

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales
Maestría en Ingeniería y Gestión de la Calidad



Aplicación de herramientas de gestión de la calidad en el desarrollo de una metodología de evaluación de resultados de la política pública en materia de calidad del aire en el Área Metropolitana de Guadalajara

TESIS que para obtener el **GRADO** de
MAESTRO EN INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CALIDAD

Presenta: **EDGAR ALÁN EGURROLA HERNÁNDEZ**

Tutor **DR. CARLOS GONZÁLEZ FIGUEREDO**

Tlaquepaque, Jalisco. diciembre de 2021.

1. Tabla de contenido

1. Fundamentación de la investigación.....	9
1.1. Descripción del escenario que se planea investigar.....	9
1.1.1. Calidad del aire.....	9
1.2. Descripción de la problemática percibida que justifica la investigación.....	13
1.3. Validación de las condiciones del escenario.....	13
1.4. Análisis del contexto y del objeto de estudio.....	15
1.4.1. Contexto del objeto de estudio.....	15
1.4.2. Entorno del objeto de estudio.....	22
1.4.3. Selección de variables.....	23
1.4.4. Sujeto de estudio.....	24
1.4.5. Objeto de estudio.....	25
1.4.6. Pregunta de investigación.....	25
1.5. Análisis inicial de la problemática: hipótesis.....	25
1.6. Objetivos de la investigación.....	26
1.6.1. Objetivo general.....	26
1.6.2. Objetivos específicos.....	27
1.7. Delimitación de la investigación.....	27
1.8. Justificación y pertinencia de la investigación.....	31
2. Marco conceptual o de referencia.....	33
2.1. Estado de la cuestión.....	33
2.1.1. Gestión de la calidad en la administración pública.....	33
2.2. Conceptos y enfoques teóricos relacionados.....	37
2.2.1. Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (DMAIC).....	37
2.2.2. Métodos de medición de la calidad del aire.....	41
2.2.3. Sensores de bajo costo.....	43
2.2.4. Gage R&R.....	46
2.2.5. Confiabilidad.....	50
2.2.6. Redes neuronales.....	53
2.2.7. Línea base.....	55
2.2.8. Evaluación territorial de políticas.....	61
3. Marco Metodológico de la investigación.....	63

3.1.	Análisis del ProAire 2011-2020	64
3.2.	Evaluación del escenario actual	66
3.2.1.	Análisis de agrupaciones de datos.....	67
3.2.2.	Llenado de huecos	71
3.2.3.	Línea base.....	79
3.3.	Evaluación de sensores de bajo costo	80
3.3.1.	Análisis estadístico y gráfico de los sensores.....	81
3.3.2.	Determinación de la confiabilidad del sistema	84
3.4.	Evaluación de la estrategia de impulso a la movilidad no motorizada: MiBici.....	90
3.4.1.	Selección de la resolución de estudio.....	91
3.4.2.	Validación del modelo con máximos por mes	92
3.4.3.	Indicador de exposición	93
3.4.4.	Indicador de concentración	99
3.4.5.	Indicador de impacto.....	100
4.	Estrategia de implementación del marco metodológico de la investigación.....	102
4.1.	Herramientas e instrumentos	102
4.2.	Etapas del proceso de aplicación/investigación.....	104
4.2.1.	Cronograma de trabajo	104
4.2.2.	Imprevistos	105
5.	Exposición de hallazgos.....	107
5.1.	Análisis del ProAire 2011-2020	107
5.2.	Evaluación del escenario actual	112
5.2.1.	Análisis de agrupaciones de datos.....	112
5.2.2.	Redes neuronales por relación espacial.....	114
5.2.3.	Línea base.....	129
5.3.	Evaluación de sensores de bajo costo	134
5.3.1.	Análisis estadístico y gráfico de los sensores.....	134
5.3.2.	Determinación de la confiabilidad del sistema	146
5.4.	Evaluación de la estrategia de impulso a la movilidad no motorizada: MiBici...	147
5.4.1.	Definición del área de estudio y resolución espacial	147
5.4.2.	Insumos para la modelación de emisiones con AERMOD	150
5.4.3.	Indicador de exposición	153

5.4.4.	Indicador de concentración	159
5.4.5.	Indicador de impacto	163
6.	Discusión final.....	178
6.1.	Relevancia y trascendencia disciplinaria de la investigación	178
7.	Bibliografía.....	182
8.	Anexos.....	194
8.1.	Anexo A – Glosario de términos	194
8.2.	Anexo B – BPM ProAire 2011 – 2020	197
8.3.	Anexo C – Análisis de agrupaciones inválidas para rangos de 24 horas para cada contaminante, por estación y por año.	199
8.4.	Anexo D - Dispersión de residuales para las redes neuronales espaciales	201
8.4.1.	Modelo 1	201
8.4.2.	Modelo 2	207
8.4.3.	Modelo 3	213
8.5.	Anexo E – Gráficas de línea base por estación.....	218
8.5.1.	Línea base continua.....	218
8.5.2.	Línea base agrupada.....	229
8.6.	Anexo F – Gráficas del análisis de sensores de bajo costo.....	242
8.6.1.	EcoMeasure.....	242
8.6.2.	eLichens	246
8.7.	Anexo G – Promedio de máximos diarios por mes	252
8.7.1.	Máximos mensuales continuos	252
8.7.2.	Máximos mensuales agrupados.....	257
8.8.	Anexo H – Resultados agrupados del indicador de concentración.....	263
8.9.	Anexo I	267

Índice de siglas

AMG: Área Metropolitana de Guadalajara

DMAIC: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar

EPA: Environmental Protection Agency

INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

ITESO: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente.

OMS: Organización Mundial de la Salud

PM₁₀: Material particulado menor a 10 micras

ProAire: Programa para mejorar la calidad del aire Jalisco 2014-2020

RNA: Redes Neuronales Artificiales

SEMADET: Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial de Jalisco

SIMAJ: Sistema de Monitoreo Atmosférico de Jalisco

Abstract

This paper develops the research for the project Application of quality management tools in the development of a methodology for evaluating the results of the public policy on air quality in the Guadalajara Metropolitan Area (AGM). An analysis of ProAire 2014-2020 from a quality management perspective was carried out and limitations and areas of opportunity were determined for the program to meet its objectives and reduce the concentration of atmospheric pollutants in the AMG. For this purpose, a three-pronged approach was proposed: the definition of a baseline, the evaluation of low-cost electronic sensors, and the evaluation of the impact of the strategies within the ProAire. The baseline was developed by aggregating monthly averages, with their respective standard deviation. With it, it is possible to study air pollution trends with sufficient temporal resolution. On the other hand, a method for evaluating the performance of EcoMeasure and eLichens electronic air quality sensors is proposed and implemented to determine their reliability. Finally, the methodology for the evaluation of the impact of the implementation of MiBici is done through a simulation of the emission and concentration levels for PM10 in the study area. For this analysis, an exposure indicator was constructed using population density, number of employees density and trips density within the study area. The exposure indicator is spatially related to a pollution indicator, developed from the modeling of pollutant dispersion. The piloting of the methodology showed a non-determinant impact with MiBici strategy, even though its effects were overestimated. However, it was possible to develop and test the method, which was the objective of the research. It is considered that the model in its current state is perfectible, but that it manages to yield relevant results for the study and can be used as an input for decision-making. Throughout the research, a quality management perspective was maintained, and although it was not possible to integrate a method of control and continuous improvement, it was possible to integrate tools and concepts commonly used in the industry to develop a methodology that strengthens the monitoring and evaluation of public policy on air quality in the AMG.

Keywords: Quality management, air quality, public policy, impact evaluation

Resumen:

En el presente trabajo se desarrolla la investigación para el proyecto Aplicación de herramientas de gestión de la calidad en el desarrollo de una metodología de evaluación de resultados de la política pública en materia de calidad del aire en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG). En este se realizó un análisis del ProAire 2014-2020 desde una perspectiva de gestión de la calidad y se determinaron limitantes y áreas de oportunidad para que el programa cumpla con sus objetivos y disminuya la concentración de contaminantes atmosféricos en el AMG. Para esto, se propuso un acercamiento desde tres frentes, la delimitación de una línea base, la evaluación de sensores electrónicos de bajo costo y la evaluación del impacto de las estrategias dentro del ProAire. El método de línea base, consiste en la agrupación de promedios diarios mensuales, con su respectiva desviación estándar. Este acercamiento permite estudiar las tendencias de la contaminación atmosférica con suficiente resolución temporal. Por otro lado, se propone e implementa un método de evaluación del desempeño de sensores electrónicos de calidad del aire de las marcas EcoMeasure y eLichens, para determinar su confiabilidad. Por último, la metodología para la evaluación del impacto de una estrategia se simuló el cambio en la emisión y concentración de PM₁₀ en el área de estudio posterior a la implementación del programa MiBici. Para esta se propuso un indicador de exposición, formado a partir de la densidad de población, densidad de personas ocupadas y densidad de viajes en el área de estudio. El indicador de exposición se relaciona espacialmente con un indicador de contaminación, elaborado a partir de la modelación de dispersión de contaminantes. El pilotaje de la metodología mostró un impacto no determinante de esta estrategia, aun con una sobreestimación de los efectos. Sin embargo, se logró desarrollar y poner a prueba el método, lo cual era el objetivo de la investigación. Se considera que el modelo en su estado actual es perfectible, pero que logra arrojar resultados relevantes para el estudio y puede ser utilizado como insumo en la toma de decisiones. Durante toda la investigación se mantuvo una perspectiva de gestión de la calidad, y aunque no se logró integrar un método de control y mejora continua, se consiguió integrar herramientas y conceptos comúnmente utilizados en la industria para elaborar una metodología que fortalezca el seguimiento y la evaluación de la política pública en materia de calidad del aire en el AMG.

Palabras clave: Gestión de la calidad, calidad del aire, políticas públicas, evaluación de impacto.

Agradecimientos

Gracias al ITESO por darme la oportunidad de cursar esta maestría y profundizar mis conocimientos. Gracias a Carlos por el asesoramiento constante, por las observaciones y correcciones, pero más que nada, por darme la confianza para proponer y desarrollarme. Gracias a Juan Pablo por darse el tiempo de escuchar, entender y orientar el proyecto. Gracias a todas las personas que participaron en el desarrollo del proyecto. Gracias a mi familia por su apoyo incondicional en todo momento y por creer en mí. Gracias a Cecilia, por escucharme y acompañarme durante todo el camino, sin ti no hubiera sido posible, esto es para ti.

1. Fundamentación de la investigación

1.1. Descripción del escenario que se planea investigar

1.1.1. Calidad del aire

En años recientes, el deterioro en la calidad del aire ha sido identificado como un tema prioritario por las agencias ambientales. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) (World Health Organization, 2016), la contaminación del aire representa uno de los riesgos ambientales más importantes para la salud humana y, mediante estudios y el análisis de datos, se ha logrado determinar que la mayoría de los contaminantes atmosféricos se emiten por actividades humanas (Harrison, 2006). Diversas de estas actividades que afectan la calidad del aire de forma local son realizadas en ciudades, lo que las convierte en áreas prioritarias, ya que grandes concentraciones de personas se encuentran expuestas de forma continua a la contaminación atmosférica.

Sin embargo, el estado de la calidad del aire en una región no depende únicamente de la emisión de contaminantes. De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013) esta es el resultado de factores complejos tales como el tipo de relieve (factores físicos), las reacciones químicas de los contaminantes en la atmósfera (factores químicos), la dispersión de estos (factores meteorológicos), los usos y costumbres de la población (factores sociales), el tipo de actividades económicas desarrolladas y la tecnología utilizada en ellas (factores económicos).

