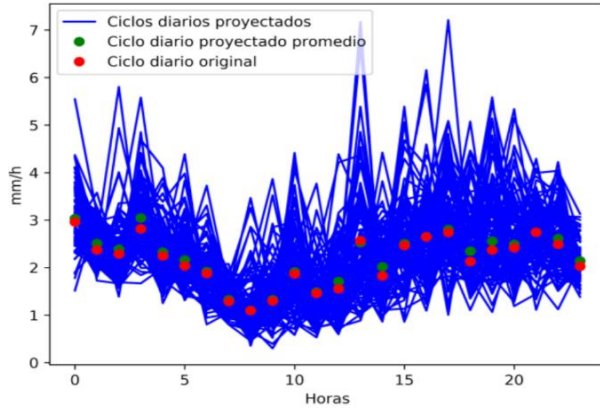


Figura 42. Ciclo diario sin ceros de la precipitación para la estación 3

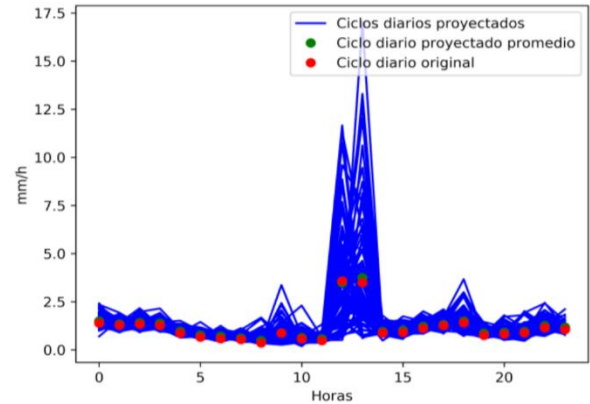


Figura 43. Ciclo diario sin ceros de la precipitación para la estación 12

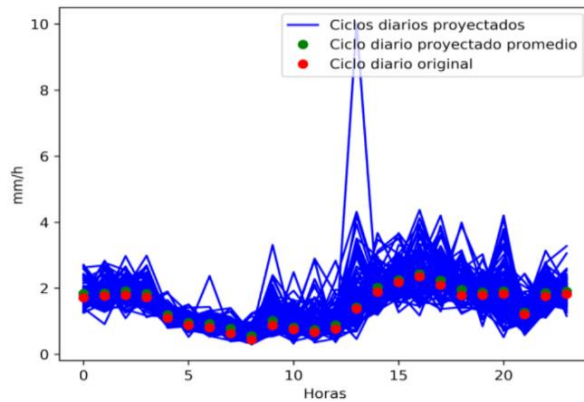


Figura 44. Ciclo diario sin ceros de la precipitación para la estación 25

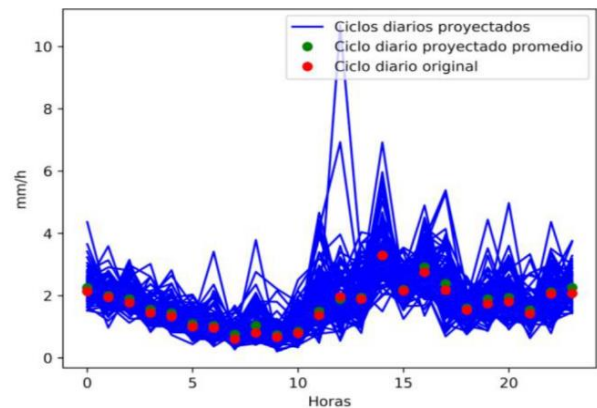


Figura 45. Ciclo diario sin ceros de la precipitación para la estación 28

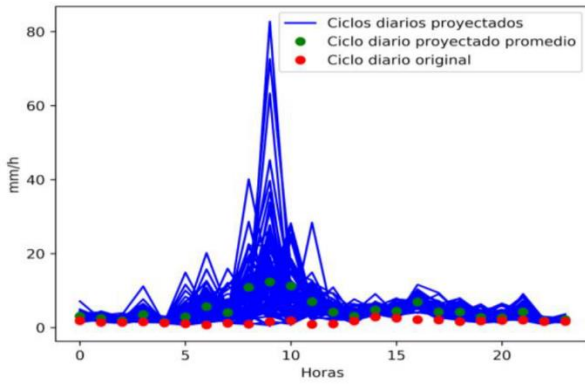


Figura 46. Ciclo diario sin ceros de la precipitación para la estación 31

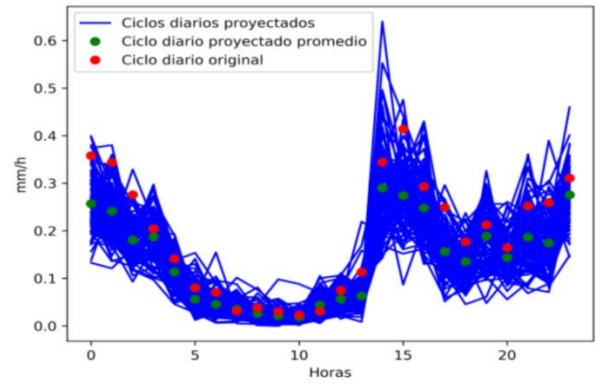


Figura 47. Ciclo diario sin ceros de la precipitación para la estación 38

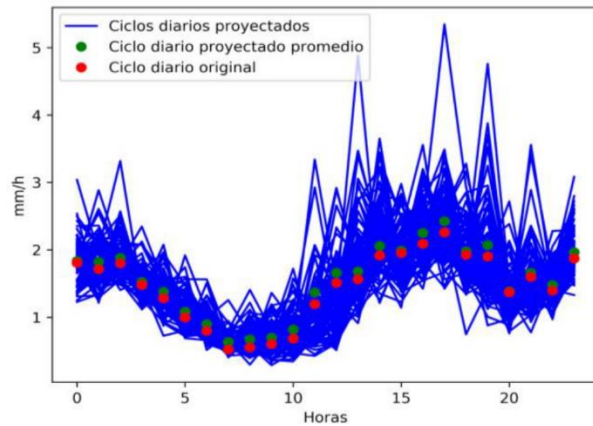


Figura 48. Ciclo diario sin ceros de la precipitación para la estación 44

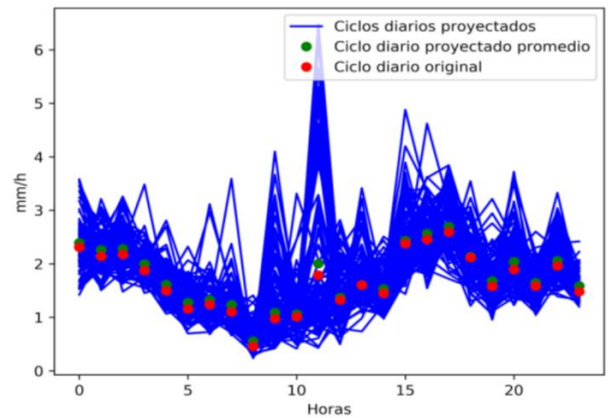


Figura 49. Ciclo diario sin ceros de la precipitación para la estación 48

9.1.1.2 Promedio horario mensual

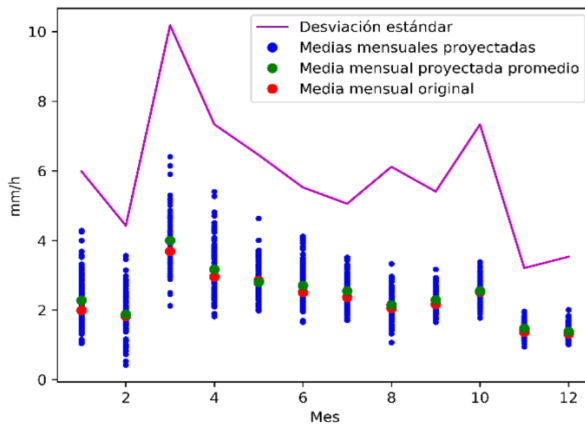


Figura 50. Promedio horario mensual de la precipitación para la estación 3

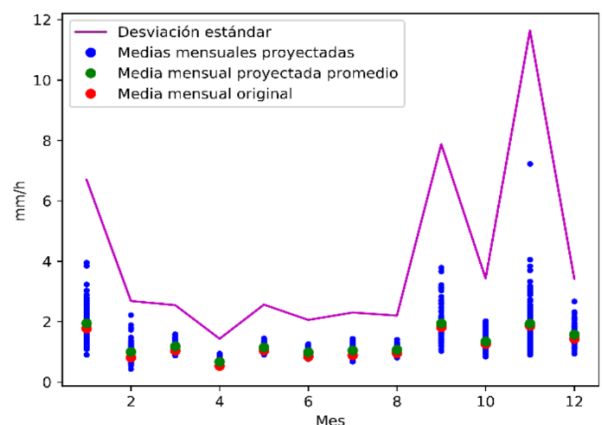


Figura 51. Promedio horario mensual de la precipitación para la estación 12

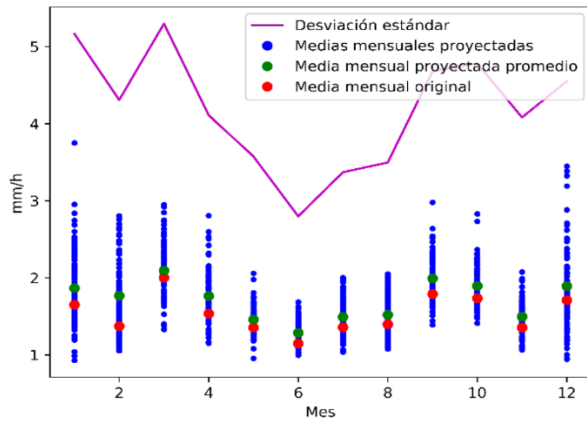


Figura 52. Promedio horario mensual de la precipitación para la estación 25

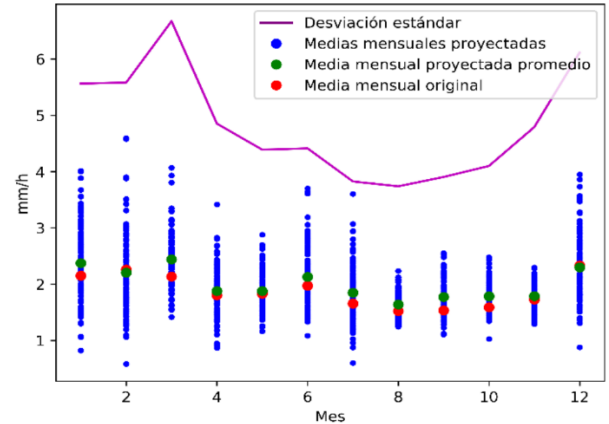


Figura 53. Promedio horario mensual de la precipitación para la estación 28

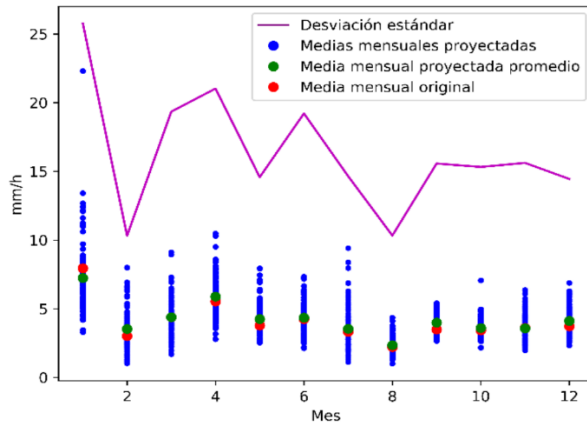


Figura 54. Promedio horario mensual de la precipitación para la estación 31

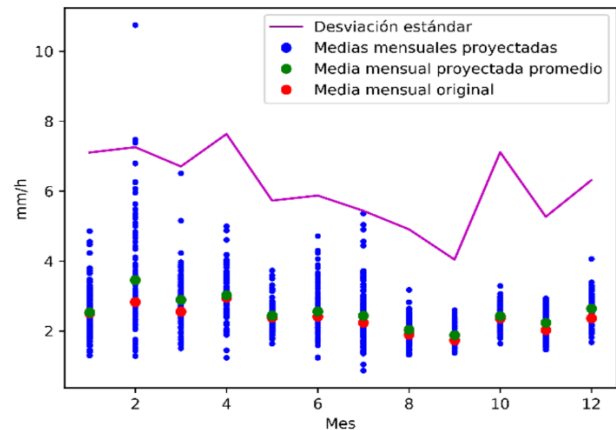


Figura 55. Promedio horario mensual de la precipitación para la estación 38

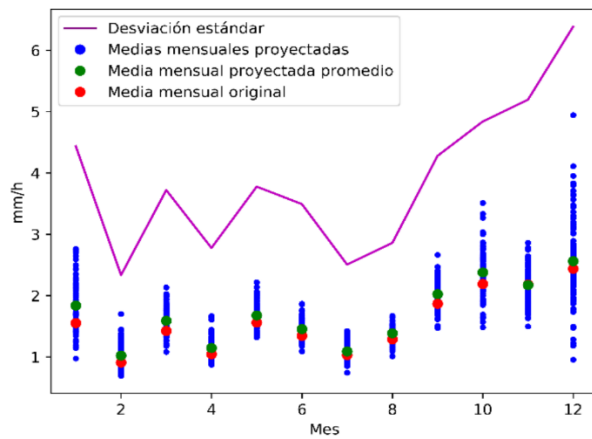


Figura 56. Promedio horario mensual de la precipitación para la estación 44

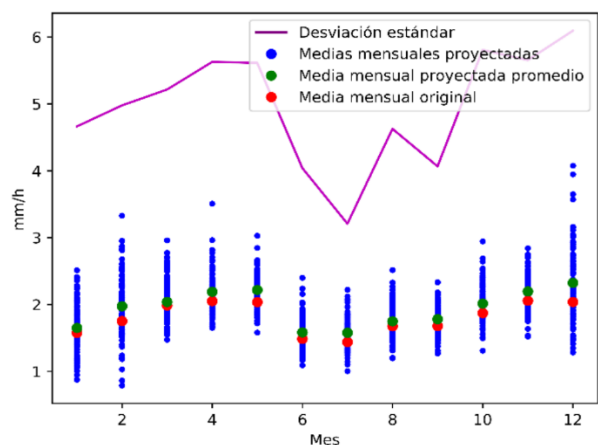


Figura 57. Promedio horario mensual de la precipitación para la estación 48

9.1.1.3 Duración de eventos de lluvia al mes

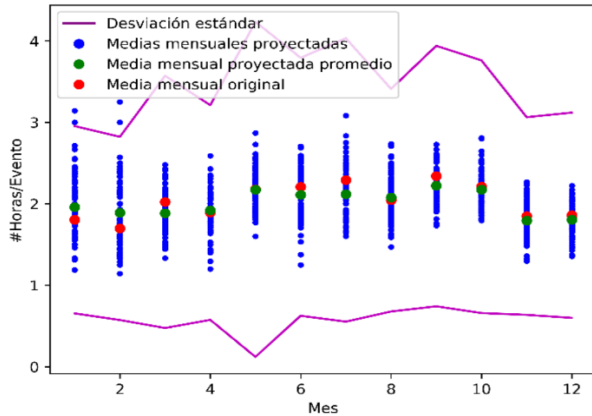


Figura 58. Promedio eventos de precipitación mensual para la estación 3

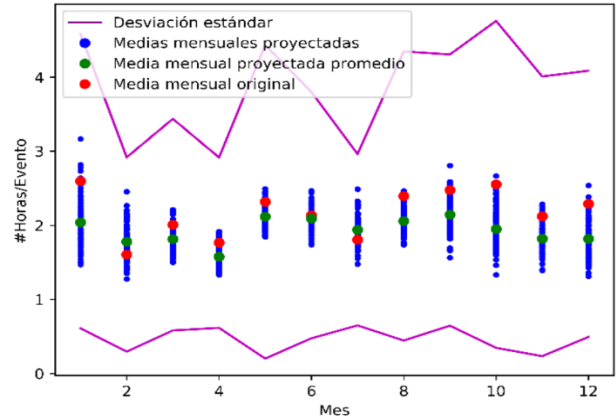


Figura 59. Promedio eventos de precipitación mensual para la estación 12

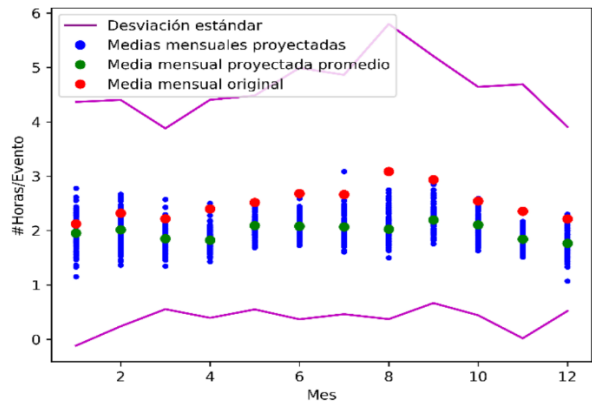


Figura 60. Promedio eventos de precipitación mensual para la estación 25

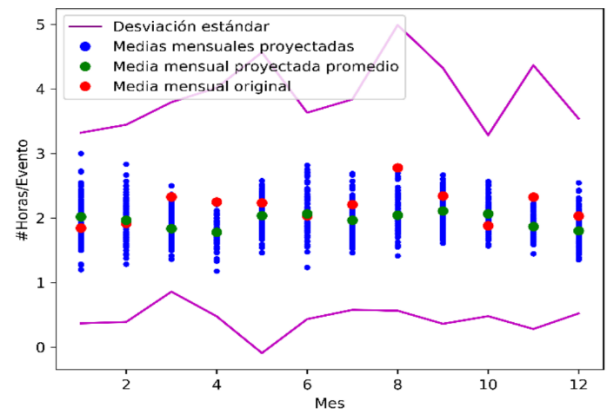


Figura 61. Promedio eventos de precipitación mensual para la estación 28

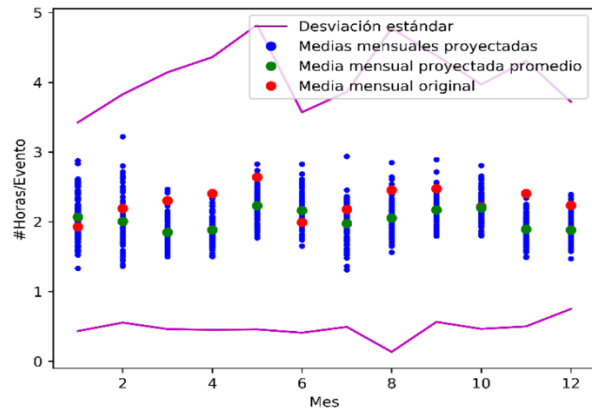


Figura 62. Promedio eventos de precipitación mensual para la estación 31

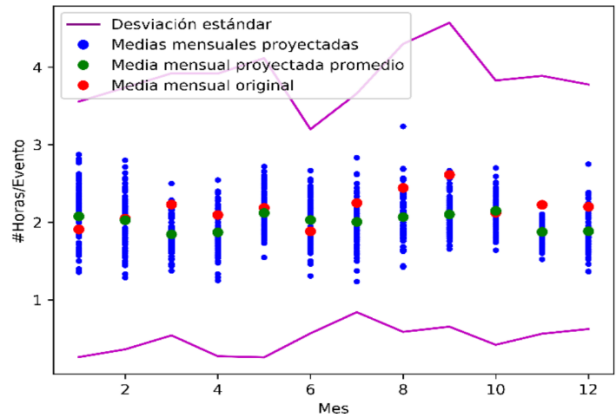


Figura 63. Promedio eventos de precipitación mensual para la estación 38

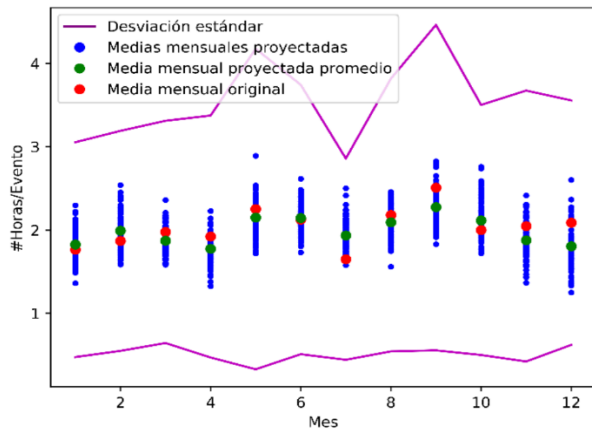


Figura 64. Promedio eventos de precipitación mensual para la estación 44

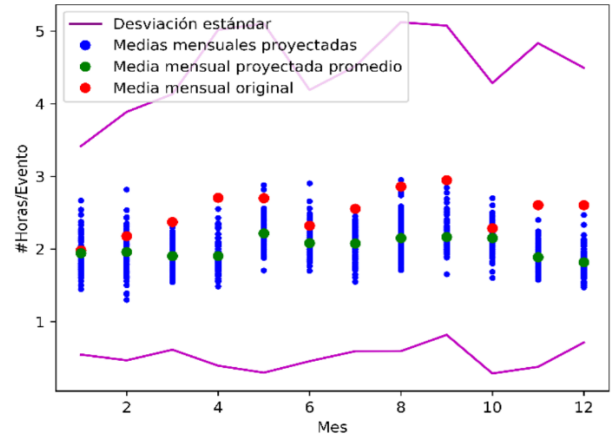


Figura 65. Promedio eventos de precipitación mensual para la estación 48

9.1.1.4 Distancia en horas entre eventos de lluvia al mes

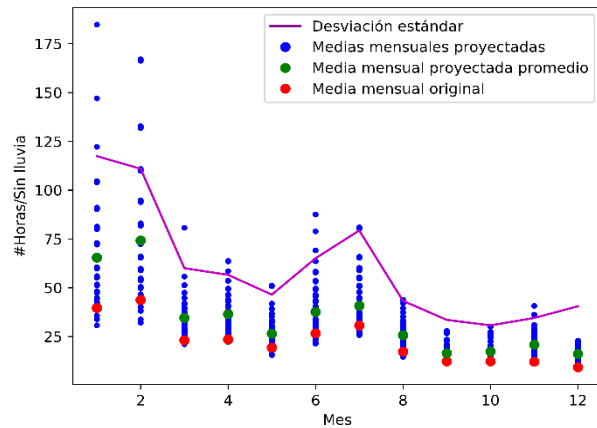


Figura 66. Promedio distancia de precipitación mensual para la estación 3

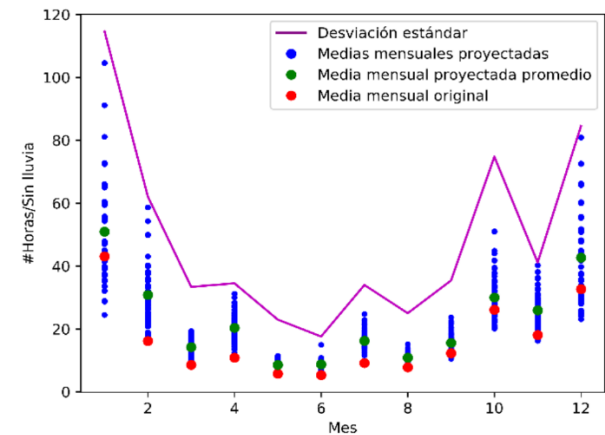


Figura 67. Promedio distancia de precipitación mensual para la estación 12

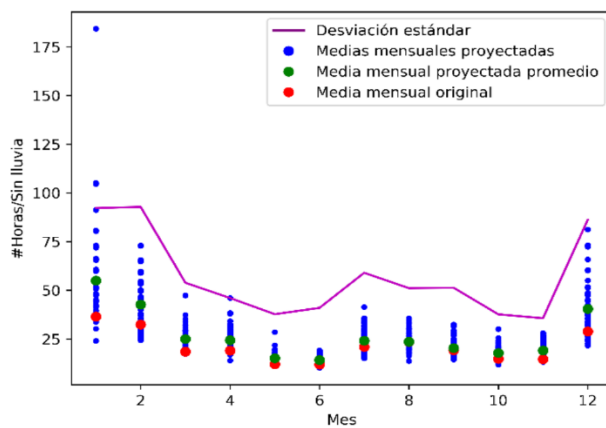


Figura 68. Promedio distancia de precipitación mensual para la estación 25

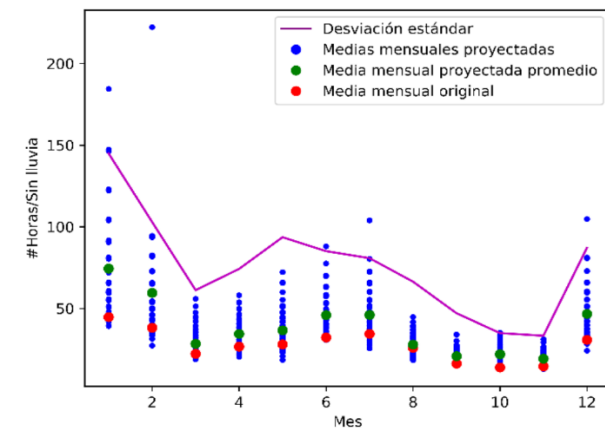


Figura 69. Promedio distancia de precipitación mensual para la estación 28

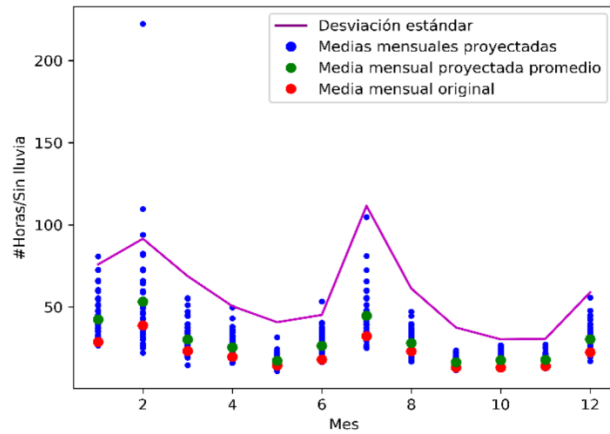


Figura 70. Promedio distancia de precipitación mensual para la estación 31

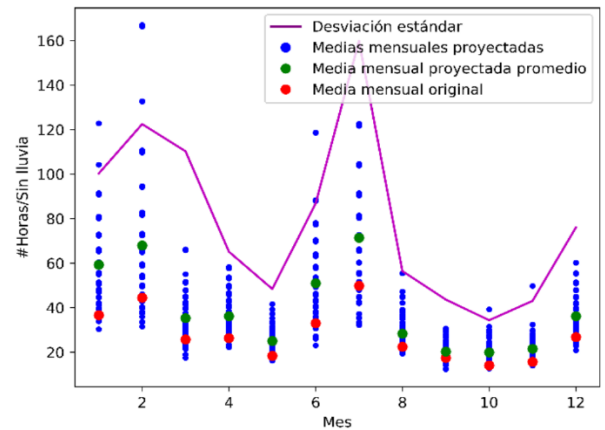


Figura 71. Promedio distancia de precipitación mensual para la estación 38

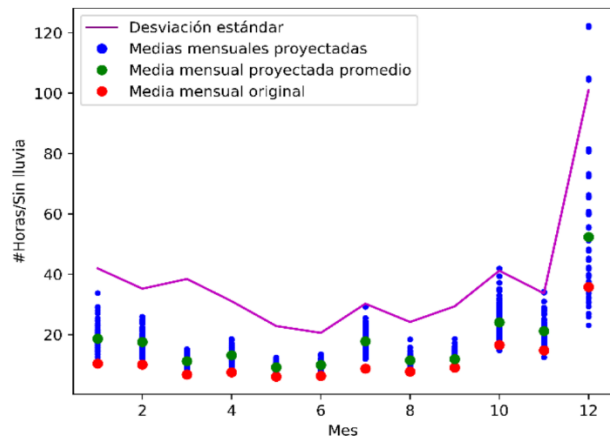


Figura 72. Promedio distancia de precipitación mensual para la estación 44

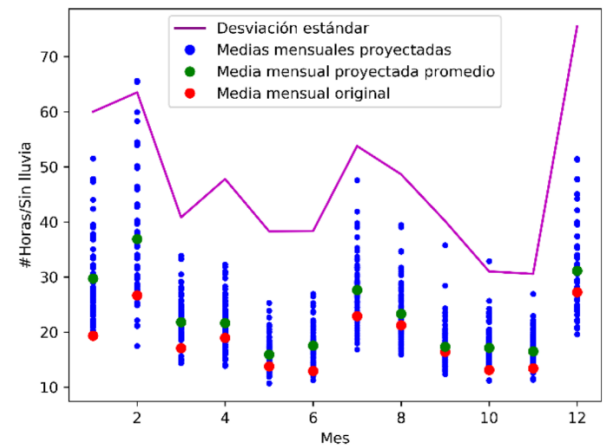