A pesar de que las actividades humanas, y los procesos, naturales, llevan a la emisión de una amplia variedad de contaminantes, la Agencia de Protección del Ambiente de Estados

Unidos (EPA por sus siglas en inglés) (Environmental Protection Agency, 2015) establece que los seis contaminantes atmosféricos más comunes son, Monóxido de Carbono (CO), Ozono (O3), Dióxido de Nitrógeno (NO2), Material Particulado (PM), Plomo (Pb) y Dióxido de Azufre (SO2) y se les denominan contaminantes criterio. Estos, sin contar el plomo, son monitoreados en ciudades alrededor del mundo para determinar los niveles de calidad del aire a los que está expuesta la población.

En las ciudades que cuentan con niveles elevados de contaminación atmosférica hay mayor incidencia de enfermedades cardíacas, problemas respiratorios y presencia de cáncer de pulmón (World Health Organization, 2016). La OMS estima que la contaminación atmosférica mata a 7 millones de personas de forma prematura a nivel mundial, la mayoría de estas defunciones ocurren en países en vías de desarrollo (World Health Organization, 2016) (World Health Organization, 2019). A su vez, la EPA determinó que, de los seis contaminantes criterio, la exposición a material particulado y el ozono a nivel de suelo representan el mayor riesgo para la salud (Environmental Protection Agency, 2015). Esto se ha observado a través de estudios epidemiológicos en los que se ha reportado un aumento en la mortalidad y la morbilidad en comunidades con concentraciones elevadas de PM (Pope & Dockery, 2006).

En el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) se ha observado un deterioro de la calidad del aire en los últimos años (INECC, 2018) (SEMADET, 2018) a causa de las dinámicas urbanas de crecimiento, producción económica y condiciones meteorológicas. Esto ha derivado en una población más expuesta a contaminantes criterio y, por lo tanto, con mayor riesgo de desarrollar enfermedades asociadas a estos. Para conocer el estado de la calidad del aire y posteriormente definir y evaluar estrategias de mitigación primero es

importante conocer el estado actual de la contaminación (INECC, 2009a), para esto, en el AMG se cuenta con 10 estaciones de monitoreo de la calidad del aire fijas (Figura 1) y 1 estación móvil, administradas por la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET). Estas generan información de concentración para 5 contaminantes criterio (CO, PM10, O3, SO2, NO2) y 4 variables meteorológicas (Temperatura ambiente, Humedad relativa y Velocidad y Dirección del viento) (SEMADET, 2015a). Los datos recopilados son utilizados por la SEMADET para analizar los niveles de la calidad del aire y declarar contingencias ambientales cuando alguno de los contaminantes excede los límites establecidos en las Normas Mexicanas.

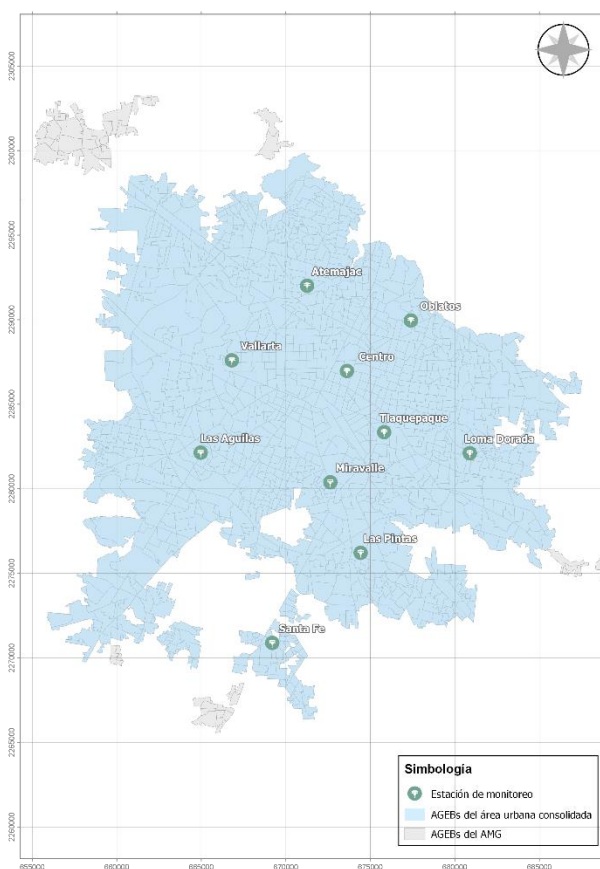


Figura 1. Estaciones de monitoreo de la calidad del aire en el AMG.

Fuente: Elaboración propia

El Programa para mejorar la calidad del aire Jalisco 2014-2020 (ProAire) integra información que se emplea como herramienta de gestión de la calidad del aire, en el cual se establecen estrategias y acciones, con el objetivo de revertir las tendencias actuales del deterioro de la calidad del aire (Semadet, 2014a). Incluye la participación de los sectores de salud, industrial, comercial, y de comunicaciones y transporte, así como de la sociedad en general; instrumenta el seguimiento, evaluación y divulgación de compromisos, además de fomentar la educación y conciencia ambiental de la población, atribuciones por lo cual el ProAire Jalisco 2014-2020 se considera como el eje rector de la política pública del Estado en materia de calidad del aire. Dentro de este programa se identifica al transporte, el crecimiento poblacional, el consumo de energía, actividades domésticas, manejo de residuos y agricultura como los principales factores de contaminación atmosférica en el AMG (Semadet, 2014a). Y, en el Inventario de Emisiones del año 2008 se resalta que la mayoría de las emisiones son generadas por fuentes móviles (Semadet, 2014b).

Las principales estrategias descritas en el ProAire Jalisco 2014-2020 incluyen mejorar e incrementar la movilidad integral en el AMG, fortalecer el programa de verificación vehicular para aumentar el número total de automóviles que lo realizan y retirar de la vialidad a aquellos autos que contaminen visibles. También, se busca mejorar los esquemas de autorregulación de la industria, así como los esquemas de inspección y vigilancia. Lograr controlar e implementar buenas prácticas en las quemas agrícolas y las extracciones en bancos de materiales. Todo esto va acompañado de estrategias de fortalecimiento institucional para lograr aplicar la normatividad correspondiente o crear y modificar los reglamentos que se requieran.

Sin embargo, actualmente las estrategias establecidas en el ProAire, a pesar de estar dirigidas a contrarrestar tendencias críticas de la contaminación atmosférica, no han logrado el impacto positivo que se espera. Esto se puede argumentar analizando los datos de contaminación atmosférica año tras año en los que, como se mencionó anteriormente, se observa un deterioro de la calidad del aire. Los motivos son, al igual que la contaminación atmosférica, multidimensionales e intervienen una gran cantidad de variables. Aun así, es posible observar que el programa carece de las herramientas necesarias para evaluar el desempeño con las que se podría proponer estrategias claras de mejora, analizar aquellas medidas que muestran mejores resultados para reforzarse e incluso modificar el acercamiento en aquellas que no generen el resultado esperado.

1.2. Descripción de la problemática percibida que justifica la investigación

A pesar de que se tiene un programa como el ProAire, y que ha estado en efecto desde el 2011, no se ha logrado mejorar la calidad del aire en el AMG (SEMADET, 2018). Con este marco se propone un análisis de la política pública desde una perspectiva de gestión de la calidad, que comúnmente se utiliza en la industria privada, para proponer estrategias de evaluación orientadas al impacto. Además, el ProAire que se publicó en el 2014 tiene una temporalidad hasta el año 2020. Esto quiere decir que se debe de publicar un nuevo programa en el 2021, con este escenario se establece que es un buen momento para evaluar el desempeño del programa previo y realizar propuestas de mejoras aplicables al nuevo instrumento.

1.3. Validación de las condiciones del escenario

La investigación se orienta a la incorporación de distintas herramientas de la gestión de la calidad al proceso de elaboración, medición y seguimiento de los resultados, de la política

pública en materia de calidad del aire. A pesar de que se identificaron esfuerzos por integrar herramientas de gestión de la calidad en la administración pública, estos comúnmente se enfocan en los procesos de funcionamiento interno. De acuerdo con Contreras (Contreras, 2014), cada vez más, los organismos públicos buscan integrar prácticas de gestión de la calidad en sus procesos. Con estos objetivos, y en busca de estandarizar la aplicación de esta perspectiva, se han identificado entidades federativas que cuentan con certificaciones como la ISO 9000 en distintas Secretarías, como en los estados de Baja California, Campeche, Sonora, Tamaulipas, entre otros. Sin embargo, su implementación se orienta al proceso interno en búsqueda de dar un mejor servicio al cliente y no se observaron aplicaciones o propuestas de aplicación de esquemas de mejora continua y evaluación en políticas públicas.

A lo largo del proceso se ha mantenido contacto con la SEMADET para buscar vincular la investigación con un entorno real y que las propuestas realizadas sean aplicables. Además, esta investigación se encuentra integrada en un proyecto más grande en materia de calidad del aire por parte del ITESO, dentro del cual se relacionan las acciones y procesos que se buscan desarrollar. Esta integración dentro del esquema mayor de desarrollo se describe de forma detallada más adelante.

Tanto la participación con instancias públicas y el desarrollo dentro de un proyecto rector de calidad del aire garantizan que la investigación propuesta tiene material para desarrollarse en un periodo de dos años y llegar a resultados tangibles y útiles para este proceso e incluso para continuar su desarrollo en trabajos posteriores.

1.4. Análisis del contexto y del objeto de estudio

Como se describió en la Introducción, la exposición a contaminantes atmosféricos tiene efectos adversos en la salud de las personas. Estas consecuencias se pueden observar principalmente en las ciudades, por la diversidad de actividades económicas y sociales que derivan en emisiones de contaminantes. En el AMG, los eventos de mala calidad del aire se presentan año con año como un riesgo latente para la población y, hasta la fecha, las estrategias que se han desarrollado y aplicado para revertir esta tendencia no han tenido el impacto buscado. Es en este escenario, de impactos a la salud y al medio ambiente, que se desarrollan propuestas de mejora desde una perspectiva de gestión de la calidad. En el siguiente apartado se toman estas bases para profundizar en el contexto en materia de calidad del aire en el AMG y los fundamentos teóricos y técnicos de las herramientas de la gestión de la calidad y su aplicación en el proyecto de investigación desarrollado.

1.4.1. Contexto del objeto de estudio

En Jalisco la SEMADET cuenta con distintos instrumentos para evaluar la calidad del aire, información que utiliza como insumo en la determinación de las estrategias para mejorarla. Estos incluyen los reportes anuales de la calidad del aire o el Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio. Estos documentos permiten conocer el estado actual y dimensionar la problemática. A continuación, se presenta un análisis de estos.

De acuerdo con información del Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del Estado de Jalisco 2008 (Semadet, 2014b) la distribución de las emisiones de contaminantes criterio por fuente es la siguiente (Figura 2):

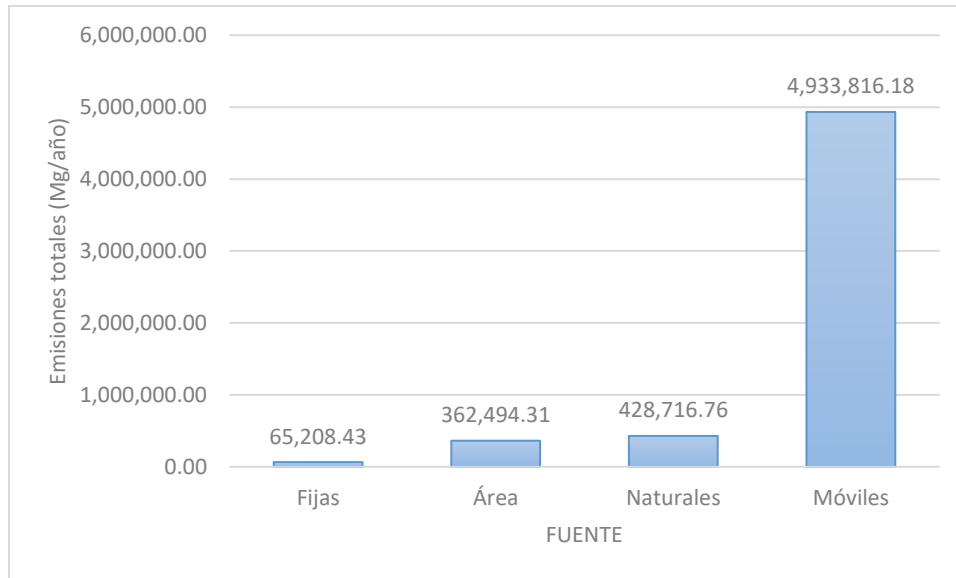


Figura 2. Emisiones anuales totales en millones de gramos por fuente.