Figura 73. Promedio distancia de precipitación mensual para la estación 48

9.1.2 Concentraciones de PM_{2.5}

9.1.2.1 Ciclo diario

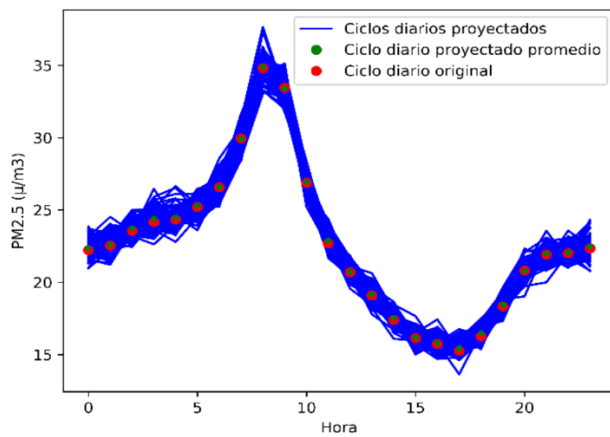


Figura 74. Ciclo diario promedio anual de PM_{2.5} para la estación 3

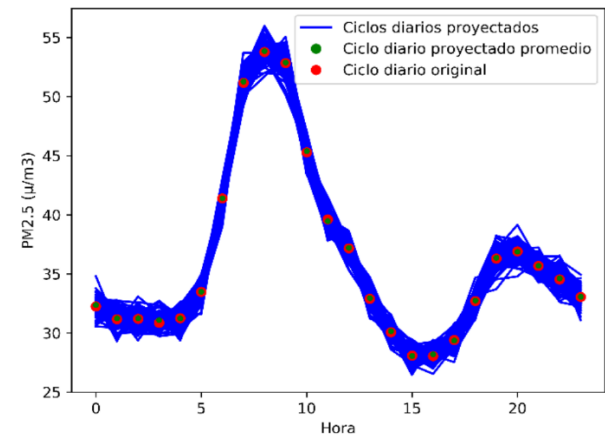


Figura 75. Ciclo diario promedio anual de PM_{2.5} para la estación 12

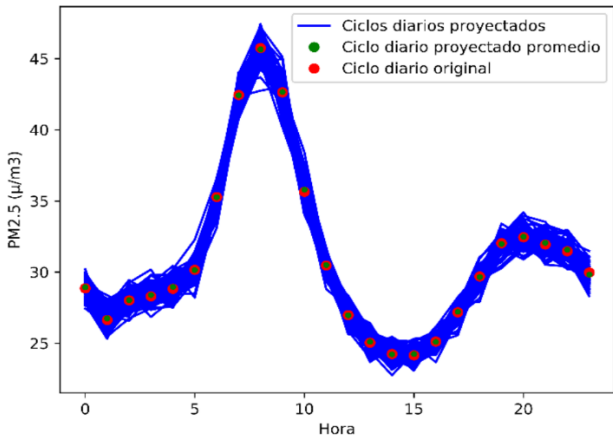


Figura 76. Ciclo diario promedio anual de PM2.5 para la estación 25

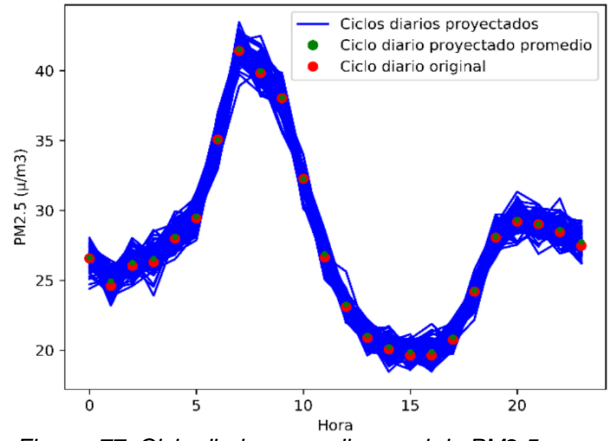


Figura 77. Ciclo diario promedio anual de PM2.5 para la estación 28

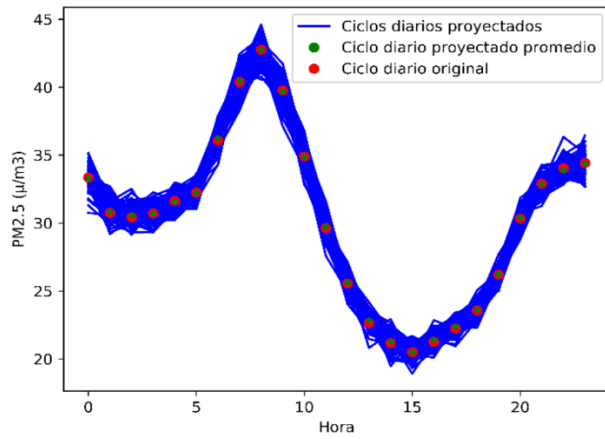


Figura 78. Ciclo diario promedio anual de PM2.5 para la estación 31

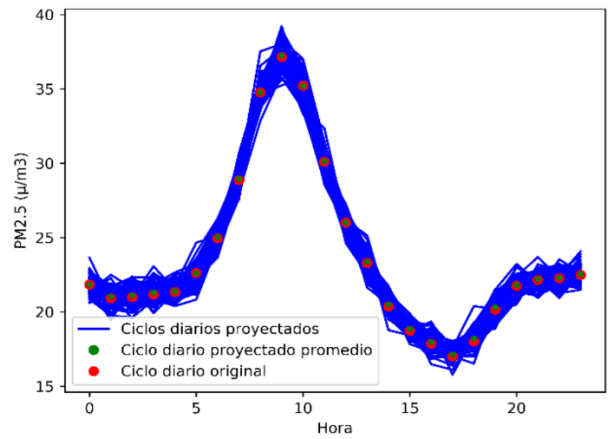


Figura 79. Ciclo diario promedio anual de PM2.5 para la estación 38

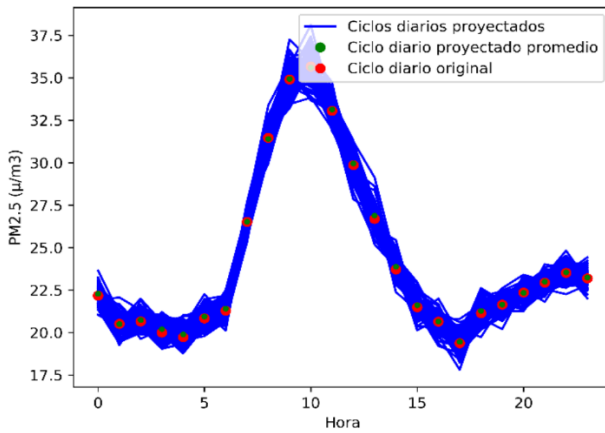


Figura 80. Ciclo diario promedio anual de PM2.5 para la estación 44

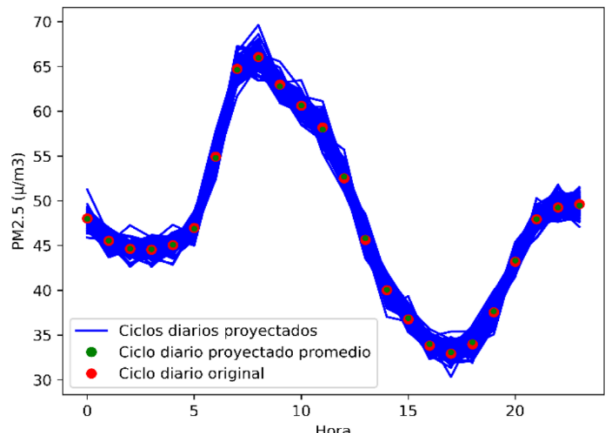


Figura 81. Ciclo diario promedio anual de PM2.5 para la estación 48

9.1.2.2 Promedio mensual horario

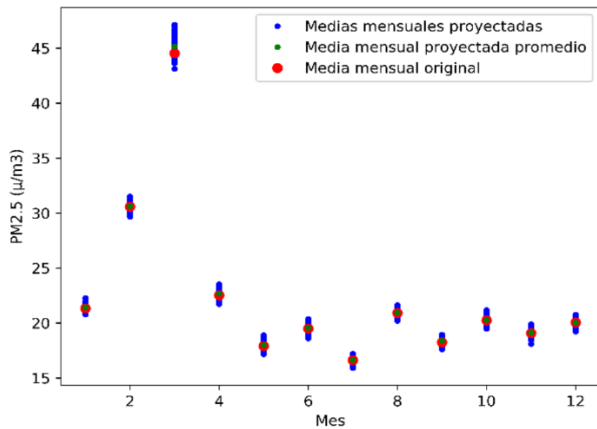


Figura 82. Promedio horario mensual de PM2.5 para la estación 3

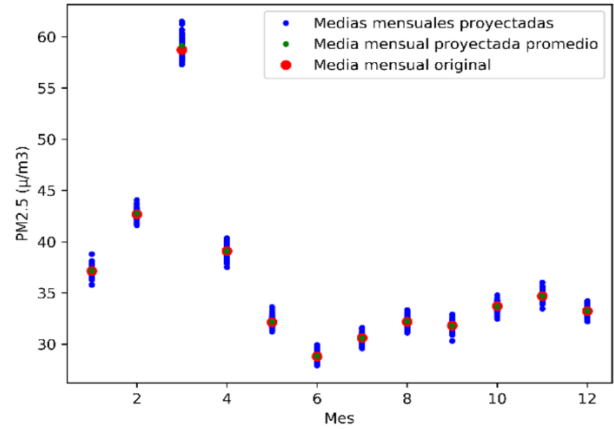


Figura 83. Promedio horario mensual de PM2.5 para la estación 12

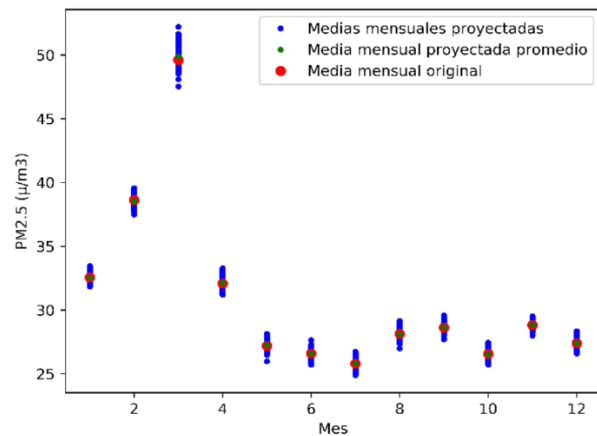


Figura 84. Promedio horario mensual de PM2.5 para la estación 25

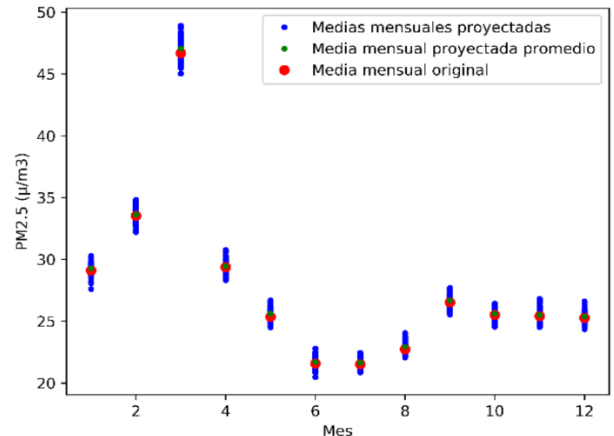


Figura 85. Promedio horario mensual de PM2.5 para la estación 28

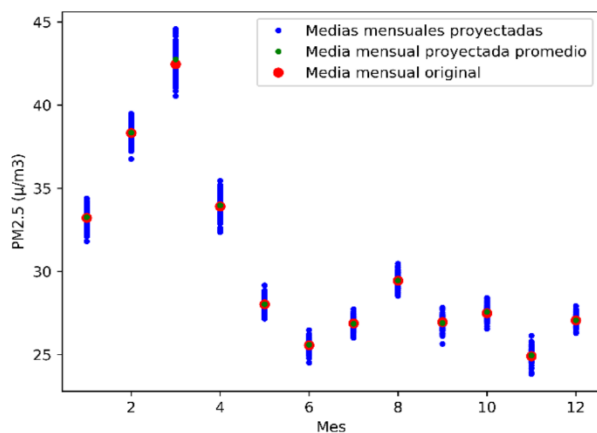


Figura 86. Promedio horario mensual de PM2.5 para la estación 31

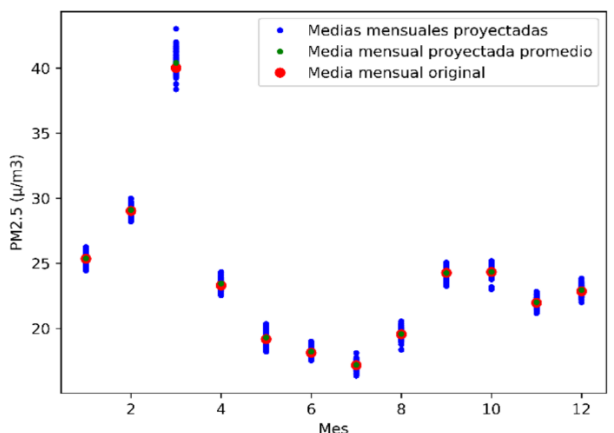


Figura 87. Promedio horario mensual de PM2.5 para la estación 38

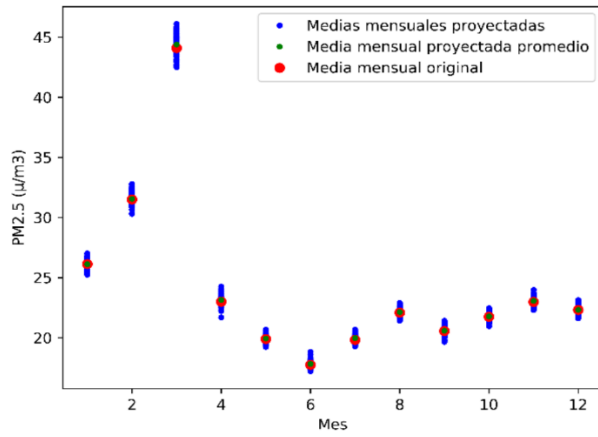


Figura 88. Promedio horario mensual de PM2.5 para la estación 44

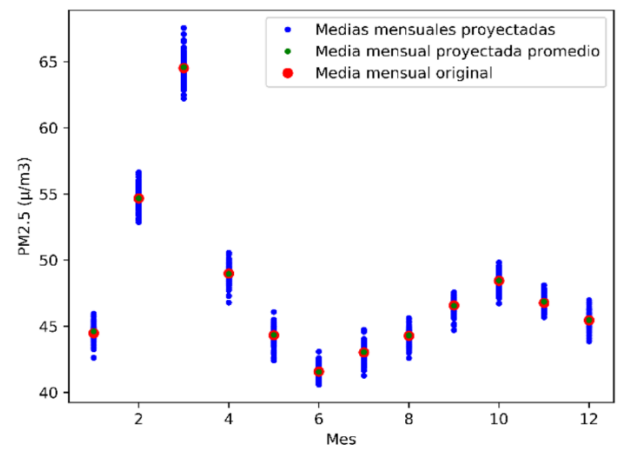


Figura 89. Promedio horario mensual de PM2.5 para la estación 48

9.1.2.3 Ciclo diario por mes

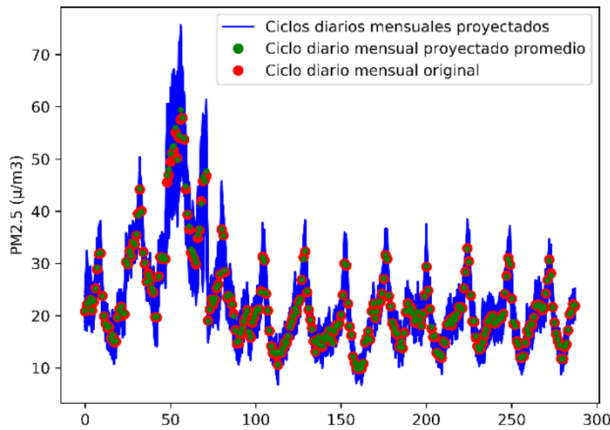


Figura 90. Ciclo diario por mes de PM2.5 para la estación 3

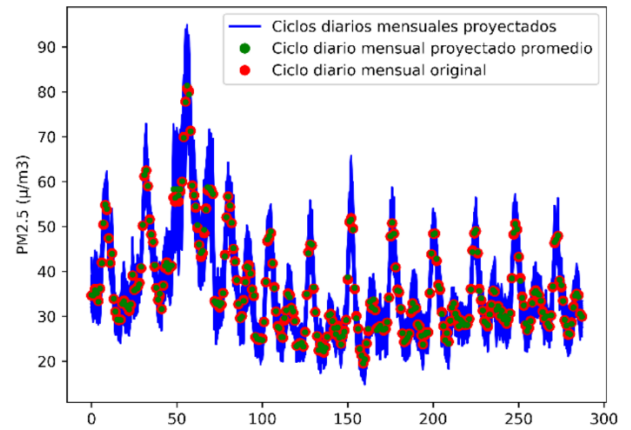


Figura 91. Ciclo diario por mes de PM2.5 para la estación 12

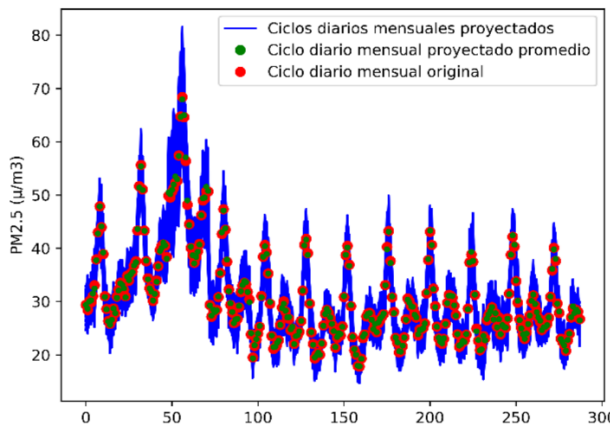


Figura 92. Ciclo diario por mes de PM2.5 para la estación 25

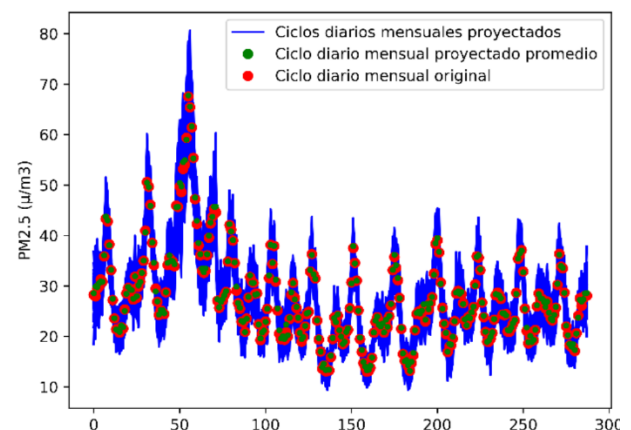


Figura 93. Ciclo diario por mes de PM2.5 para la estación 28

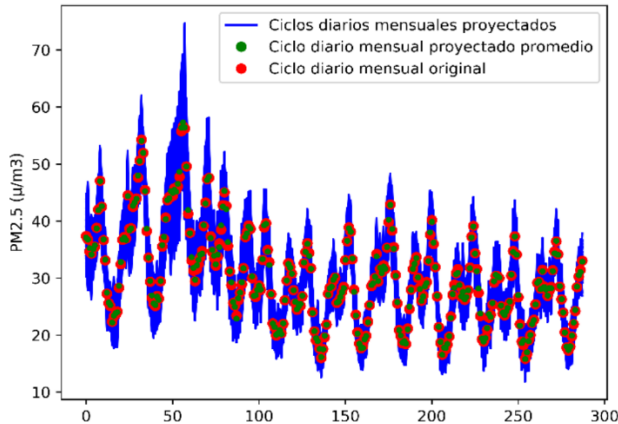


Figura 94. Ciclo diario por mes de PM2.5 para la estación 31

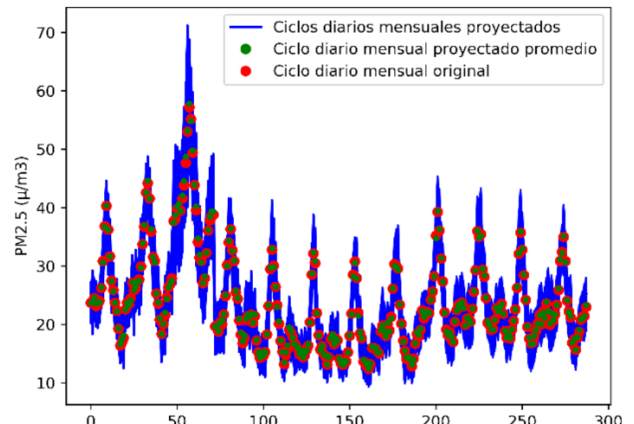


Figura 95. Ciclo diario por mes de PM2.5 para la estación 38

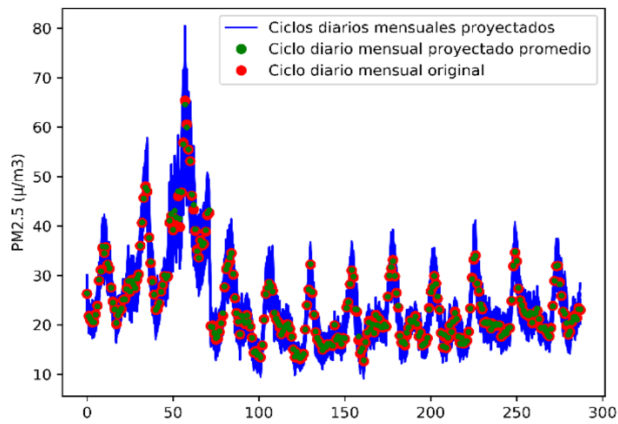


Figura 96. Ciclo diario por mes de PM2.5 para la estación 44

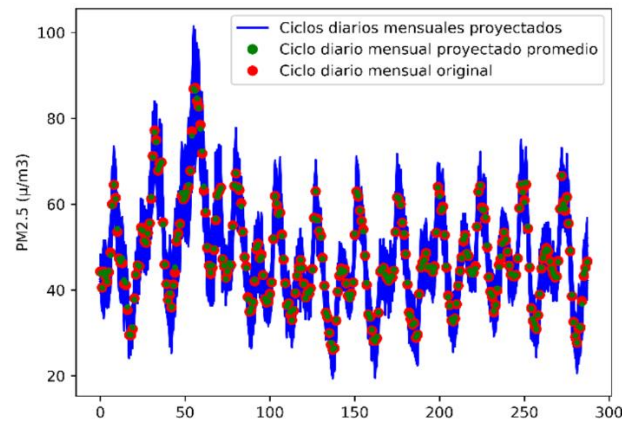


Figura 97. Ciclo diario por mes de PM2.5 para la estación 48

9.1.3 Velocidades de viento

9.1.3.1 Ciclo diario

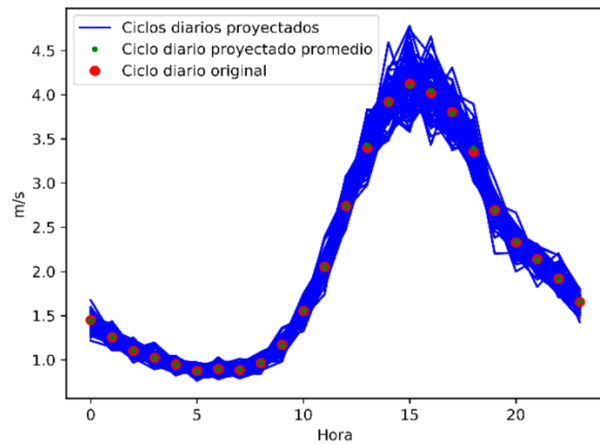


Figura 98. Ciclo diario promedio anual de velocidad de viento para la estación 3

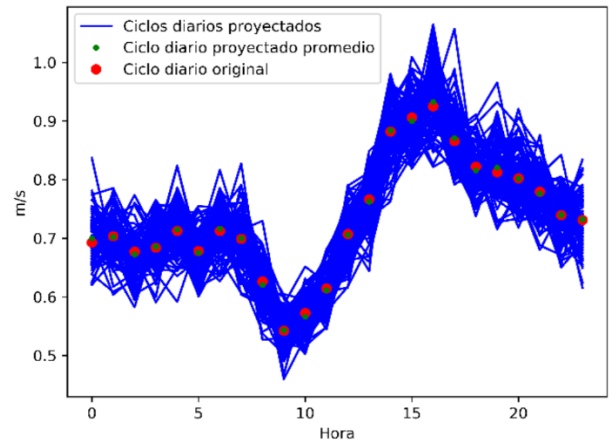


Figura 99. Ciclo diario promedio anual de velocidad de viento para la estación 12

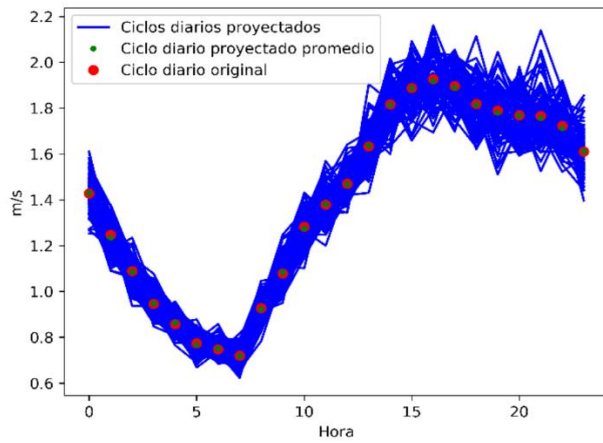


Figura 100. Ciclo diario promedio anual de velocidad del viento para la estación 25

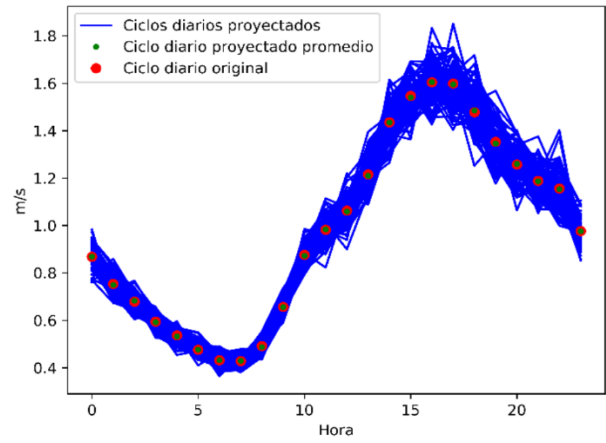


Figura 101. Ciclo diario promedio anual de velocidad del viento para la estación 28

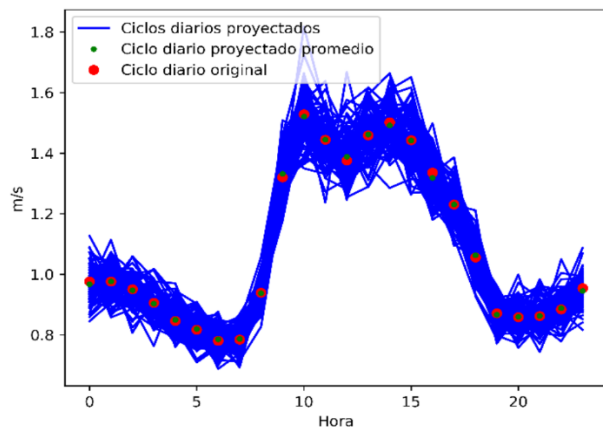


Figura 102. Ciclo diario promedio anual de velocidad del viento para la estación 31

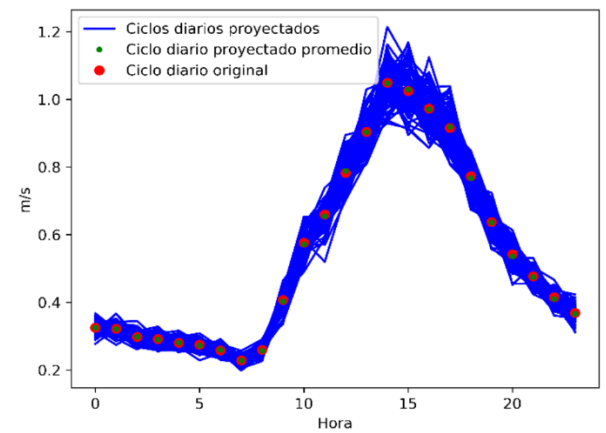


Figura 103. Ciclo diario promedio anual de velocidad del viento para la estación 38

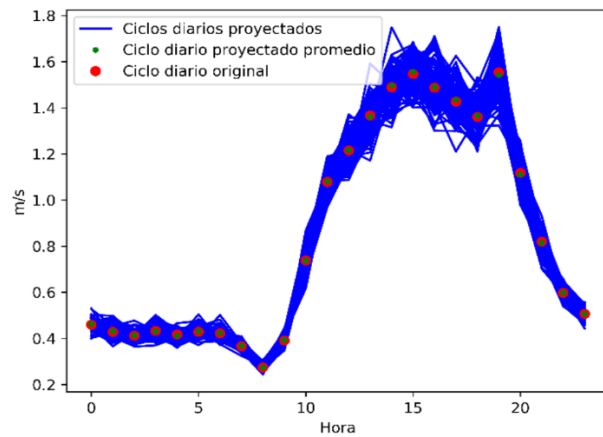


Figura 104. Ciclo diario promedio anual de velocidad del viento para la estación 44

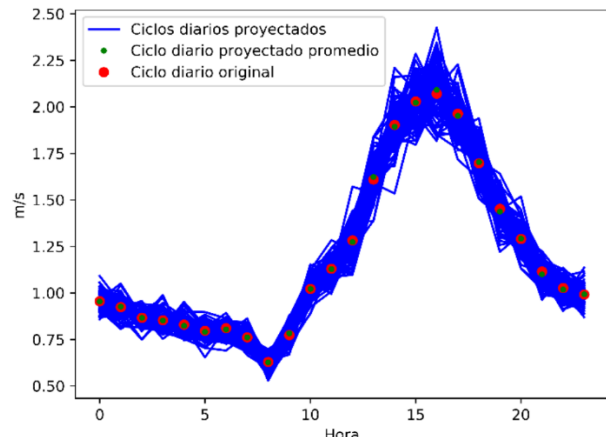


Figura 105. Ciclo diario promedio anual de velocidad del viento para la estación 48