Fuente: Elaboración propia con base en SEMADET 2014b

Tomando estos datos como base, se pueden generar los porcentajes que cada una de estas fuentes aporta a la contaminación del aire en Jalisco (Tabla 1):

Tabla 1. Porcentaje de emisiones por fuente

Fuente	Emisiones totales (Mg/año)	Porcentaje
Fijas	65,208.43	1.13%
Área	362,494.31	6.26%
Naturales	428,716.76	7.40%
Móviles	4,933,816.18	85.21%
Totales	5,790,235.68	100.00%

Elaboración propia con base en SEMADET 2014b

Ahora bien, en el Inventario de Emisiones del 2008 (Semadet, 2014b), además de establecer las emisiones por fuente, se puede observar cuánto emite cada fuente por contaminante (Tabla 2).

Tabla 2. Emisiones por fuente y por tipo de contaminante en millones de gramos por año

Fuente	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x	COV	NH ₃
Fijas	8,767.76	5,398.81	23,897.00	3,216.43	6,322.57	15,622.70	1,983.16
Área	24,642.44	14,470.49	1,727.60	93,470.67	24,705.79	131,153.17	72,324.15
Naturales	-	-	-	-	85,757.86	342,958.90	-
Móviles	4,259.34	3,707.03	3,263.66	4,275,280.43	206,219.57	433,092.40	7,993.75
Totales	37669.54	23576.33	28888.26	4371967.53	323005.79	922827.17	82301.06

Elaboración propia con base en SEMADET 2014b

De estos, los COV reaccionan con los NO_x en presencia de rayos ultravioleta para producir ozono (O₃). Por otra parte, con la información generada en las estaciones de monitoreo de calidad del aire, es posible observar que se ha deteriorado la calidad del aire año con año, con el ozono y el material particulado como los contaminantes que más superan la normatividad.

Sin embargo, aunque las emisiones totales por fuente muestran cuanto emite cada una, no se registra el nivel de impacto de la emisión. En los reportes de calidad del aire de la SEMADET entre los años 2008 y 2012 se presentan los días que se superan los 100 puntos IMECA para cada contaminante (SEMADET, 2008); (SEMADET, 2009); (SEMADET, 2010); (SEMADET, 2011); (SEMADET, 2012), los resultados resumidos se muestran en la siguiente tabla (Tabla 3):

Tabla 3. Días que se superan los 100 puntos IMECA por contaminante

Año	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	PM ₁₀
2008	66	0	1	0	70
2009	75	0	0	0	25
2010	116	0	1	0	45
2011	138	2	0	0	185
2012	33	0	0	0	111

Fuente: Elaboración propia con base en SEMADET 2008, 2009, 2010, 2011, 2012.

De acuerdo con estos valores, es prioritario estudiar las emisiones de PM₁₀ y O₃ para elaborar estrategias que impacten de forma significativa la calidad del aire del AMG. Retomando la Tabla 2, únicamente incluyendo las emisiones de partículas menores a 10 micrómetros y precursores de ozono la distribución de las fuentes cambia de forma relevante (Figura 3) (Tabla 4).

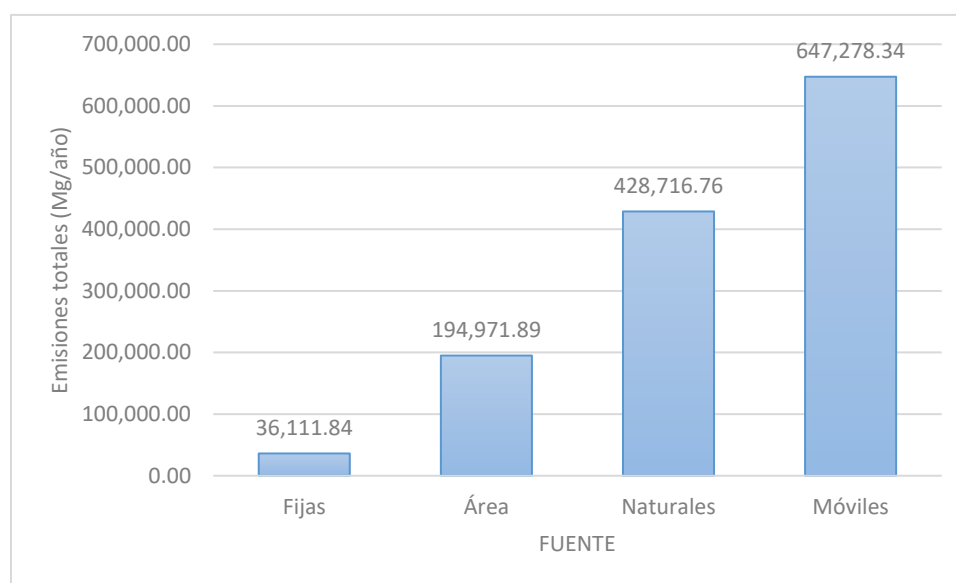


Figura 3. Emisiones anuales totales en millones de gramos por fuente para contaminantes de mayor impacto

Fuente: Elaboración propia con base en SEMADET 2014b

Tabla 4. Emisiones por fuente para contaminantes principales

Fuente	PM ₁₀	NO _x	COV	Total	Porcentaje
Fijas	8,767.76	6,322.57	15,622.70	36,111.84	2.8%
Área	24,642.44	24,705.79	131,153.17	194,971.89	14.9%
Naturales	-	85,757.86	342,958.90	428,716.76	32.8%
Móviles	4,259.34	206,219.57	433,092.40	647,278.34	49.5%
Totales	37669.54	323005.79	922827.17	1,307,078.83	100.0%

Fuente: Elaboración propia con base en SEMADET 2014b

Debido a que la concentración medida del ozono depende de las emisiones de dos contaminantes y su reacción en presencia de luz solar, se continuará con la evaluación de PM₁₀ ya que, por lo menos en cuestión de emisiones, tiene un comportamiento más lineal

(causa – efecto). Para analizar la problemática generada por el material particulado, se analizaron las bases de datos de calidad del aire de la SEMADET para los años 2015, 2016 y 2017 y se calcularon los IMECA horarios. Posteriormente, se registraron aquellos días en los que el indicador supero los 120 y 150 puntos, cada uno se registró como un episodio de mala calidad del aire distinto ya que son los parámetros que se utilizan para determinar las contingencias ambientales por mala calidad del aire (Tabla 5).

Tabla 5. Días que se superaron los 120 IMECA en horas continuas para PM10

Mes	2015	2016	2017	2018
Enero	23	12	21	23
Febrero	12	1	10	5
Marzo	5	0	1	0
Abril	1	0	7	1
Mayo	2	0	2	0
Junio	0	0	0	1
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0
Octubre	1	11	5	8
Noviembre	17	20	23	7
Diciembre	7	33	34	21

Fuente: Elaboración propia con base en SEMADET 2015b, 2016, 2017, 2018.

Como se muestra en las Figuras 4, 5, 6 y 7 la distribución mensual de los episodios de mala calidad del aire es consistente a lo largo de los años. Además, se observa que las dinámicas que predominan en la emisión de PM10 son sistémicas. Esto quiere decir que, aunque la calidad del aire se pueda ver afectada por eventos puntuales, como incendios forestales, las principales causas de contaminación son por actividades recurrentes aunadas a las condiciones meteorológicas.

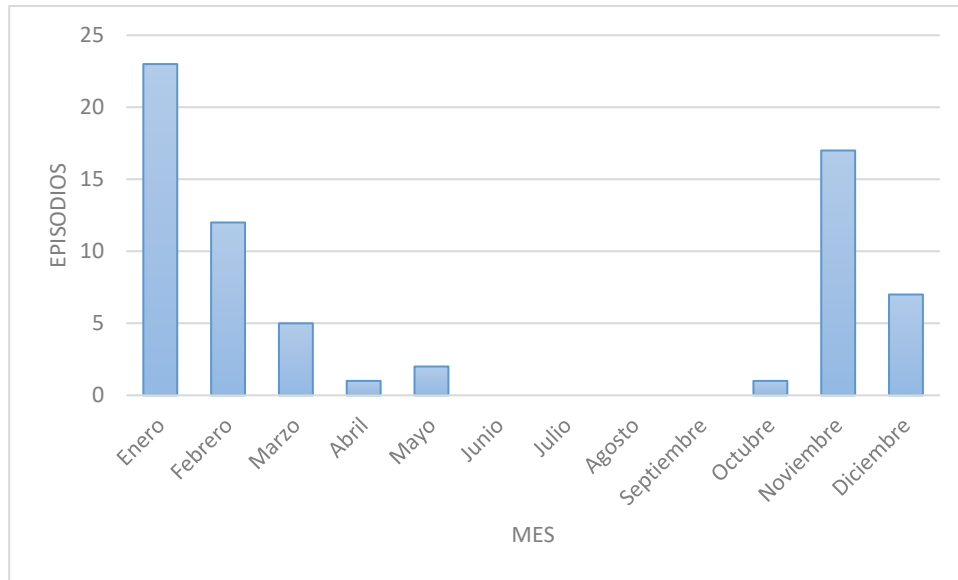


Figura 4. Distribución de episodios de mala calidad del aire por PM10 en 2015.

Fuente: Elaboración propia con base en SEMADET 2015b

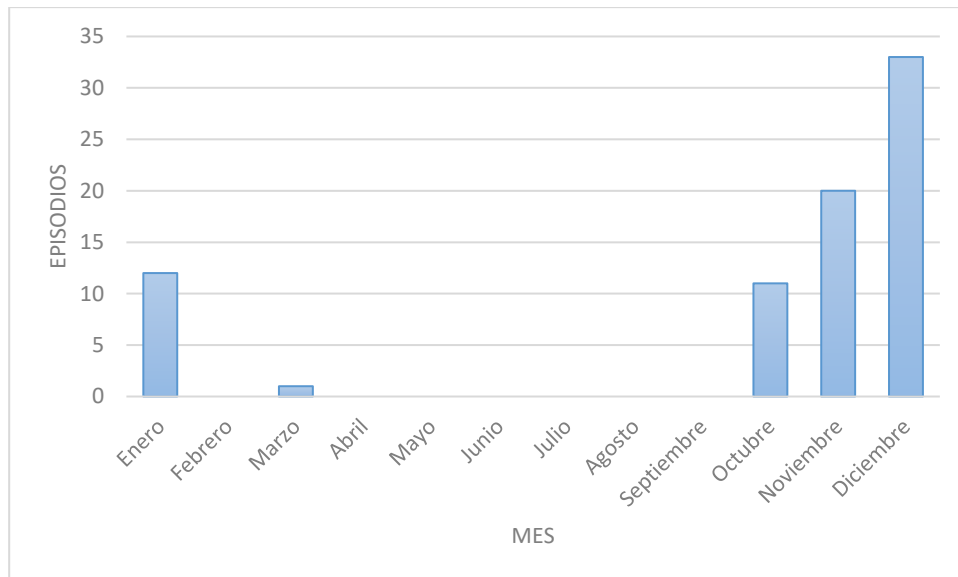


Figura 5. Distribución de episodios de mala calidad del aire por PM10 en 2016.