9.1.3.2 Promedio mensual horario

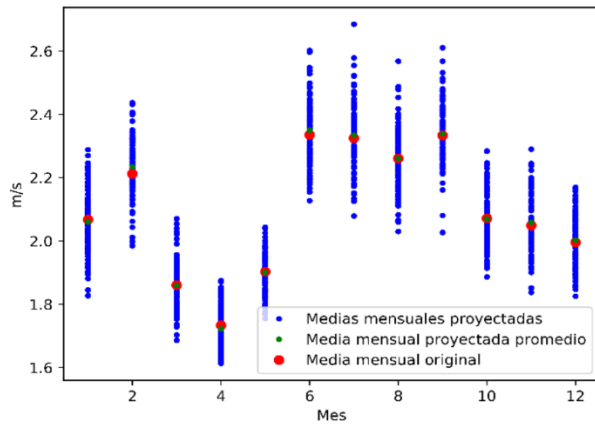


Figura 106. Promedio horario mensual de velocidad del viento para la estación 3

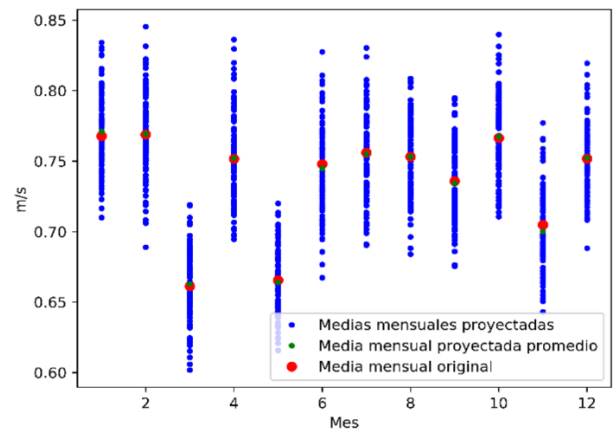


Figura 107. Promedio horario mensual de velocidad del viento para la estación 12

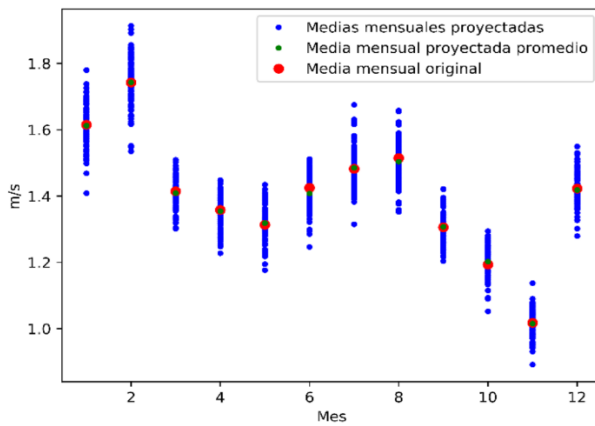


Figura 108. Promedio horario mensual de velocidad del viento para la estación 25

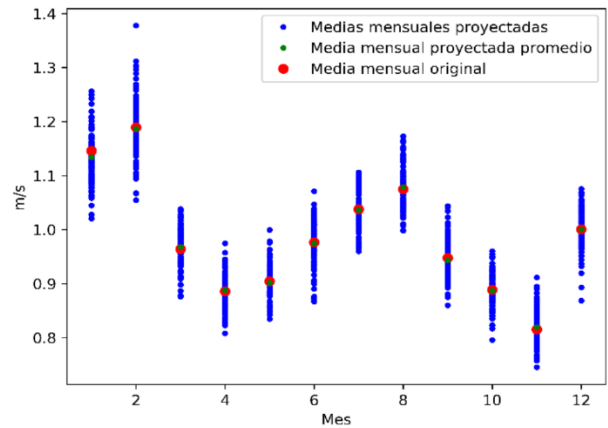


Figura 109. Promedio horario mensual de PM2.5 para la estación 28

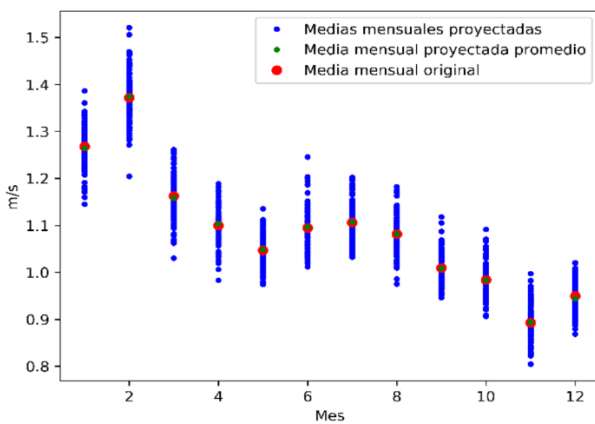


Figura 110. Promedio horario mensual de velocidad del viento para la estación 31

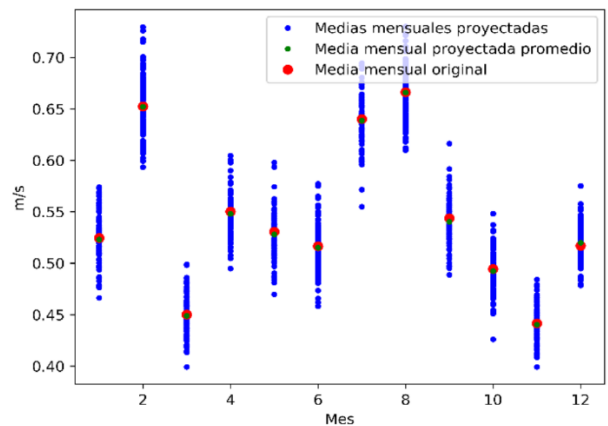


Figura 111. Promedio horario mensual de PM2.5 para la estación 38

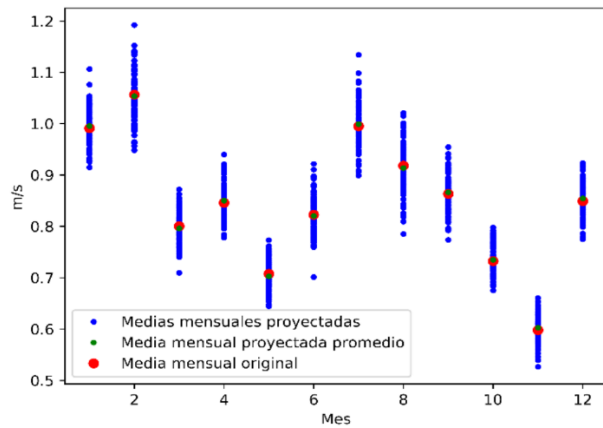


Figura 112. Promedio horario mensual de velocidad del viento para la estación 44

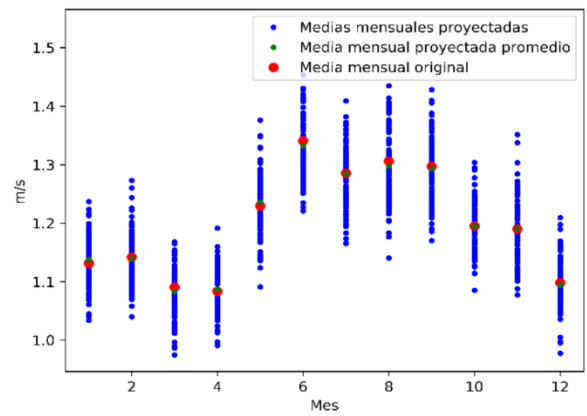


Figura 113. Promedio horario mensual de velocidad del viento para la estación 48

9.1.3.3 Ciclo diario por mes

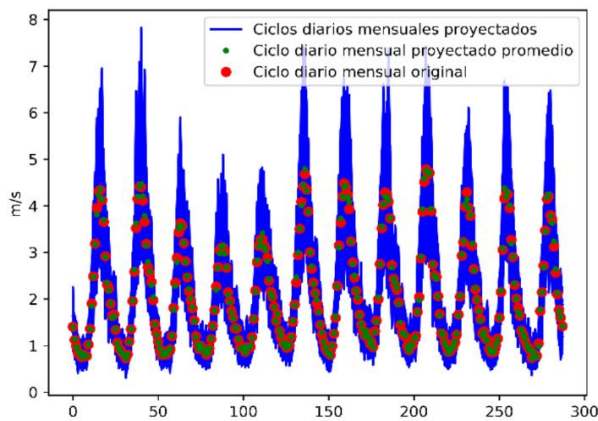


Figura 114. Ciclo diario por mes de velocidad del viento para la estación 3

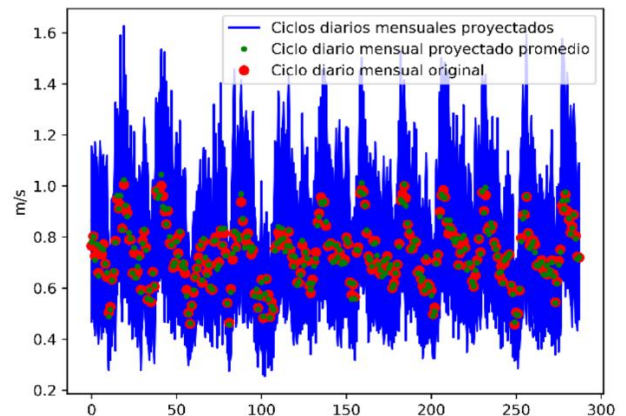


Figura 115. Ciclo diario por mes de velocidad del viento para la estación 12

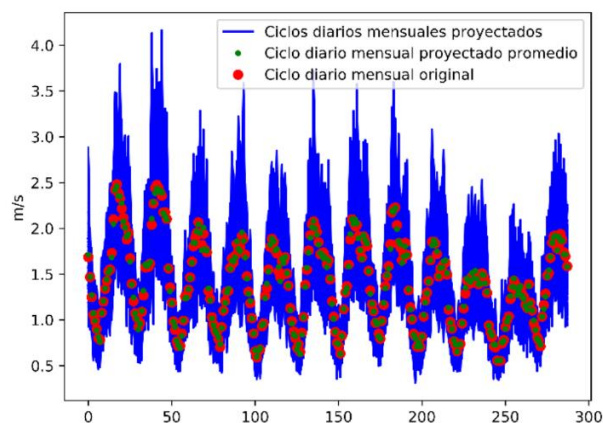


Figura 116. Ciclo diario por mes de velocidad del viento para la estación 25

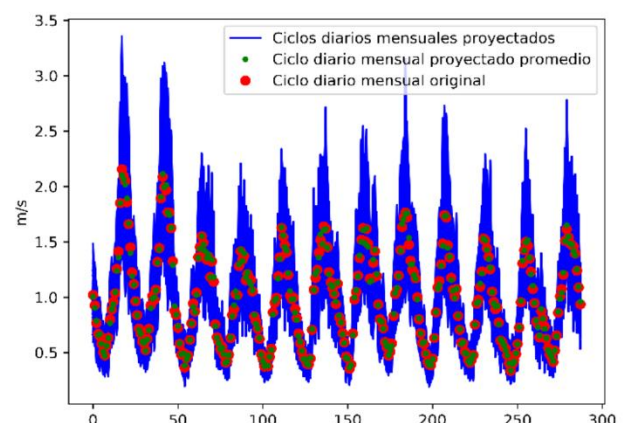


Figura 117. Ciclo diario por mes de velocidad del viento para la estación 28

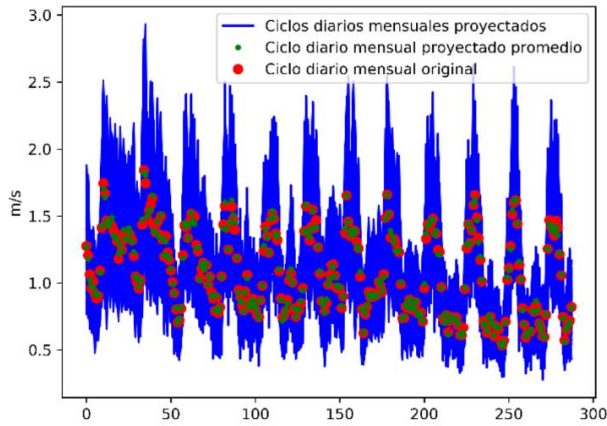


Figura 118. Ciclo diario por mes de velocidad del viento para la estación 31

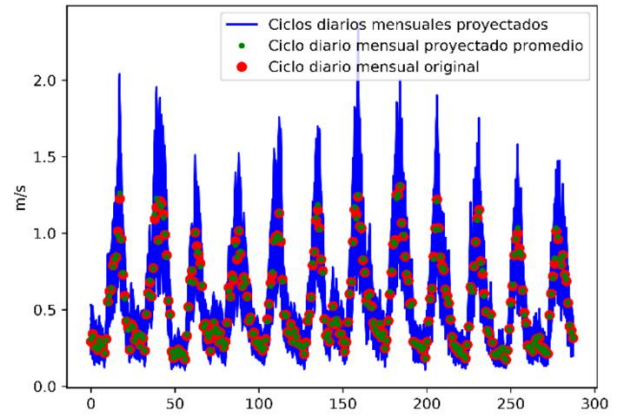


Figura 119. Ciclo diario por mes de velocidad del viento para la estación 38

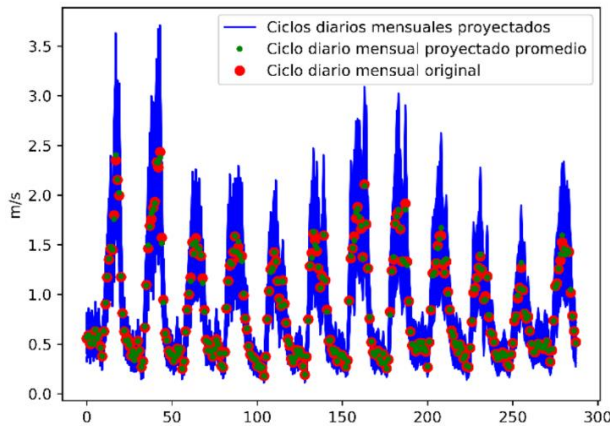


Figura 120. Ciclo diario por mes de velocidad del viento para la estación 44

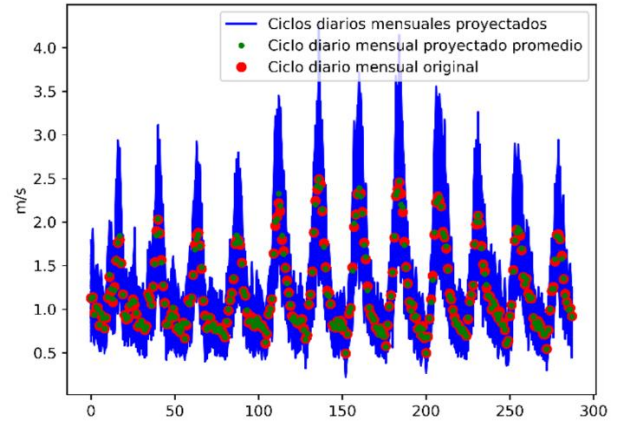


Figura 121. Ciclo diario por mes de velocidad del viento para la estación 48

9.2 GRÁFICA DE CAJAS Y BIGOTES DE LA REMOCIÓN DE PM2.5 POR MES

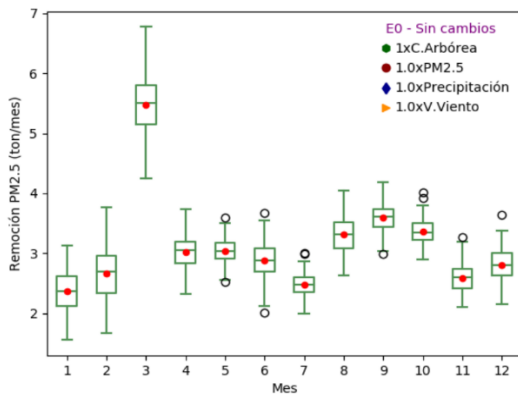


Figura 122. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario cero (E0)

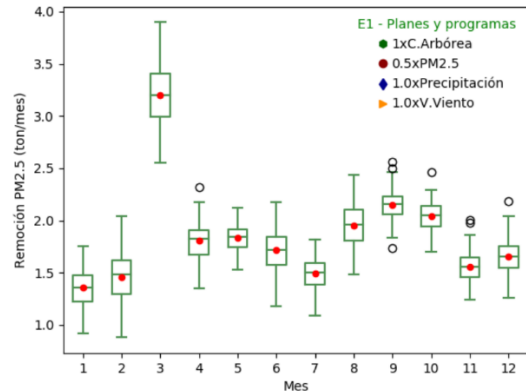


Figura 123. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario uno (E1)

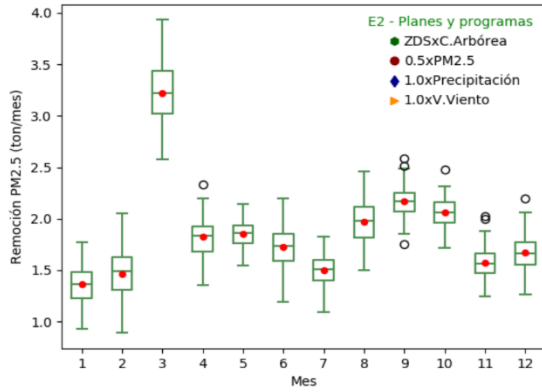


Figura 124. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario dos (E2)

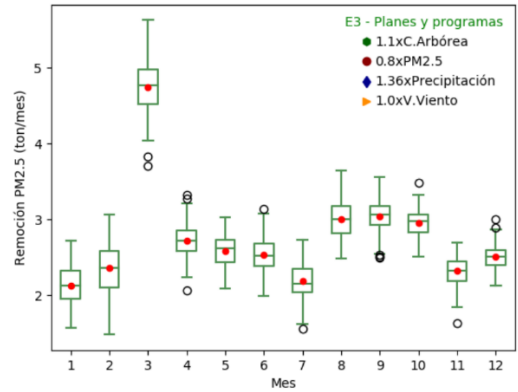


Figura 125. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario tres (E3)

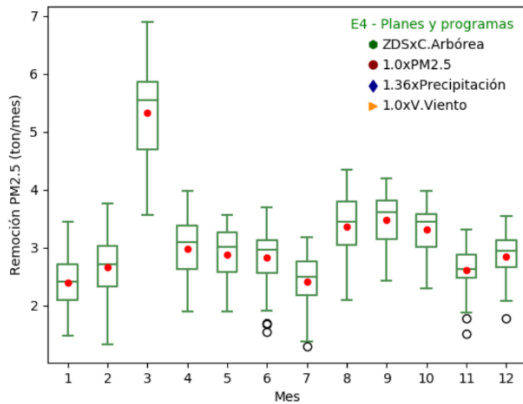


Figura 126. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario cuatro (E4)

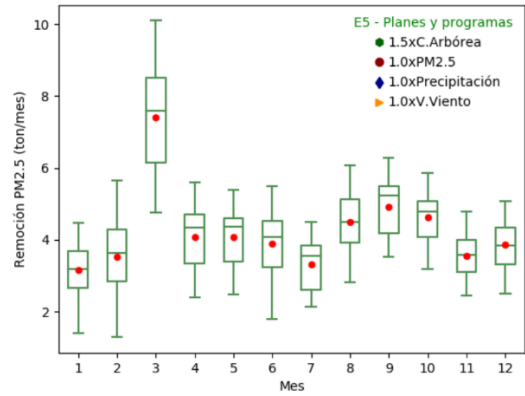


Figura 127. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario cinco (E5)

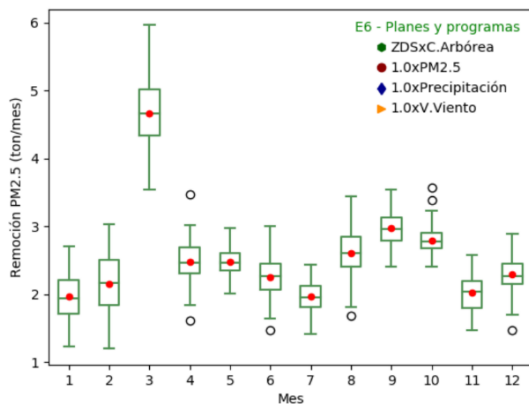


Figura 128. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario seis (E6)

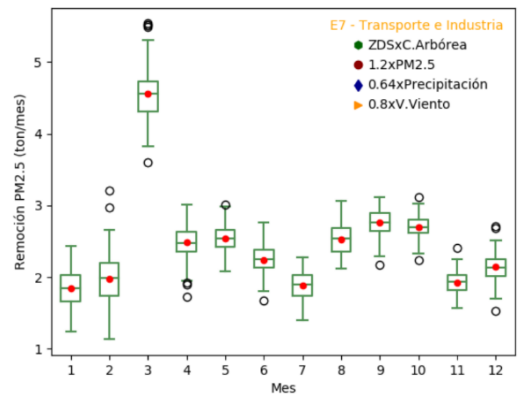


Figura 129. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario siete (E7)

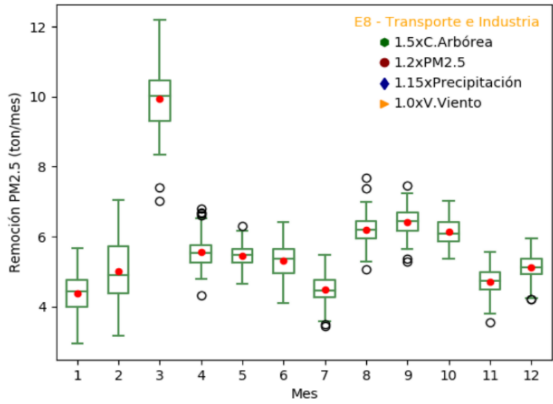


Figura 130. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario ocho (E8)

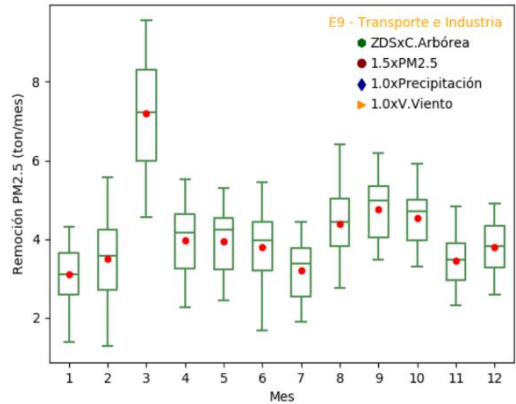


Figura 131. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario nueve (E9)

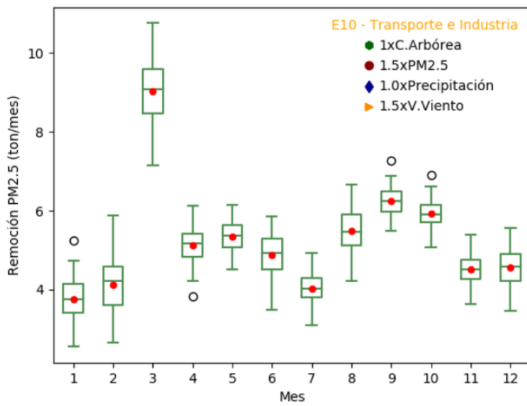


Figura 132. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario diez (E10)

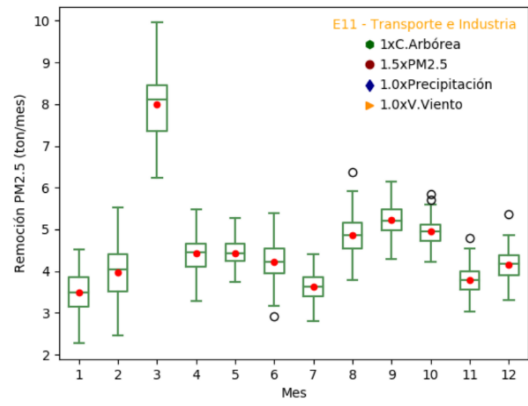


Figura 133. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario once (E11)

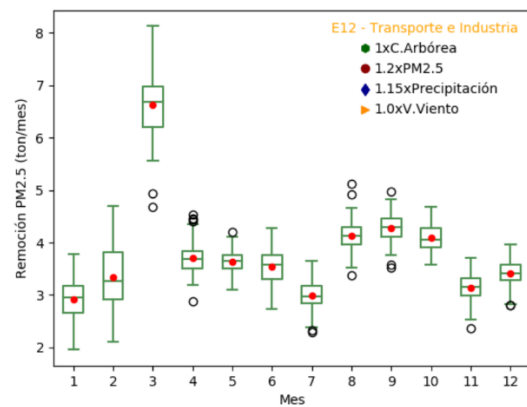


Figura 134. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario doce (E12)

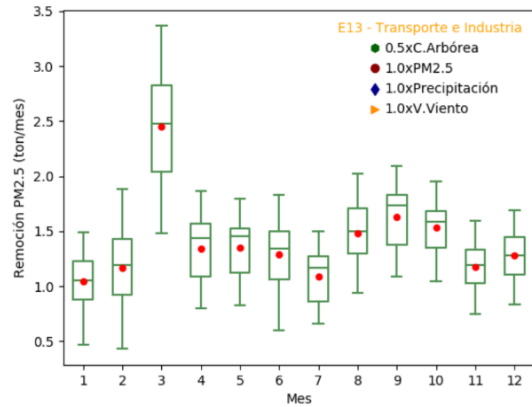


Figura 135. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario trece (E13)

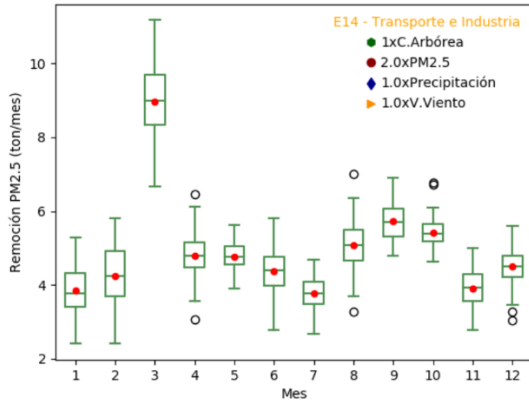


Figura 136. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario catorce (E14)

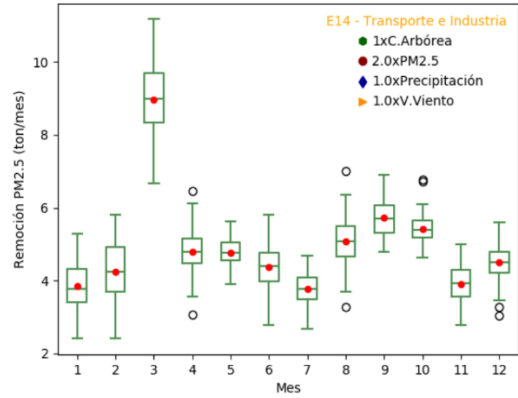


Figura 137. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario quince (E15)

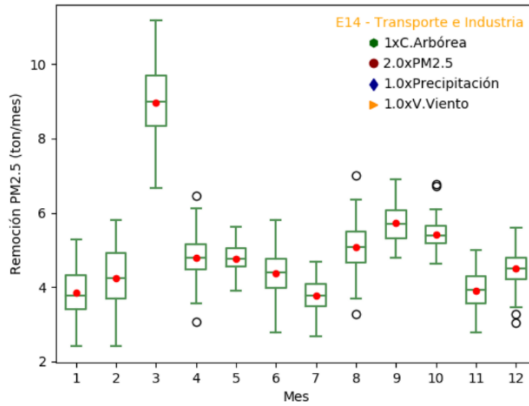


Figura 138. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario dieciséis (E16)

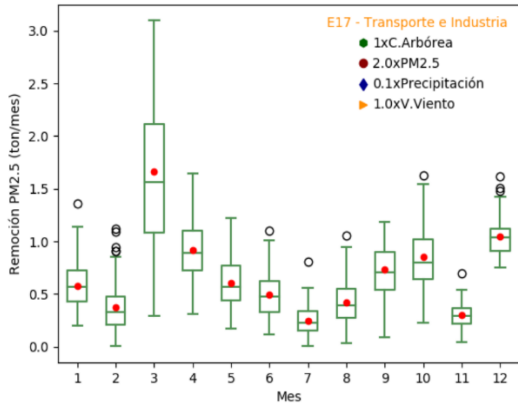


Figura 139. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario diecisiete (E17)

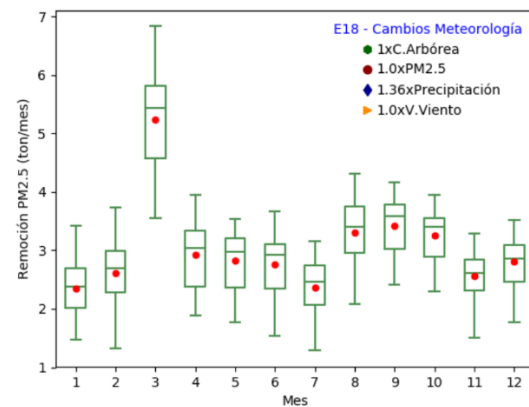


Figura 140. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario dieciocho (E18)

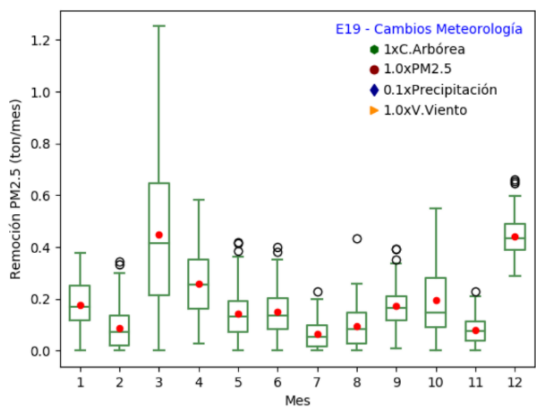


Figura 141. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario diecinueve (E19)

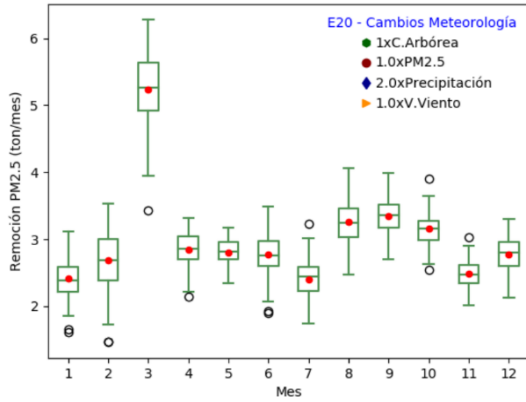


Figura 142. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario veinte (E20)

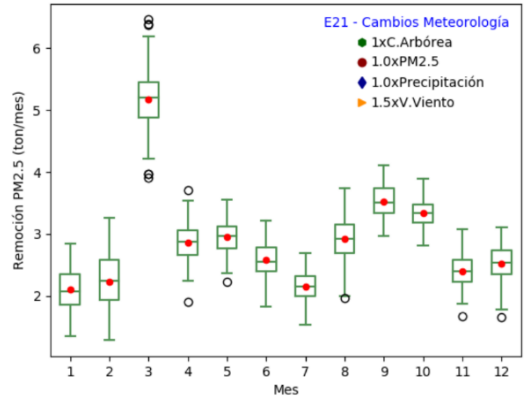


Figura 143. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario veintiuno (E21)

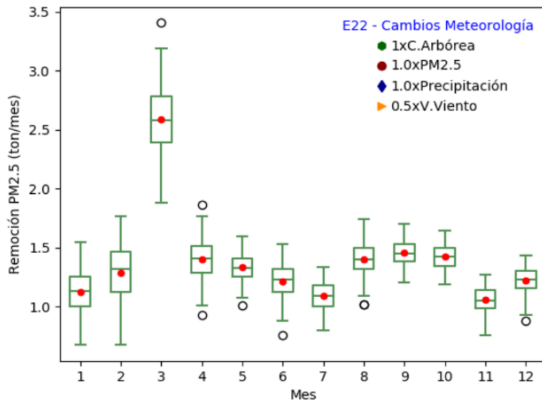


Figura 144. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario veintidós (E22)

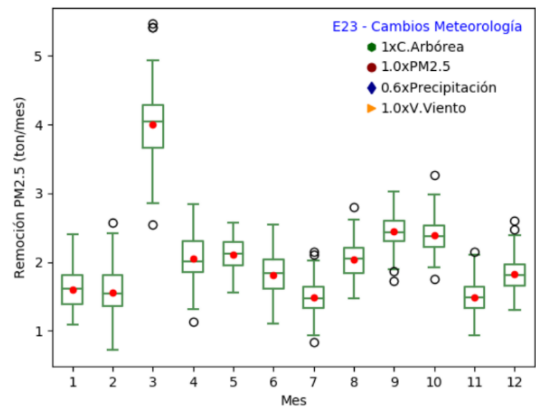


Figura 145. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario veintitrés (E23)

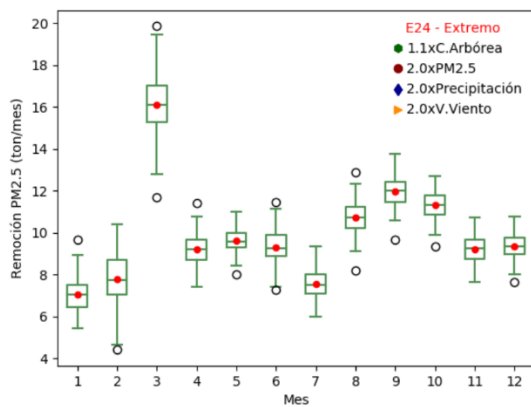


Figura 146. Remoción de PM2.5 (ton/mes) por mes para escenario veinticuatro (E24)

9.3 GRÁFICA DE CAJAS Y BIGOTES DE REMOCIÓN DE PM2.5 POR ESTACIÓN

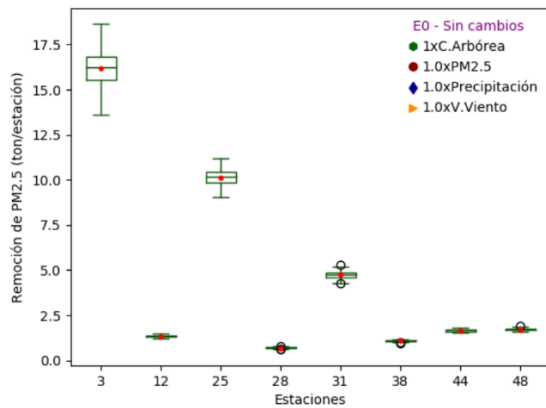


Figura 147. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario cero (E0)