Fuente: Elaboración propia con base en SEMADET 2016

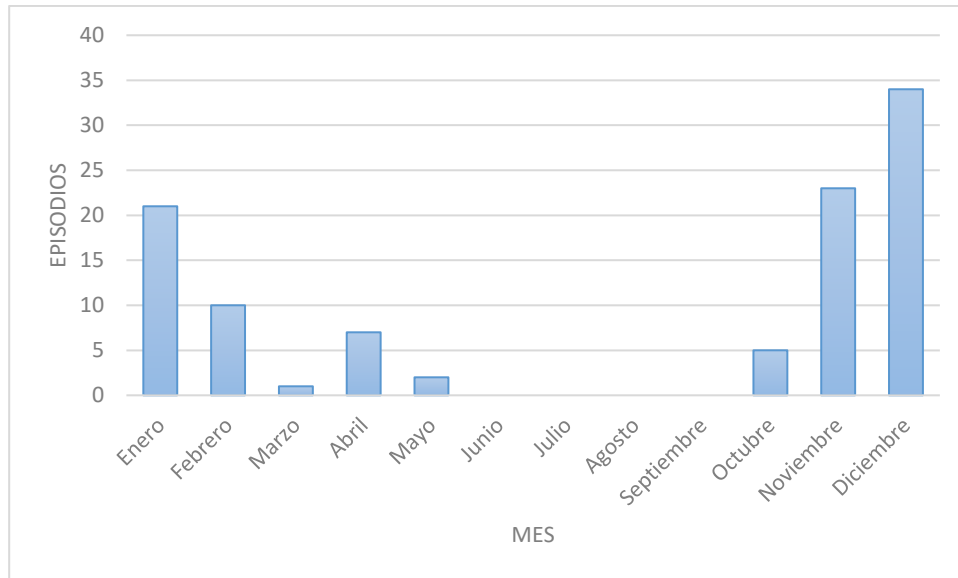


Figura 6. Distribución de episodios de mala calidad del aire por PM10 en 2017.

Fuente: Elaboración propia con base en SEMADET 2017

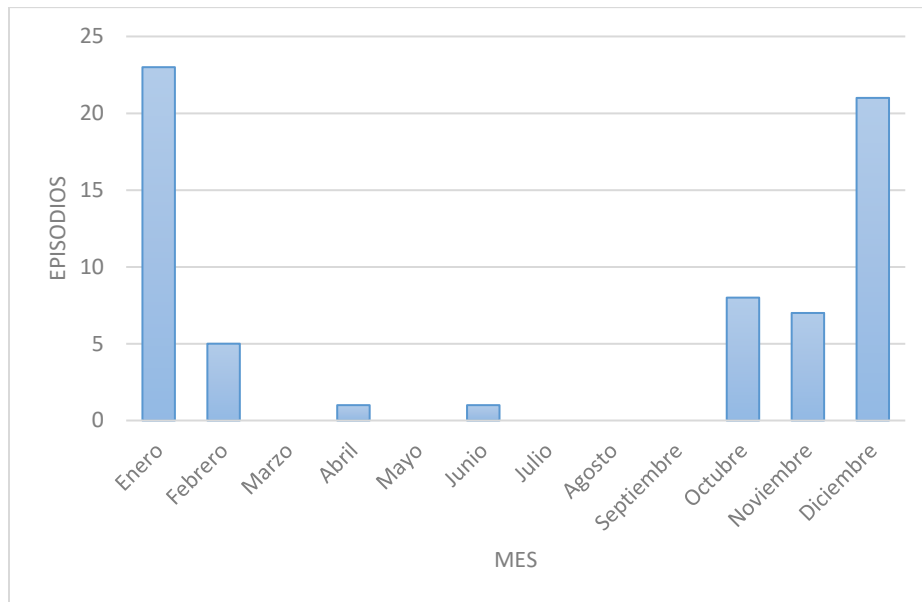


Figura 7. Distribución de episodios de mala calidad del aire por PM10 en 2018.

Fuente: Elaboración propia con base en SEMADET 2018

En el documento, Recomendación de política pública para mejorar la calidad del aire en México Centro Mexicano de Derecho Ambiental (CEMDA) se establece que “los esfuerzos por mejorar la calidad del aire requieren una serie de factores (técnicos,

económicos, políticos y sociales) que permitan hacer una adecuada gestión de la calidad del aire” (CEMDA, 2013).

Los datos resaltan que, en los últimos años, a pesar de que se cuenta con herramientas como el ProAire, la calidad del aire en el AMG se ha deteriorado (SEMADET, 2018). De acuerdo con lo descrito en los dos párrafos anteriores, esto se puede interpretar como una estrategia que no atiende a las problemáticas o que no se implementa de forma correcta, en resumen, que no genera los resultados esperados y que no abona a una gestión adecuada de la calidad del aire.

1.4.2. Entorno del objeto de estudio

El trabajo de investigación se basa en el estudio de la Política Pública para mejorar la calidad del aire en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) desde una perspectiva de gestión de la calidad, que comúnmente se utiliza en la industria. Para esto, es necesario comprender el contexto sobre el cuál se desarrolla y opera el programa.

La SEMADET es la encargada de realizar el monitoreo, analizar y presentar los resultados del estado de la calidad del aire para Jalisco. Actualmente, este proceso se realiza principalmente para el AMG ya que es el único espacio donde se tienen estaciones de monitoreo de la calidad del aire fijas y, es a su vez, la ciudad en la que se concentran las estrategias y propuestas de mejora para contrarrestar la contaminación atmosférica.

A pesar de esto, el diagnóstico de las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos se realiza para todo Jalisco. Este diagnóstico cuantifica tanto a contaminantes que impactan la calidad del aire como Gases de Efecto Invernadero (GEI). Este insumo es de

gran importancia para identificar los sectores que son prioritarios para reducir la emisión de contaminantes y el impacto que producen.

La contaminación atmosférica es una consecuencia de las actividades humanas con causas multidimensionales. Por lo tanto, las acciones para mejorar la calidad del aire no son responsabilidad completa de la SEMADET. Esta última sí es la encargada de desarrollar y publicar el ProAire, pero las acciones que se muestran ahí tienen diferentes responsables, como la Secretaría de Movilidad, la Secretaría de Salud, entre otros, lo que complejiza el seguimiento de las estrategias.

Aunado a esto, la falta de lineamientos, objetivos e instrumentos para dar seguimiento a las acciones dificulta conocer si se está teniendo el alcance esperado y definir esfuerzos para potenciar los impactos e incluso determinar si es necesario abandonar alguna acción en pro de otras con mejores resultados. Desde una perspectiva de gestión de la calidad, conocer estos elementos son claves dentro de un sistema para poder evaluar resultados y proponer mejoras claras.

1.4.3. Selección de variables

A continuación, se establecen las variables que intervienen en el objeto que se busca estudiar, identificando las variables dependientes, variables independientes y variables de control y variables intervinientes. Y, a partir de este contexto, se muestra el sujeto y objeto de estudio. Las definiciones construidas y las fuentes consultadas se pueden observar en el Anexo A.

Variables dependientes

- Contaminación atmosférica: se refiere a la presencia de agentes químicos, físicos o biológicos en la atmósfera. Esta variable se va a estudiar para determinar el impacto del sujeto de estudio.

Variables independientes

- Emisiones: representan la descarga de contaminantes a la atmósfera. Esta variable tiene impacto sobre la contaminación atmosférica.
- Fuentes de contaminación atmosférica: las fuentes de contaminación son aquellas que emiten contaminantes al aire. Las fuentes de contaminación son las que producen las emisiones descritas previamente.

Variables de control

- Resolución espacial: la resolución espacial es la variable de control ya que establece la escala a la cual se pretende evaluar el fenómeno.

Variables intervinientes

- Condiciones meteorológicas: las condiciones atmosféricas tienen un impacto directo sobre la presencia de contaminantes atmosféricos, sin embargo, al ser una variable que no se puede controlar se considera interviniente.

1.4.4. Sujeto de estudio

En el trabajo de investigación el sujeto de estudio será la evaluación de la estrategia para mejorar la calidad del aire de impulso al ciclismo.

1.4.5. Objeto de estudio

Por su parte, el objeto de estudio será la contaminación atmosférica.

1.4.6. Pregunta de investigación

¿Es posible utilizar herramientas de gestión de la calidad para establecer lineamientos de mejora de la política pública en materia de calidad del aire?

1.5. Análisis inicial de la problemática: hipótesis.

A partir de la problemática sistemática identificada con respecto a la calidad del aire en el AMG y entendiendo al ProAire como un programa que no ha logrado contrarrestar las tendencias de deterioro de la calidad del aire, o evaluar si los esfuerzos están logrando el impacto esperado, se propone la incorporación de estrategias de gestión de la calidad al proceso de elaboración de política pública. Sin embargo, para poder definir el método de intervención es necesario primero definir el proceso en el cual se propone que intervenga el proyecto (Figura 8).

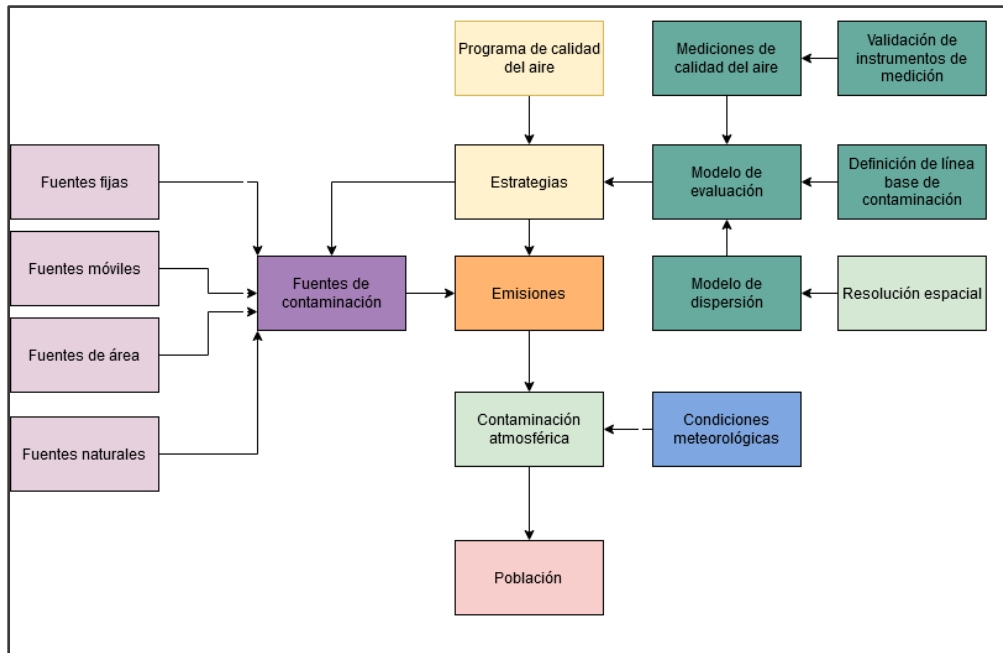


Figura 8. Modelo simplificado del sistema de calidad del aire.

Fuente: Elaboración propia

Este modelo simplificado muestra como las distintas fuentes de contaminación del aire producen emisiones que contaminan la atmósfera e impactan en la población. Para contrarrestar estas circunstancias las estrategias del ProAire buscan regular las fuentes de contaminación y reducir las emisiones que se producen. Y, en estas estrategias, se integra el proyecto con la propuesta de mejora utilizando herramientas de mejora comúnmente aplicadas en la industria. Dentro de este marco se muestra la hipótesis de la investigación:

Es posible incorporar las herramientas de la gestión de la calidad para desarrollar políticas públicas con mejores mecanismos de evaluación de desempeño.