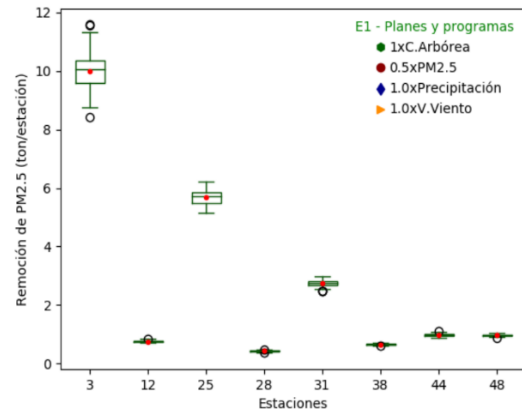


Figura 148. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario uno (E1)

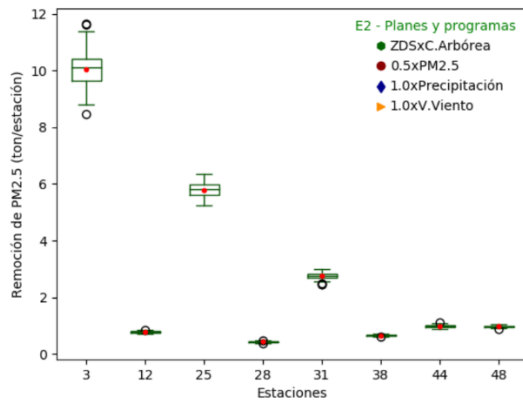


Figura 149. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario dos (E2)

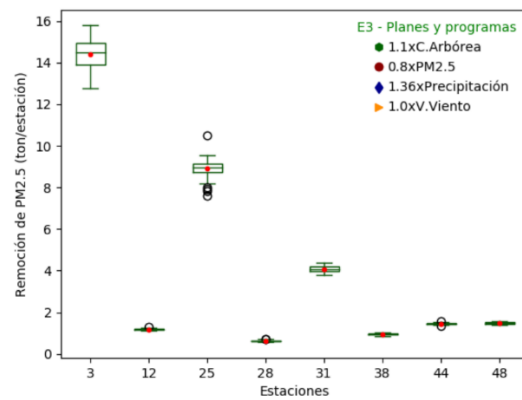


Figura 150. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario tres (E3)

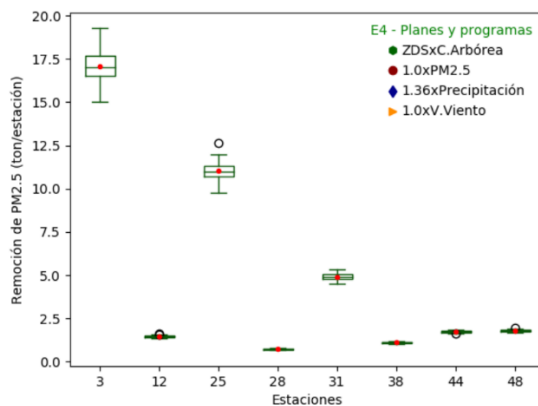


Figura 151. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario cuatro (E4)

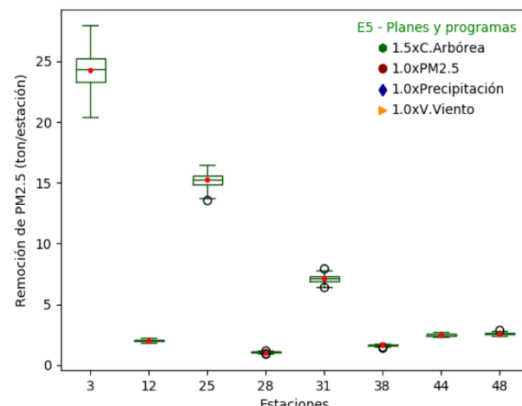


Figura 152. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario cinco (E5)

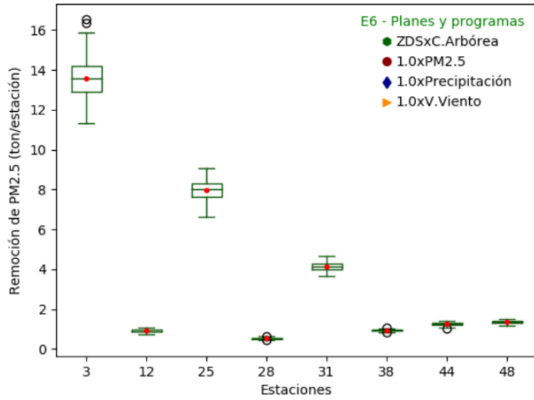


Figura 153. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario seis (E6)

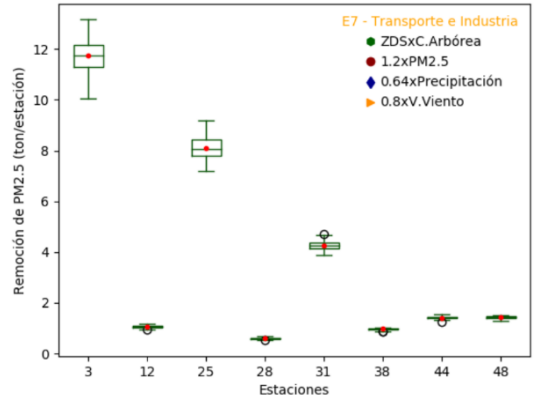


Figura 154. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario siete (E7)

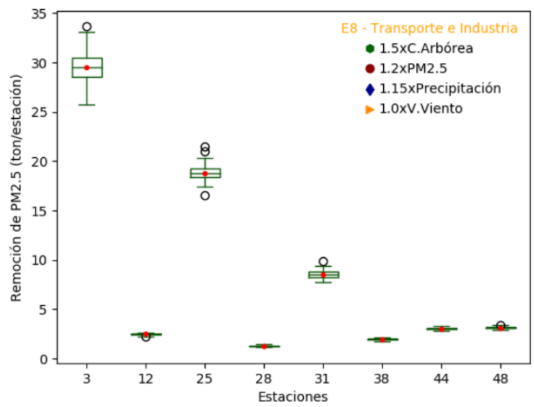


Figura 155. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario ocho (E8)

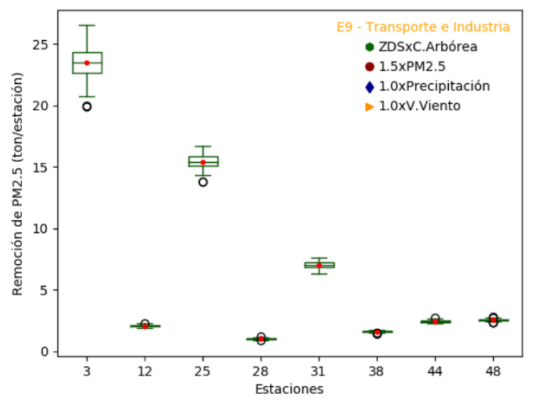


Figura 156. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario nueve (E9)

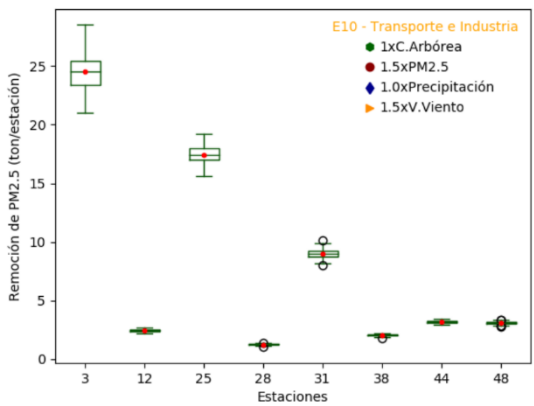


Figura 157. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario diez (E10)

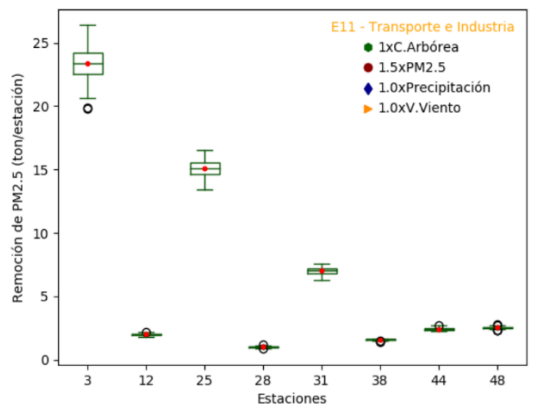


Figura 158. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario once (E11)

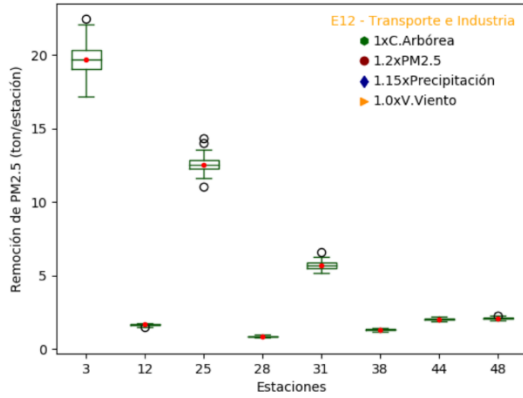


Figura 159. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario doce (E12)

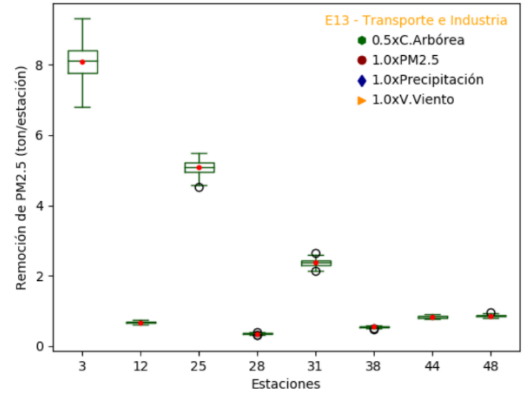


Figura 160. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario trece (E13)

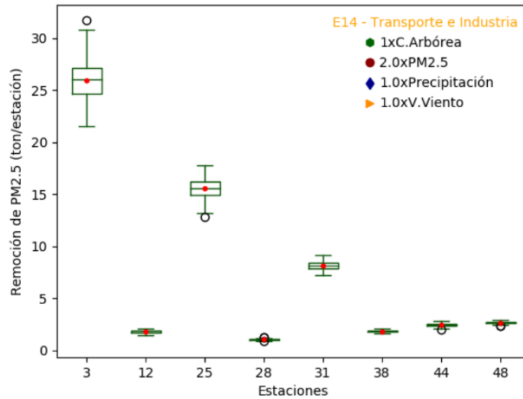


Figura 161. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario catorce (E14)

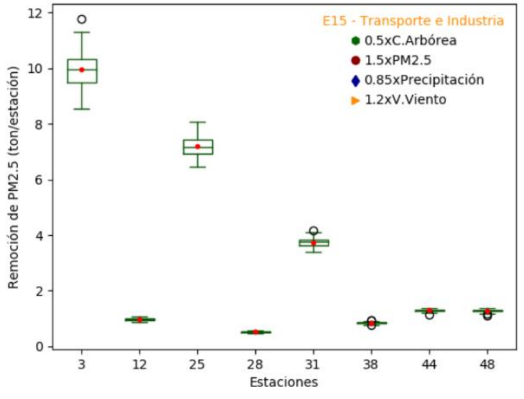


Figura 162. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario quince (E15)

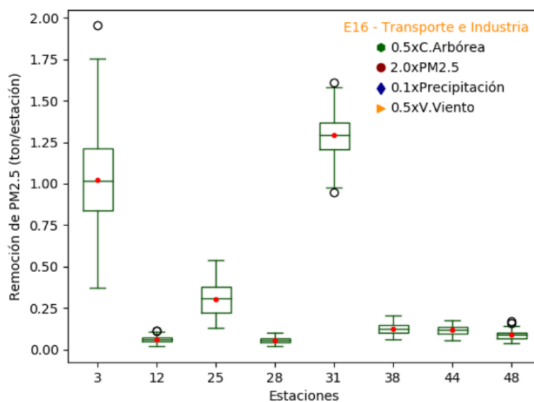


Figura 163. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario dieciséis (E16)

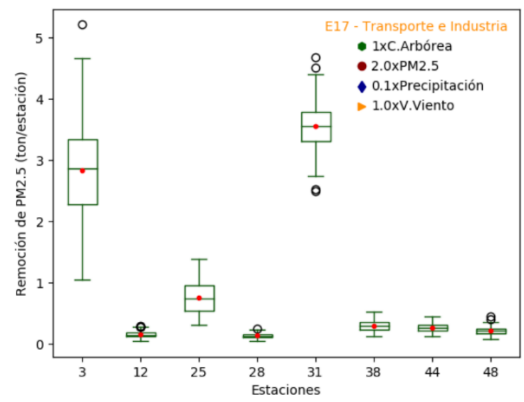


Figura 164. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario diecisiete (E17)

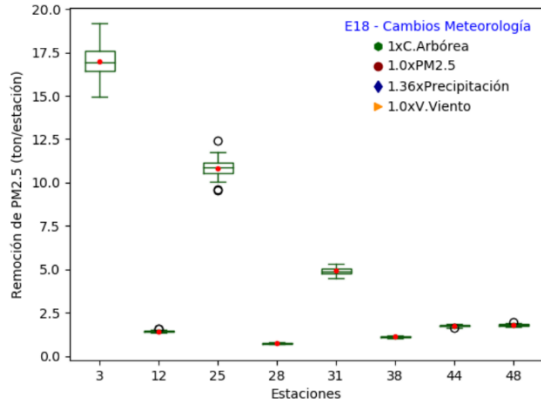


Figura 165. Remoción de PM_{2.5} (ton/estación) por estación para escenario dieciocho (E18)

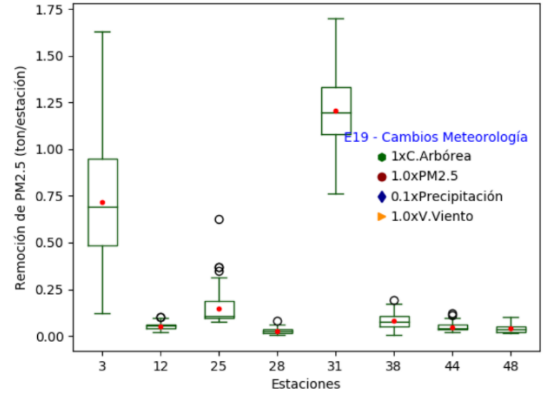


Figura 166. Remoción de PM_{2.5} (ton/estación) por estación para escenario diecinueve (E19)

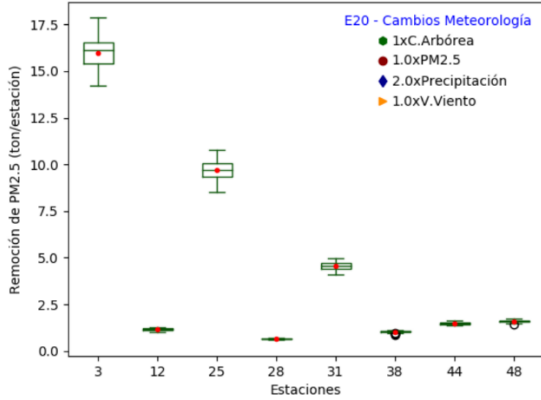


Figura 167. Remoción de PM_{2.5} (ton/estación) por estación para escenario veinte (E20)

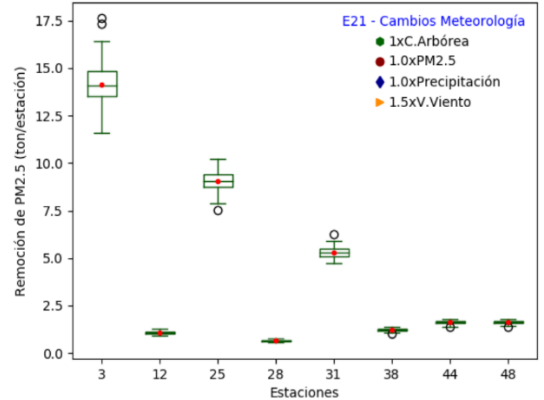


Figura 168. Remoción de PM_{2.5} (ton/estación) por estación para escenario veintiuno (E21)