1.6. Objetivos de la investigación

1.6.1. Objetivo general

- Diseñar metodología para la evaluación del impacto de las estrategias para mejorar la calidad del aire en el Área Metropolitana de Guadalajara a través de la aplicación de

herramientas de gestión de la calidad para establecer un precedente que pueda ser replicado y que permita estudiar e incrementar la eficiencia de las medidas.

1.6.2. Objetivos específicos

- Establecer una base cero a partir de la cual medir una mejora o deterioro de la calidad del aire mediante un análisis las tendencias históricas de la presencia de contaminantes en la atmósfera y de una evaluación de la política pública actual.
- Desarrollar una metodología para la evaluación de sensores electrónicos a través de la aplicación de herramientas estadísticas para conocer la variación del sistema de medición y su impacto en la evaluación de la calidad del aire en el AMG.
- Desarrollar un método que permita evaluar el impacto de las estrategias de la política pública en materia de calidad del aire en la población a través del uso de escenarios de contaminación que puedan ser utilizados como insumos en la toma de decisiones.

1.7. Delimitación de la investigación

Utilizando el modelo simplificado del sistema de calidad del aire y sus relaciones (Figura 8) se delimitan las áreas de interés e intervención para el proyecto de investigación con una línea punteada roja (Figura 9).

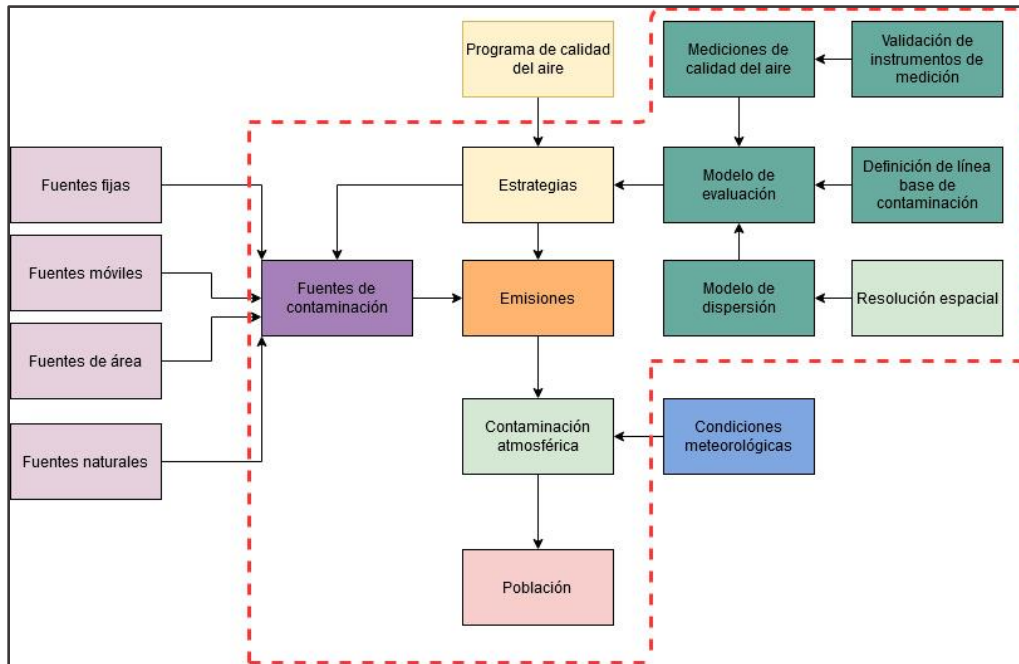


Figura 9. Resumen de las variables estudiadas, evaluadas, medidas o incluidas en el proyecto de investigación marcadas en recuadro punteado rojo.

Fuente: Elaboración propia.

En este modelo se identifica la complejidad del sistema, pero se vislumbran algunos límites establecidos para el presente trabajo de investigación. Por ejemplo, el modelo de evaluación se aplicará a una estrategia específica, no se realizará un modelo para todo el programa. Más bien, se pretende utilizar los insumos de la evaluación para definir con qué objetivo se realizará el modelo. Sin embargo, no se van a proponer nuevas estrategias o modificaciones a las estrategias presentadas.

Por su parte, la resolución espacial impacta el modelo de evaluación a través del modelo de dispersión, por lo que será una variable de control que se definirá en la investigación para determinar el enfoque necesario. La resolución espacial también dependerá a su vez de la estrategia que se evalúe y el alcance de esta.

Al ser un resumen, en el modelo se presenta que el impacto de las estrategias puede ir a las emisiones o dirigido directamente a la reducción de las fuentes de contaminación. Sin

embargo, las estrategias de la política pública pueden ir más acotadas aún (solamente a una fuente de emisión). Dependiendo de la estrategia que se seleccione, el recuadro punteado se puede extender para incluir una de las fuentes de emisión específicas. Como se observa en el recuadro azul, las condiciones meteorológicas afectan directamente la contaminación atmosférica pero no se incluye en el sistema.

Debido a que se trata de un proyecto complejo y que forma parte de una investigación mayor, en la Figura 10 se detallan los distintos componentes que lo conforman y que se deben de desarrollar para lograr los objetivos planteados. Todos los aspectos mencionados previamente, las herramientas de gestión de la calidad, la determinación de una línea base, modelos de dispersión de contaminantes, entre otros, se muestran en la figura. Con esta, se busca representar cómo se integran los distintos elementos del proyecto de investigación y cómo se suman.

A la izquierda del modelo, y en color morado, se muestran los elementos asociados con la medición de la concentración. Entre los cuales están los sensores de bajo costo, la medición analítica y las bases de datos de la SEMADET. Con líneas sólidas se muestran las relaciones directas y con líneas punteadas aquellas que tienen un impacto, pero no se ha definido el método de integración. A su vez, el color de la línea indica en qué área se espera que tenga impacto, en la medición del impacto (con color azul claro) o en el modelado de los contaminantes (color naranja).

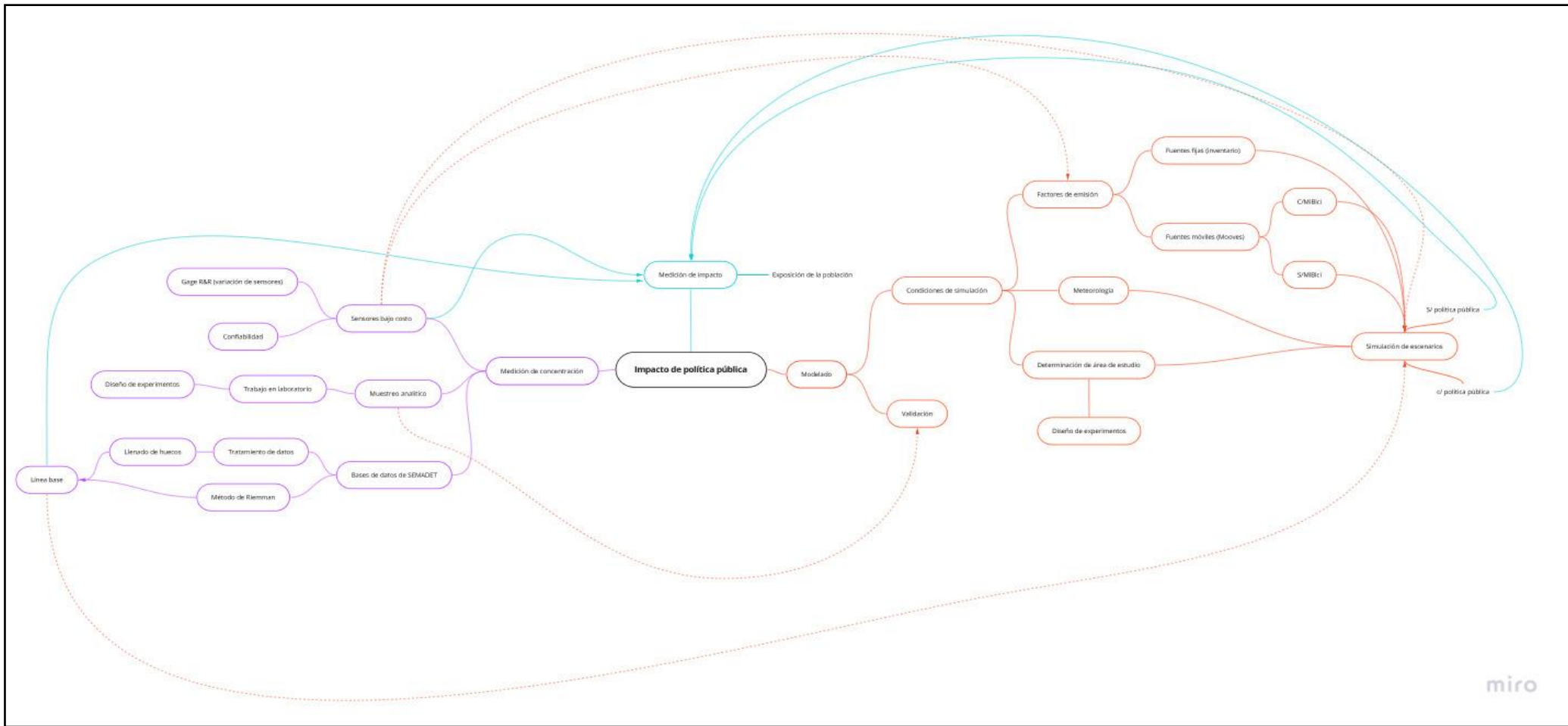


Figura 10. Diagrama detallado del proyecto de investigación del impacto de la política pública en materia de calidad del aire.

Fuente: Elaboración propia

Los sensores de bajo costo se pueden utilizar tanto en los factores de emisión como en la simulación de escenarios. Sin embargo, para utilizarlos será necesario determinar su variación a través del método Gage R&R y su confiabilidad a lo largo del tiempo. Por su parte, la medición analítica se utilizará para validar los resultados del modelo de dispersión de contaminantes. Por último, utilizando las bases de datos de la SEMADET se busca definir la línea base que sirva para evaluar el impacto de la estrategia y como insumo para los escenarios de dispersión de los contaminantes. Cabe resaltar que toda la metodología de evaluación de impacto se encuentra enmarcada por los resultados obtenidos en el análisis de las estrategias para mejorar la calidad del aire que se presenta más adelante.

1.8. Justificación y pertinencia de la investigación

Como se presentó en la sección 1.4. la problemática de la calidad del aire en el AMG se puede analizar desde una perspectiva sistemática con base en los resultados de los episodios de mala calidad del aire en el año presentados en las Figuras 4, 5, 6 y 7. Con este tipo de problemática es posible aplicar, y se puede beneficiar, de herramientas de gestión de la calidad como un análisis desde una perspectiva de DMAIC, el diseño de experimentos, un análisis del sistema de medición a través de Gage R&R y un acercamiento a la confiabilidad de los instrumentos utilizados. Además, para la elaboración de la línea base y el diseño del método para evaluar el impacto en la población es necesario aplicar conocimientos estadísticos y matemáticos como las bases para la formulación de escenarios que sean aplicables como insumos en los procesos de toma de decisiones, el cual es un pilar en la gestión de la calidad.

Entendiendo a las estrategias para reducir la contaminación atmosférica como el sistema que genera resultados para la población (exposición reducida) es posible definir a los

sensores como el sistema de medición de los resultados que sirven como los insumos para la toma de decisiones y a partir de los cuales se proponen mejoras.

2. Marco conceptual o de referencia

2.1. Estado de la cuestión

2.1.1. Gestión de la calidad en la administración pública

Evaluar el desempeño de la administración pública es algo difícil de hacer. Se debe de entender el contexto en el que se encuentra, las limitaciones de personal, presupuesto o capacidades que pueden existir. Se deben de incorporar aquellos factores externos que afectan su funcionamiento, como la corrupción o la periodicidad con la que pueden cambiar de rumbo de forma drástica. Aun así, es algo que se debe de buscar y que en distintos gobiernos y niveles de gobierno alrededor del mundo, se ha realizado con el objetivo de modificar y modernizar el funcionamiento de la administración pública e incluso los instrumentos para la rendición de cuentas.

Actualmente, los gobiernos se encuentran con retos que exigen que sean más flexibles, más eficientes y para lograrlo es necesario que utilicen modelos gestión innovadores capaces de responder a los requerimientos de la población (Dragomir, 2019; Moyado, 2011; Harrison & Stupak, 1993). Harrison y Stupak (1993) mencionan, además, que el gobierno debe de ser más sofisticado para lograr atender las necesidades del público, que cada vez cambian más rápido. Ante estas circunstancias, diversos gobiernos a distintos niveles han implementado herramientas de gestión de la calidad en sus procesos administrativos (Tomažević, Seljak & Aristovnik, 2016; Milosevic, Djuric, Filipovic & Ristic, 2013; Matei & SAVulescu, 2011; Dragomir, 2019; Matei & Lazer, 2011).

Existen distintas herramientas y metodologías utilizadas para la gestión de la calidad las cuales principalmente fueron diseñadas para ser implementados en la industria privada.

Tratar de adaptar estas herramientas de forma directa puede llevar a aplicaciones forzadas que pueden dar resultados positivos, pero también, que no generen los esperados (Milosevic et al., 2013; Tomažević et al., 2016). Para aprovechar estas herramientas es necesario comprender las diferencias entre estos dos sectores y, principalmente, las necesidades específicas del sector público. Sampairo y Romero (2017) resaltan que en los últimos cinco años se han generado estudios en los que se abordan los retos de los gobiernos y los acercamientos innovadores a estos. Otros estudios e investigaciones la materia incluyen:

- Un estudio por Matias-Pereira que aborda el planteamiento estratégico para incrementar la eficiencia en las políticas públicas en Sao Paulo (Matias-Pereira, 2012).
- Un artículo por Fleury y Pinto en el que se resaltan los conceptos y las eficiencias en el gasto público como herramienta estratégica de la gestión pública (Fleury & Pinto, 2012).

En estos párrafos se destacan ciertos puntos claves, que refieren a capacidad de adaptación, capacidad de dar respuesta a las demandas de la población y la necesidad de eficiencia y flexibilidad. Ante este escenario distintos gobiernos, y asociaciones no gubernamentales, han optado por estrategias como la Gestión de la Calidad Total (TQM por sus siglas en inglés) como la ruta para cubrir estas nuevas necesidades (Matei & SAVulescu, 2011; Matei & Lazer, 2011; Harrison & Stupak, 1993). Este es un sistema que pretende mejorar la calidad y competitividad a la vez que se aumentan los estándares de sus servicios logrando procesos de mejora continua (Sonmezturk & Karaman, 2019). Sonmezturk y Karaman (2019) mencionan que en la industria se utilizan los siguientes factores críticos de

éxito para evaluar el desempeño de un programa implementado. A continuación, se destacan los más relevantes:

- Compromiso y liderazgo de la alta gerencia.
- Satisfacción del cliente.
- Responsabilidad y participación de los empleados.
- Resultados de calidad.
- Diseño del producto o servicio.
- Educación y entrenamiento.
- Gestión del proceso
- Análisis de la información.
- Innovaciones importantes.

Observando estos criterios es posible identificar que podrían ser aplicados a la administración pública y, específicamente, en la elaboración, gestión y control de políticas públicas. Aspectos como satisfacción del cliente (la ciudadanía) que se obtiene cuando se cumplen los objetivos; el diseño del servicio, que se puede ver como la política; análisis de la información, que implica establecer criterios, objetivos y métodos de monitorearlos, entre otros. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, no se deben de perder de vista la diferencia entre la industria privada y la administración pública. Una de las principales distinciones es que en el sector público no se busca valor a cambio de dinero (Milosevic et al., 2013).

Como una alternativa a la Gestión de la Calidad Total, Milosevic et al. (2013) proponen la evaluación comparativa como la herramienta de calidad óptima para la administración pública. Por su parte, Vitantzakis (1995), también establece a esta como una opción distinta para la introducción de un sistema de calidad en el sector público. De acuerdo

con Auluck (2002), su aplicación podría permitir a las organizaciones contar con un acercamiento más sistemático a la resolución de problemas.

Milosevic et al. (2013), mencionan a su vez, que es necesario que se implementen las herramientas más actuales en la administración pública para que esta logre aprovechar al máximo sus escasos recursos. Dentro de los distintos métodos de evaluación comparativa para el sector público, Milosevic et al. (2013), destaca los siguientes:

- Evaluación comparativa obligatoria: con esta se busca exponer huecos en el desempeño ya sea de prácticas generalizadas o específicas.
- Evaluación comparativa de medición de actuación: permite generar un análisis comparativo del desempeño de la organización para comunicarlos al público.
- Evaluación comparativa estratégica: se enfoca en el desarrollo de la organización a largo plazo.
- Mejor valor: con este acercamiento se pretende que los sectores de la administración pública busquen generar asociaciones efectivas y generar acercamientos innovadores a la dotación de los servicios.

Para lograr una implementación satisfactoria de alguno de estos métodos de la evaluación comparativa es necesario conocer los resultados que otros procesos similares han tenido para lograr plantear objetivos alcanzables (Milosevic et al., 2013). Sin embargo, también es necesario contar con herramientas que permitan evaluar los impactos que se puedan generar y que sirvan como insumos para el proceso de toma de decisiones. En su publicación, Heckman (2012), analiza el impacto de los procesos administrativos en los

resultados de la política pública nacional de calidad del aire en Estados Unidos. En este evalúa si la calidad en la administración de cada estado impacta los resultados de las medidas de control.

Heckman (2012), establece un precedente claro en el acercamiento de cómo la una perspectiva de calidad puede impactar los resultados de las políticas públicas en temas relacionados con el medio ambiente, específicamente, de calidad del aire. Además, Heckman (2012), genera un modelo de regresión con distintas variables para identificar de una forma cuantitativa el impacto de la calidad en la administración pública, lo que resalta el valor de la aplicación de modelos matemáticos como métodos de evaluación. Para esto realiza una evaluación de la calidad en el desempeño de las administraciones públicas en 47 de los 50 estados de Estados Unidos, los objetivos de la reducción de contaminación de dióxidos de nitrógeno en fuentes fijas industriales y las emisiones que se tienen a lo largo del tiempo.

2.2. Conceptos y enfoques teóricos relacionados

2.2.1. Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (DMAIC)

Como sucede con diversos conceptos relacionados con la gestión de la calidad, es posible encontrar distintas definiciones dependiendo del autor consultado, tal es el caso para la metodología DMAIC que obtiene su nombre por las etapas de su proceso, que son: Definir, Medir Analizar y Controlar. Este método consiste en definir el problema, realizar las mediciones de los datos que se relacionan con este, analizar los valores para obtener información adicional, establecer estrategias de mejora para el problema y establecer el método de control a lo largo del tiempo. Su aplicación permite realizar un acercamiento sistemático a un proyecto de mejora de proceso (IBM Center for the Business Government,

2007) y cuenta con un formato estructurado para su aplicación a través de operaciones iterativas (Garza, González, Rodríguez, & Hernández, 2016). A pesar de que comúnmente se utiliza para proyectos orientados al cliente, también se puede aplicar con orientación a empleados (Sedighi, Lu, Megahed, & Cavuoto, 2019) e incluso en la administración pública (identificada como un servicio) (IBM Center for the Business Government, 2007).

Aplicar este tipo de metodologías, sin importar el rubro profesional o la actividad económica, permite estructurar el acercamiento a la resolución de problemas o el desarrollo de proyectos de mejora. Esta metodología incrementa las probabilidades de éxito de la medida a adoptar ya que, entre otras cosas, pretende acotar y justificar el problema, con lo que se reduce el riesgo de aplicar una estrategia equivocada. Incluso, en el documento por IBM Center for the Business Government (2007), se destaca que la metodología ha evolucionado de una colección de técnicas a algo que asemeja un sistema de gestión.

Para definir el problema es deseable conocer de antemano características relevantes y/o el contexto en el que sucede permite examinar los datos que se generan para validar (o desmentir) la información estadística que se elabora en la etapa de la medición. Evaluar los datos generados de esta forma permite discernir información o lograr análisis más profundos, sin embargo, también se debe tener precaución de no caer en prejuicios que lleven a la formulación de conclusiones erróneas.

En la etapa de la definición del método se establecen los aspectos claves del proceso u organización (Garza, González, Rodríguez, & Hernández, 2016) (Improta, et al., 2017) (Sedighi, Lu, Megahed, & Cavuoto, 2019). En la medición se busca comprender el proceso sin modificaciones a través de la recolección de información, lo que permite identificar las

causas de la problemática (Garza, González, Rodríguez, & Hernández, 2016) (Improta, et al., 2017) (Sedighi, Lu, Megahed, & Cavuoto, 2019). Durante el análisis se estudian los datos recolectados en la etapa de la medición para comprender a fondo el proceso que está generando un problema o se puede mejorar (Garza, González, Rodríguez, & Hernández, 2016) (Improta, et al., 2017) (Sedighi, Lu, Megahed, & Cavuoto, 2019). En la mejora se definen las estrategias a seguir para contrarrestar las dinámicas identificadas en el paso anterior, se generan proyectos piloto y se estudian los resultados (Garza, González, Rodríguez, & Hernández, 2016) (Improta, et al., 2017) (Sedighi, Lu, Megahed, & Cavuoto, 2019). El control es un aspecto que muchas veces se descuida, pero que es de gran relevancia (IBM Center for the Business Government, 2007), en este se establecen mecanismos que aseguren que se arribe al objetivo planteado y la sustentabilidad del sistema (Garza, González, Rodríguez, & Hernández, 2016) (Improta, et al., 2017) (Sedighi, Lu, Megahed, & Cavuoto, 2019).

Las áreas de aplicación de estas metodologías no son unidimensionales y se extienden más allá de los procesos industriales y, como se mencionó anteriormente, de su implementación para clientes externos. Como presentan Sedighi, Lu, Megahed & Cavuoto (2019) es posible analizar las condiciones que generan fatiga a los empleados (cliente interno) para obtener mejoras en los procesos y en la calidad de vida (desde una perspectiva laboral) del personal. Por su parte, Improta, et al. (2017) evalúan los tiempos de salida de pacientes en un hospital tras ser operados de la rodilla, con el objetivo de incrementar la eficiencia de este procedimiento y generar ahorros para las personas atendidas. También, Garza, González, Rodríguez & Hernández (2016) presentan un acercamiento innovador en el que se realizan simulaciones a través de técnicas multicriterio para evaluar distintas soluciones. Este

acercamiento pretende ahorrar tiempos de implementación de las estrategias y reducir la incertidumbre su aplicación.

Estas aplicaciones innovadoras también se pueden llevar a la administración pública. En su reporte, IBM Center for the Business Government (2007) presenta distintos ejemplos de aplicaciones de metodologías de gestión de sistemas para mejorar el servicio que se le da a la población. Sin embargo, es relevante resaltar que en el reporte se destaca la importancia de que la metodología de DMAIC aplicada se acote a las condiciones del sector público (IBM Center for the Business Government, 2007). A su vez, se enfatiza que, de ser implementado de forma correcta, se pueden obtener muchos beneficios pero que de lo contrario se corre el riesgo de que su aplicación no genere impacto real (IBM Center for the Business Government, 2007).

Tras observar las diversas áreas de implementación de esta metodología, que van desde el análisis de la fatiga de empleados hasta la administración pública, y de las herramientas complementarias que se utilizan (como la simulación a partir de técnicas multicriterio), se puede concluir que es posible aplicar este esquema para políticas públicas, específicamente en calidad del aire. En el documento de la CEDEMA se resalta que *“Los esfuerzos por mejorarla deben apoyarse en una política que se adapte a las necesidades específicas de las regiones, y responder tanto a los retos sociales como al crecimiento de las zonas urbanas”* (CEMDA, 2013).