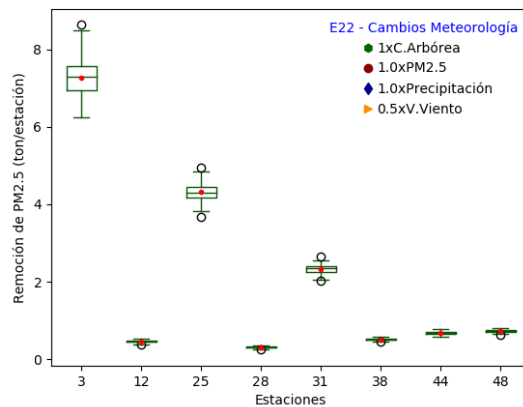


Figura 169. Remoción de PM_{2.5} (ton/estación) por estación para escenario veintidós (E22)

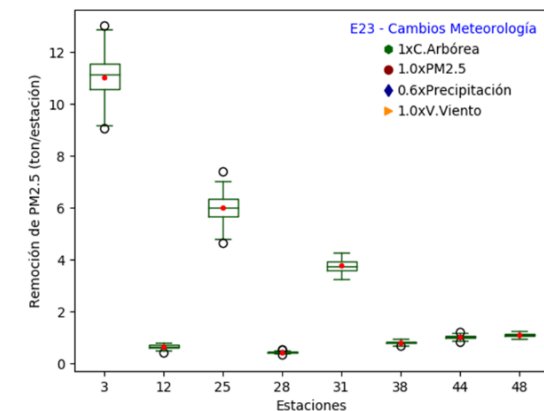


Figura 170. Remoción de PM_{2.5} (ton/estación) por estación para escenario veintitrés (E23)

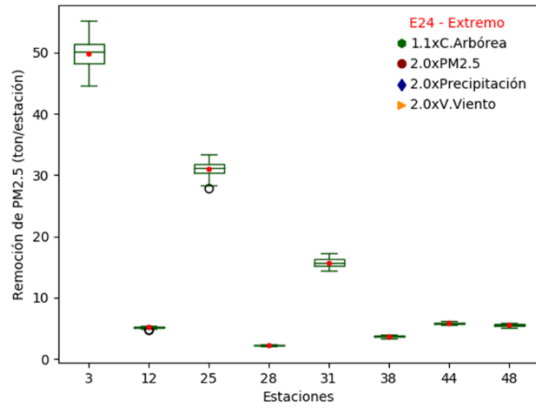


Figura 171. Remoción de PM2.5 (ton/estación) por estación para escenario veinticuatro (E24)

9.4 CÓDIGO DESARROLLADO EN LENGUAJE PYTHON DEL MODELO UFORE

```
""" ***** """
```

ANEXO: CÓDIGO DESARROLLADO PARA EL MODELO UFORE

Autor: Daniela Velásquez Ciro (daniela.velasquez.ciro@gmail.com; daniela.velasquezc@udea.edu.co)

Año: 2019

Este código se construyó usando lenguaje python para calcular la remoción de contaminación PM2.5 por el arbolado urbano, siguiendo la metodología UFORE.

Este es un anexo del trabajo de investigación " Estimación de la remoción de PM2.5 por el arbolado urbano en el Valle de Aburrá "

El desarrollo se hace siguiendo las referencias: Hirabayashi et al. (2015) y Nowak et al (2013)

```
""" ***** """
```

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
```

Created on Mon May 13 14:29:04 2019

1.Script_Ecuaciones: Este script corre el escenario

```
"""
```

```
def escenario(ppm25,pvv,plluv,pathcob,num_esc):
    """
```

Esta función esta definida para calcular la remoción por mes, por estación y total para un escenario

ppm25: ubicación de df con PM2.5
pvv: ubicación de df con Velocidad del viento
plluv: ubicación de df con precipitación
pathcob: ubicación de df con cobertura
num_esc: número del escenario

```
"""
```

```
while True:
    try:
```

```
        """ 1) Importando librerías """
```

```
        import pandas as pd
        import os
        import PM25_remocion_matriz as PM25 #Este modulo calcula la remoción para cada estación (revisar Script 2)
        from datetime import datetime
        inicio = datetime.now()
```

```
        print('El escenario {0} inicia ahora: '.format(str(num_esc)) + str(inicio.strftime("%H:%M:%S")))
        """ 2) Dirección de las carpetas para guardado y declarando variables"""
```

```
        pathG = '/home/daniela/GDrive/T_Investigacion_Compu/Investigacion/Escenarios/Resultados/' #carpeta principal de guardado
```

```
        ests = [3,12,25,28,31,38,44,48] #Estaciones que se van a usar
```

```
        os.mkdir(pathG + 'Escenario_{0}/'.format(num_esc)) #Creando el directorio para guardar los resultados del escenario
        pathR = pathG + 'Escenario_{0}/'.format(num_esc) #Declarando la dirección del directorio
```

```
        rests = pd.DataFrame({}) #Dataframe para remoción por estación en ceros
        rmes = pd.DataFrame({}) #Dataframe para remoción por mes en ceros
```

```
        """ 5) Ciclo For sobre las estaciones"""
```

```
        for st in ests:
            os.mkdir(pathG + 'Escenario_{0}/Estacion_{1}/'.format(str(num_esc),str(st))) #Creando carpeta de guardado de resultados por estación
            pathEs = pathG + 'Escenario_{0}/Estacion_{1}/'.format(str(num_esc),str(st)) #Declarando la dirección de la carpeta
```

```
            lluvia = pd.read_csv(plluv + 'Precipitacion_Estacion_{0}.csv'.format(str(st)),
                                  index_col = 0, parse_dates = True) #Llamando el df de la precipitación horaria para esta estación
```

```
            pm25 = pd.read_csv(ppm25 + 'PM25_{0}.csv'.format(str(st)),
                                 index_col = 0, parse_dates = True) #Llamando el df de concentraciones horarias de PM2.5 para esta estación
```

```
            viento = pd.read_csv(pvv + 'vientos_Estacion_{0}.csv'.format(str(st)),
                                   index_col = 0, parse_dates = True) #Llamando el df de las velocidades promedio horarias para esta estación
```

```
            iaf = pd.read_csv(pathcob , index_col=['Codigo']) #Áreas de cobertura arborea por índice de área foliar
```

```

""" 6) Calculando la remoción de PM2.5 """

#Ejecutando la función que calcula la remoción (Ver Script 2)
FtPM25, AcPM25, AwPM25, Rest = PM25.pm25_2017(pm25, lluvia, viento, iaf, st)

#FtPM25 flujo por hora por estación en g/h
#AcPM25 acumulación total por estación en g/h
#AwPM25 lavado o remoción por estación en g/h
#Rest remoción total anual en g/año

#Guardando dataframes con resultados
FtPM25.to_csv(pathEs + 'Flujo_E{0}.csv'.format(str(st)))
AcPM25.to_csv(pathEs + 'Acum_E{0}.csv'.format(str(st)))
AwPM25.to_csv(pathEs + 'Remo_E{0}.csv'.format(str(st)))
Rest.to_csv(pathEs + 'Rtotal_E{0}.csv'.format(str(st)))

#Sumando al flujo lavado el flujo remanente en la última hora del a'p
AcPM25[AcPM25.index != '2017-12-31 23:00:00'] = 0.0 #'2017-12-31 23:00:00'
tf = AwPM25.add(AcPM25, fill_value = 0)

#Calculando remoción por mes
RestMes = tf.divide(10**6).groupby(tf.index.month).sum() #Sumando por mes y convirtiendo g/mes a ton/mes
rmes = rmes.add(RestMes, fill_value = 0) #Sumando valores entre estaciones

""" 7) Unir en un dataframe cada columna de una estación y calcular la remoción total"""

rests[st] = Rest.divide(10**6) #g/año a ton/año #dataframe que une la remoción de cada estación

#Guardando resultados finales

rmes.to_csv(pathR + 'Remo_Mes_Esc{0}.csv'.format(str(num_esc))) #guardando por mes total
rests.to_csv(pathR + 'R_Estaciones_EscAct.csv') #guardando dataframe con estaciones

resc = rests.sum(axis = 1) #Dataframe de cada escenario
resc.to_csv(pathR + 'Total_Escenario_{0}.csv'.format(str(num_esc))) #guardando para escenario

final = datetime.now()

tiempo = final - inicio

print('Con el escenario {0} el tiempo total transcurrido es '.format(str(num_esc)) + str(tiempo))
print('\a')

print('El escenario {0} finaliza ahora: '.format(str(num_esc)) + str(final.strftime("%H:%M:%S")))
print('\a')

#Aviso de finalización del escenario
import subprocess
subprocess.call(['speech-dispatcher']) #start speech dispatcher
subprocess.call(['spd-say', '" aaa your code has finished "'])

#Control de errores
break

except Exception as exp:

    print(exp)
    final = datetime.now()
    print('Ha fallado ahora: ' + str(final.strftime("%H:%M:%S")))
    print('\a')
    import subprocess
    subprocess.call(['speech-dispatcher']) #start speech dispatcher
    subprocess.call(['spd-say', '" ey ey ey ey your code has failed, your code has stopped "'])
    break

""" ***** """

#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Tue Jan 22 09:36:21 2019

2.Script_Remoción: Este segundo script evalúa la remoción para material particulado PM25
"""

```

```

def pm25_2017(pm25, lluvia, viento, iaf, e):
    """
    Función para el cálculo de la remoción para el escenario de remoción en una estación
    pm25: dirección carpeta donde se encuentran las concentraciones de PM2.5
    lluvia: dirección carpeta donde se encuentran las precipitaciones
    viento: dirección carpeta donde se encuentran las velocidades del viento
    iaf: dirección carpeta donde se encuentran las áreas de cobertura por IAF
    e: número de la estación

    #Importando librerías
    import pandas as pd
    import EcuacionesPM25_matriz as Ec #Importando modulo con las ecuaciones definidas
    from datetime import timedelta

    """
    #Escenario Remoción
    """
    col_lai = list(iaf.columns) #IAFs evaluados

    """ 1) Creando dataframes para cada variable"""
    FtPM25 = pd.DataFrame({}, index = pm25.index, columns = pm25.columns).fillna(0) #Flujo contaminante por estación
    AcPM25 = pd.DataFrame({}, index = pm25.index, columns = pm25.columns).fillna(0) #Flujo acumulado por estación
    AwPM25 = pd.DataFrame({}, index = pm25.index, columns = pm25.columns).fillna(0) #Flujo lavado por estación

    """ 2) Calculando la velocidad de deposición de material particulado y flujo por cada IAF """
    for l in col_lai:
        #Ciclo For sobre cada IAF
        f = lambda x: Ec.dryvpm25(x, float(1)) #Función para el calculo de la velocidad de deposición seca
        vd = viento.applymap(f) # Velocidad de depositación
        fz = lambda z: Ec.rrrpm25(z) #Función para el calculo de remoción
        rr = viento.applymap(fz) # %Resuspensión
        Ct = pm25/(10**6) #Ug/m3 a g/m3 #Concentración PM2.5
        ft = Ec.ft(vd, Ct) #g/m2*s a g/m2*h #Flujo contaminante

        """ 3) El flujo neto y lavado se debe calcular para cada IAF, dada la ocurrencia de lluvia y el almacenamiento de la misma por el IAF"""
        ini_1 = '2016-12-31 23:00:00' #Inicio falso para la suma desfasada '2016-12-31 23:00:00'
        per_1 = (365*24) + 1 #uno más 365*24 + 1
        ini = '2017-01-01 00:00:00' #Inicio verdadero '2017-01-01 00:00:00'

        #Creando dataframes para acumulación por iaf
        Ac = pd.DataFrame({}, columns = ft.columns, index = pd.date_range(ini_1, periods=per_1,
                                freq='H')).fillna(0) #Acumulación g/m2*h
        Aw = pd.DataFrame({}, columns = ft.columns, index = pd.date_range(ini, periods=24,
                                freq='H')).fillna(0) #Lo que se lava o remueve (g/m2/h) #flujo con i-1 = 0

        alai = iaf.loc[e, str(l)] #Área cobertura de IAF
        ps = 0.2*float(1) #Calculo capacidad de almacenamiento de lluvia de la hoja
        d = timedelta(hours=1) #Cambio de hora en indice

        #Flujo lavado (removido)
        for j in Ac.columns:
            for i in Ac.index.delete(-1):
                if lluvia.loc[i+d,j] > ps: #Identificando capacidad de lluvia para remover
                    Ac.loc[i+d,j] = 0.0 #La acumulación se va a cero
                    Aw.loc[i+d,j] = Ac.loc[i,j] #Se remueve lo acumulado anteriormente
                else:
                    Ac.loc[i+d,j] = (Ac.loc[i,j] + ft.loc[i+d,j])*(1-(rr.loc[i+d,j]/100)) #Se acumula el flujo con lo anterior

        Ac = Ac[Ac.index != '2016-12-31 23:00:00'] #quitar inicio

        #Flujo másico
        Ftlai = ft*alai #g/h
        Aclai = Ac*alai #g/h #Remanente en última hora por IAF
        Awlai = Aw*alai #g/h #Remoción (lavado) de contaminación por IAF

        #Sumando con demás lai
        FtPM25 = Ftlai + FtPM25 #g/h
        AcPM25 = Aclai + AcPM25 #g/h #Remanente en última total
        AwPM25 = Awlai + AwPM25 #g/h #Remoción (lavado) de contaminación total

    Rest = AwPM25.sum() + AcPM25.loc['2017-12-31 23:00:00',:] #Remoción total por estación

    return FtPM25, AcPM25, AwPM25, Rest

    """ ***** """

#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Sat Mar 31 12:32:27 2018

3.Script_Ecuaciones: Este script es el modulo que define todas ecuaciones del modelo UFORE
"""

```

```

"""
#Importando librerías
import math
import pandas as pd
from scipy.interpolate import interp1d

#df con la relación entre las velocidades de viento y el porcentaje de resuspensión
vp = '/home/daniela/GDrive/T_Investigacion_Compu/Investigacion/Data/Vel_viento.csv'

def dryvpm25(Vv, IAF):
    """ Cálculo velocidad de deposición de PM2.5 """
    vv = pd.read_csv(vp, delimiter = ' ')
    x = vv['Vv']
    y = vv['Vd']
    f = interp1d(x,y,kind = 'linear') #Generando la función para cálculo del % resuspensión
    if Vv > x.max():
        Vdpm25 = (y.max())/(IAF*100)
    else:
        Vdpm25 = (f(Vv))/(IAF*100) #cm/s a m/s
    return Vdpm25

def rrpm25(Vv):
    """ Cálculo de porcentaje de resuspensión """
    vv = pd.read_csv(vp, delimiter = ' ')
    x = vv['Vv']
    z = vv['p100']
    fz = interp1d(x,z,kind = 'linear')#'cubic'
    if Vv > x.max():
        rr = z.max()
    else:
        rr = fz(Vv)
    return rr

def ft(Vdpm25, Ct):
    """
    Función flujo contaminante
    Cr es la concentración
    Ct en g/m3
    """
    Flt = Vdpm25*Ct*3600
    return Flt

def rt(Ac, ft, rr):
    """
    Función de resuspensión
    rr en %
    Ac es acumulado anterior
    """
    Rst = (Ac + ft)*(rr/100)
    return Rst

def Act(Ac, ft, Rt ):
    """
    Ac es acumulado anterior
    Act es acumulado actual
    ft es el flujo total
    """
    Act = (Ac + ft) - Rt
    return Act

def Flt(ft, Rt):
    """
    Flt es la cantidad de flujo en el instante que
    """
    Flt =ft - Rt
    return Flt

```