Bajo esta visión de la problemática es posible implementar una metodología como DMAIC para definir el problema (¿por qué no mejora la calidad del aire en el AMG?), medir (obtener datos de calidad del aire en distintos puntos de la ciudad y relacionarlos con

variables de tiempo, actividad económica, etc.), analizar (estudiar la información recabada para identificar dinámicas posibles que no se están atendiendo y generar una comparativa con las estrategias que se buscan implementar), mejora (aplicando herramientas de modelación de la calidad del aire es posible evaluar alternativas de forma ágil y económica) y control (definir los esquemas de evaluación necesarios como medida de monitoreo y control de la calidad del aire).

2.2.2. Métodos de medición de la calidad del aire

Previo a la definición de estrategias para mejorar la calidad del aire en una ciudad es importante conocer la dimensión del problema y sus causas (INECC, 2009a). Para esto, es relevante contar con algún método de medición periódica de la calidad del aire en distintos puntos del área a estudiar con el que se pueda generar datos que permitan establecer un primer nivel de comprensión de las circunstancias (INECC, 2009a). La medición de los contaminantes criterio es un proceso complejo con muchas variables por considerar y que requieren una inversión alta. La complejidad va desde el equipo, la ubicación de este e incluso la calidad de los datos generados. El Instituto Nacional de Ecología (hoy Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC) elaboró una serie de manuales en colaboración con agencias de cooperación internacional en los que se abordan temas relacionados con la medición y gestión de la calidad del aire, estos son:

1. Principios de la medición de la calidad del aire: este primer manual sienta las bases de términos, conceptos y metodologías que se utilizan en el resto de los manuales (INECC, 2009a). Uno de los capítulos de este primer manual describe conceptos

asociados con la gestión de la calidad en los sistemas de medición de la calidad del aire que incluye temas como (INECC, 2009a):

- a. Aseguramiento de la calidad
 - b. Control de la calidad
 - c. Evaluación de la calidad
2. Sistema de medición de la calidad del aire: en el manual se establece que un Sistema de Medición de la Calidad del Aire (SMCA) *“es el conjunto organizado de recursos humanos, técnicos y administrativos empleados para observar el comportamiento de la calidad del aire* (INECC, 2009b). Dentro de los objetivos de un SMCA se encuentran (INECC, 2009b):
- a. Evaluar el cumplimiento de las normas de calidad del aire
 - b. Comunicar a la población los niveles de contaminación
 - c. Verificar los efectos las medidas de control de la contaminación atmosférica
 - d. Promover la gestión ambiental
3. Redes, estaciones y equipos de medición de la calidad del aire: el manual describe los lineamientos para el diseño de una red de monitoreo, resaltando que el primer paso es establecer los objetivos del monitoreo a realizar. Otros temas que se revisan son la selección de sitios de muestreo y los equipos de muestreo (INECC, 2009c). Sin embargo, en el manual no se analizan los sensores de bajo costo.
4. Operación de estación de medición de la calidad del aire, mantenimiento y calibración de sus componentes: en el manual se describen las operaciones que se deben de realizar para que los datos recolectados cuenten con la calidad necesaria. Para esto se realizan calibraciones y se da mantenimiento a los equipos (INECC, 2009d).

5. Protocolo de manejo de datos de calidad del aire: en este manual se describen los protocolos para el manejo adecuado de los datos, con el objetivo de que la información que se genere en el SMCA sea confiable. Este tipo de tratamiento estandarizado permite comparar los resultados que se obtienen entre distintas redes de monitoreo (INECC, 2009e).
6. Lineamientos técnicos y administrativos para la auditoría de Sistemas de Medición de la Calidad del Aire: se describen las bases técnicas que se utilizan para auditar los sistemas de medición de la calidad del aire. Con estas auditorías se busca conocer el funcionamiento de los equipos de medición y detectar si hay alguna falla (INECC, 2009f).

2.2.3. Sensores de bajo costo

Se denomina sensores de bajo costo a un rango amplio de sensores para el monitoreo de la calidad del aire que utilizan métodos electrónicos para registrar la concentración de contaminantes en el ambiente. Este tipo de sensores ha crecido en su uso a lo largo de los años debido a distintos factores, entre los que se encuentra su costo en comparación con el costo de adquisición y mantenimiento de estaciones como las descritas en la sección 2.2.2. Estos a su vez permiten extender las redes de monitoreo y tener información acerca de la contaminación atmosférica en distintos sitios de la ciudad en la que antes no se tenían datos e incluso incrementar la resolución espacial del sistema actual (European Commission, 2019b) (Li, J.; Mattewal, S.; Patel, S.; Biswas, P., 2019) (Zheng, y otros, 2018).

Sin embargo, también se han cuestionado mucho los resultados que obtienen este tipo de sensores y se han dedicado diversos estudios para la evaluación de su precisión y exactitud

(European Commission, 2019b) (Li, J.; Mattewal, S.; Patel, S.; Biswas, P., 2019) (Zheng, y otros, 2018) (Castell, Dauge, & Schenider, 2016) (Polidori, Papapostolou, & Zhang, 2016) (World Meteorological Organization, 2018) (Munir, Mayfield, Coca, Jubb, & Osammor, 2019) (Karagulian, Barbieri, Kostev, & Spinelle, 2019) (deSouza, Anjomshoaa, Duarte, Kahn, & Kumar, 2020) . A pesar de esto, siguen desarrollándose nuevos sensores que se deben de evaluar y a la fecha no se cuenta con un procedimiento estandarizado para la evaluación de estos (European Commission, 2019b). En su reporte de los resultados obtenidos a partir de la revisión de artículos de evaluación de sensores de bajo costo de distintas marcas, la Comisión Europea (2019b) establece que la mayoría de los estudios se limitan a utilizar estadísticos como R^2 para evaluar el desempeño de los sensores y se destaca la necesidad de utilizar otros más robustos como el error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés).

Debido a la variedad en metodologías, estudios y equipos de medición de bajo costo se cuenta también con una amplia gama de resultados, sin embargo, es posible identificar algunos aspectos rectores:

- Las condiciones meteorológicas son factores que afectan el error en el valor registrado por el sensor.
- La variación de los datos incrementa con el tiempo.
- Dependiendo de la concentración del contaminante en el ambiente puede haber mayor o menor error en la medición.

- El proceso de ajuste de los valores comparados contra un dato conocido es de gran importancia.

Retomando el primer punto, de nuevo, la Comisión Europea (2019b) establece que la mayoría de los estudios se realizan en campo y no en laboratorio, lo que no permite evaluar los efectos de las concentraciones de los distintos contaminantes en el valor registrado para cada uno de estos. A su vez, se menciona que, debido a que el error se puede ver afectado por las condiciones meteorológicas y de la concentración de los otros contaminantes si se realiza una evaluación y calibración en un sitio adyacente a una estación de monitoreo es posible que estos no sean validos cuando se coloque el sensor en su ubicación final (European Commission, 2019b).

Para el caso de los sensores electrónicos, debido a la diferencia en el funcionamiento y la precisión y exactitud de los datos se puede considerar como una red distinta que comparte el mismo sitio. Considerando estos aspectos es necesario presentar una metodología para la evaluación de sensores de bajo costo que sea robusta y replicable. Como se describe en los manuales del INECC (INECC, 2009a) (INECC, 2009b) (INECC, 2009c) (INECC, 2009d) (INECC, 2009e) (INECC, 2009f) el procesamiento y manejo adecuado y estandarizado de los datos es lo que permite realizar comparaciones entre dos redes de monitoreo.

Por último, se debe destacar que este proyecto no busca evaluar los sensores si no definir una metodología para su evaluación a través de la aplicación de herramientas comúnmente utilizada en la industria para la gestión de la calidad, que, como se describió brevemente en el Manual 1 del INECC (INECC, 2009a), se debe considerar dentro del sistema de monitoreo de la calidad del aire. Esto se debe a que, la SEMADET, en su búsqueda

por extender la red de monitoreo, se encuentra dentro de un proceso de evaluación de sensores electrónicos de bajo costo para su colocación en distintos puntos de la ciudad de tal forma que se logre contar con información con una mayor resolución espacial e incluso extender el área de cobertura. Por lo tanto, conocer el desempeño de estos dispositivos es de gran importancia para que los datos que produzcan puedan ser considerados como válidos para analizar los niveles de la calidad del aire e incluso determinar la exposición de la población y su riesgo asociado.

2.2.4. Gage R&R

Este método busca evaluar la precisión de la calibración de un instrumento de medición, determinando si las mediciones son repetibles y reproducibles (ASQ, 2018) (Mayoral, 2017) (Heckman E. , 2017). Dicho de otra manera, al realizar este tipo de análisis se pretende conocer cuál es la variación que se puede atribuir sistema de medición, motivo por el cual se realizan Estudios del Sistema de Medición (MSA por sus siglas en inglés). Realizar el análisis del sistema de medición es un paso crítico antes de tomar cualquier decisión basada en datos, por lo que, si se van a utilizar mediciones como base para tomar una decisión es relevante que se determine previamente cuál es el error y qué tan confiable es esa medición (MoreSteam, s.f.).

En el caso de la calidad del aire en el AMG, el sistema de medición se puede definir como los sensores de calidad del aire colocados en la ciudad que se utilizan para determinar sitios en los que se emiten o concentran los contaminantes criterio. De no tomar en cuenta la variación atribuible al sistema de medición se corre el riesgo de llegar a conclusiones equivocadas.

Para caracterizar la calidad de los datos comúnmente se utilizan las siguientes propiedades estadísticas (Healy & Wallace, 2011) sesgo, repetibilidad y reproducibilidad (Figura 11, 12, 13). El sesgo se refiere a la desviación del promedio de las mediciones del sistema con respecto a un valor de referencia. La repetibilidad se refiere a la variación que se produce por el dispositivo de medición (Heckman E. , 2017). Cuando el instrumento se encuentra en las mismas condiciones para cada medición y esta es tomada e interpretada por el mismo operador (o con los mismos preceptos cada vez), se está estudiando este tipo de variación. Por su parte, la reproducibilidad se refiere a la variación que se produce por el sistema de medición, en la que distintos operadores realizan la medición con el instrumento (Heckman E. , 2017).

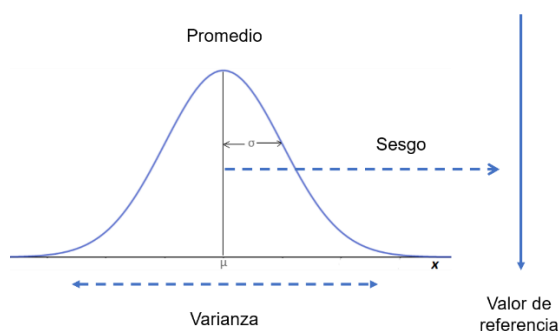


Figura 11. Sesgo.

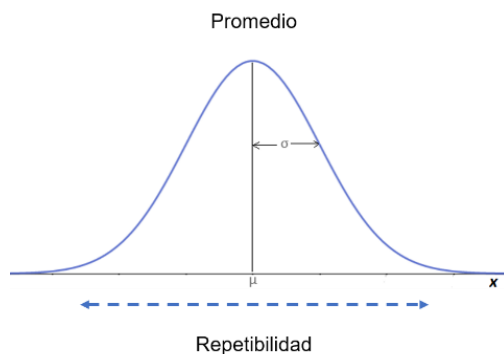


Figura 12. Repetibilidad.

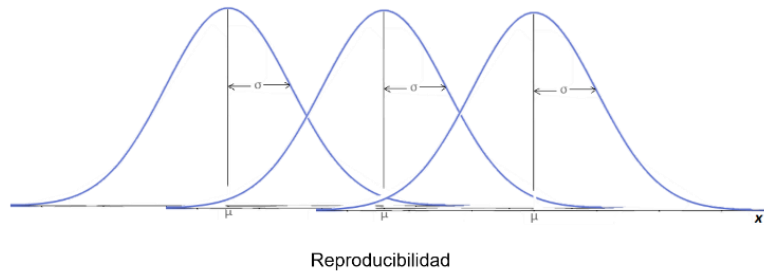


Figura 13. Reproducibilidad.

La ecuación para la variación se presenta a continuación (Mayoral, 2017):

$$\sigma^2 = \sigma_{error}^2 + \sigma_{parte}^2 + \sigma_{operador}^2 + \sigma_{operador:parte}^2$$

(1)

- σ^2 es la varianza total
- σ_{error}^2 es la varianza atribuible al error inherente de la medición, esta es la repetitividad
- σ_{parte}^2 es la varianza que se genera por las diferencias entre los elementos, partes, estudiadas
- $\sigma_{operador}^2$ es la varianza que se relaciona con los operadores
- $\sigma_{operador:parte}^2$ se refiere a la varianza que se genera cuando hay interacción entre el elemento y el operador

La variación en el experimento propuesto se determinará colocando un sensor electrónico adyacente a los sensores de monitoreo de la SEMADET y evaluando la variación del sensor electrónico en relación con el resultado de la SEMADET. Para nulificar el efecto del operador, que se puede producir por el manejo de un aparato o por la interpretación de los datos se deberá establecer un porcentaje mínimo de datos recolectados en una hora para establecer el promedio y con esto determinar la concentración asignada a esa hora de monitoreo. En el Manual 2, Sistemas de medición de la calidad del aire del INE (ahora

INECC), se establece que, para el manejo de datos, se recomienda tener por lo menos el 75% de los datos (INECC, 2009b). Por lo tanto, se recomienda que para que una medición sea válida y comparable deberá contar por lo menos con el 75% de los datos posibles en una hora, esto se traduce en 45 minutos. En caso de contar con menos valores esto puede impactar la variación de los datos y se deberá de atribuir al operador.

Tras haber definido la estrategia para eliminar el impacto del operador se propone modificar las variaciones atribuidas a este factor e incorporar las características meteorológicas. Como establecen Healy y Wallace (2011), en un sistema automatizado (circunstancia aplicable al monitoreo de la calidad del aire), la prueba de la reproducibilidad se elabora a partir de las características físicas en la toma de las pruebas. Sin embargo, y como discuten Wrzochal y Adamczak (2019), debido a que las circunstancias de las mediciones no son completamente reproducibles, se deberán agrupar los datos de acuerdo con niveles para cada factor considerado y medir las variaciones para cada grupo.

Por otro lado, se destaca la importancia de considerar si la concentración es uno de los factores físicos a analizar, debido a que se ha identificado que con distintas concentraciones la variación de los resultados cambia (Zheng, y otros, 2018). Esto quiere decir que, como se establece en el reporte de la Comisión Europea (2019b), si las mediciones se realizan fuera de laboratorio y posteriormente se mueve el aparato, las condiciones originales de medición cambian, lo que puede afectar la medición.

Debido a la propia naturaleza de la prueba, la elaboración del diseño de experimento a través de la cual se obtengan los resultados a estudiar es de gran importancia (Wrzochal & Adamczak, 2019). De acuerdo con Louka y Besseris (2010), un diseño de experimento

inadecuado puede llevar a subestimaciones de la variación de las mediciones. Para esto, se deberán de considerar las distintas circunstancias físicas a las que estarán expuestos los sensores.

Como se mencionó previamente, distintas marcas permiten ajustar el valor reportado en función del valor registrado. Sin embargo, es necesario conocer su variación ya que si esta es muy amplia o la reproducibilidad tiene un alto impacto no será factible programar un ajuste a los datos generados que apliquen para las distintas circunstancias. En la industria automotriz los límites de variación y clasificaciones que se utilizan son; hasta 10% es una variación aceptable, de 10 a 30% se puede tomar la medida, pero con ciertas consideraciones y mayor al 30% es inaceptable (Healy & Wallace, 2011) (Wrzochal & Adamczak, 2019) (Louka & Besseris, 2010), aun así, se deberá de considerar si estos límites son apropiados para el fenómeno que se pretende medir. Por su parte, si se logran comprender las variaciones en un futuro sería posible generar modelos de ajuste del valor reportado que incorporen las distintas circunstancias para entregar el mejor valor posible (Li, J.; Mattewal, S.; Patel, S.; Biswas, P., 2019).

2.2.5. Confiabilidad

La confiabilidad se refiere a la probabilidad de que un producto o sistema opere de forma adecuada (este nivel se determina de forma previa, en el caso de nuestro estudio a través del Gage R&R) a lo largo de un periodo de tiempo específico (ASQ, 2007). Sin embargo, es importante no confundir a la confiabilidad con la calidad, la segunda estudia qué tan bien se desempeña un objeto mientras que la confiabilidad analiza qué tan bien mantiene ese objeto el nivel de calidad original a lo largo del tiempo y en distintas condiciones (ASQ, 2007).

La ingeniería de la confiabilidad se basa en principios teóricos y prácticos con los que se puede determinar la probabilidad y capacidad de las partes, componentes, equipos, entre otros, de realizar sus funciones a lo largo de cierto periodo de tiempo sin fallas, para esto se debe de contar con un entorno específico y un nivel de confianza deseado (HBM Prensaia, 2020). A pesar de que el entorno en el que se colocarán los equipos de medición no se encuentra controlado, sí es posible asumir que van a contar con comportamientos periódicos generalizables.

Para comprender a la confiabilidad es necesario tener claro algunos conceptos que la componen (ASQ, 2007):

- Probabilidad: se refiere a la probabilidad de que se obtenga un resultado positivo en la medición.
- Función deseada: qué es lo que se espera obtener en el proceso o de ese aparato.
- Resultado satisfactorio: que el proceso o aparato se desarrolle de acuerdo con una especificación y con un grado de conformidad aceptable.
- Periodo de tiempo específico: es el tiempo de medición del aparato a lo largo del tiempo, se puede dividir en minutos, días, meses o ciclos.
- Condiciones específicas: las condiciones del sitio donde se lleva a cabo el proceso, que pueden incluir temperatura, presión, humedad relativa, etc.

Como se mencionó previamente, la confiabilidad es la probabilidad de obtener un resultado positivo en el proceso a lo largo del tiempo, por lo que se trata de una función con la variable tiempo como independiente. Debido a que los sensores de bajo costo estarán expuesto a distintas condiciones meteorológicas y de concentración de contaminantes,

aunado a que se estima que su vida útil es corta (por ejemplo, hay sensores con vida útil de dos años) es importante determinar la confiabilidad de estos para conocer si los datos que registran siguen siendo válidos en determinado periodo. A diferencia de otros ejemplos de confiabilidad, en este estudio, el momento t en el que hay un desperfecto no se trata necesariamente de algo definitivo, si no que los datos ya no son útiles para analizarlos, aunque siga reportando valores.

En su artículo, Zhen et al. (2018) destacan las diferencias en los resultados registrados por sensores de bajo costo al utilizarlos en ambientes de baja y alta concentración de material particulado. Con este antecedente, y tomando en cuenta las posibles variaciones en las ubicaciones de los sensores, se deberán de realizar pruebas periódicas que ayuden a caracterizar sus desempeños para cada circunstancia. A partir de estas pruebas, y utilizando el acercamiento de la confiabilidad se pretende determinar si mantienen los niveles estimados en las pruebas iniciales.

Comúnmente la confiabilidad se utiliza en la industria privada para estudiar y proponer mejoras en el sistema o en los productos elaborados, en este caso, se propone su uso como insumo para apoyar el proceso de toma de decisiones con respecto a los sensores de bajo costo utilizados. Por otro lado, debido a que la temporalidad del proyecto no permite realizar este análisis de confiabilidad, este alcance se emitirá como una recomendación para la SEMADET como un procedimiento altamente importante para asegurarse de la calidad de los datos generados en campo.

2.2.6. Redes neuronales

La elaboración de un modelo de calidad del aire depende de su capacidad de describir al sistema en términos matemáticos (El-Harbawi, 2013). En materia ambiental, existen distintos modelos que buscan representar los procesos naturales, un ejemplo de estos que se ha utilizado en este tipo de sistemas es la regresión lineal, sin embargo, cabe destacar que hay una gran cantidad de procesos naturales que presentan un comportamiento no lineal (Slini, Karatzas, & Moussiopoulos, 2003), tal es el caso con los contaminantes atmosféricos.

Los modelos de dispersión del aire se pueden agrupar en cuatro categorías: Gaussianos, numéricos, estadísticos (empíricos) y físicos (El-Harbawi, 2013). De estos, el método estadístico puede aprovechar la información recolectada por los sistemas de monitoreo para identificar las tendencias del sistema y realizar predicciones o llenado de huecos en los datos. Bajo este esquema de aprovechamiento de la información recolectada, también es posible aplicar otro tipo de modelos, como las Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Las RNA son modelos estadísticos que forman parte de la familia de la inteligencia artificial y tienen la capacidad de aprender relaciones complejas en un sistema entre las entradas y las salidas del mismo (Tamas, y otros, 2014). Las RNA originalmente fueron concebidas como métodos para modelar el sistema nervioso central (Khare & Nagendra, 2007). Sin embargo, su naturaleza flexible y adaptable hace que sean un método viable para modelar variables ambientales (Barai, Dikshit, & Sharma, 2007) por su capacidad para aproximarse a funciones no lineales con poca o ninguna información previa sobre la relación de sus componentes. Para el modelado usan una combinación compleja de pesos y funciones

de activación que convierten las variables de entrada en una de salida (Slini, Karatzas, & Moussiopoulos, 2003).

Una red neuronal está conformada por sistemas paralelos entrelazados y cuentan con un elemento básico, llamado neurona (Khare & Nagendra, 2007). Las entradas son escalares que se multiplican por pesos y se ingresan en funciones que producen como resultado un escalar de salida (Hagan, Demuth, Beale, & De Jesús, 2014). Para su uso como método de llenado de huecos es necesario alimentar información sobre el sistema al modelo en un proceso que se determina como entrenamiento. En este momento se le alimentan datos históricos que se utilizan para modificar los pesos y obtener predicciones confiables (Russo, Raischel, & Lind, 2013).

La aplicación de redes neuronales como modelo de llenado de huecos no es nuevo y es posible identificar literatura que aborda el tema desde distintas perspectivas y aplicando arquitecturas diferentes. Como método de imputación de datos se han obtenido distintos niveles de certeza. De acuerdo con la investigación realizada, la mayoría de estos modelos se basan en llenado de huecos por horizonte de tiempo, en este caso se analiza la tendencia del comportamiento en una estación, se entrena el modelo para este escenario y se llenan los valores que no se tienen (Junninen, Niskaa, Tuppurainenc, & Kolehmainen, 2004) (Junger & Ponce de Leon, 2015) (Freeman, Taylora, Gharabaghi, & Théa, 2018). Sin embargo, para esta investigación se propone incorporar y evaluar el desempeño de una red que identifique las relaciones espaciales de los datos, donde la información de la concentración recabada de cada estación sirve para llenar el vacío.

2.2.7. Línea base

Al igual que en los sistemas de calidad de la industria es necesario contar con datos para la toma de decisiones (Hoffa & Laux, 2007). A partir de esto, se establece la necesidad de tener una línea base contra la cual comparar el desempeño de la estrategia. Sin embargo, al realizar revisiones bibliográficas es posible determinar que no hay solo una forma de analizar el impacto de las políticas públicas en materia de calidad del aire. A continuación, se muestran los principales hallazgos agrupados en tres grupos con respectivas subdivisiones.

Línea base a partir de proyecciones o estimaciones de emisiones y contaminación atmosférica tras la aplicación de las estrategias para mejorar la calidad del aire:

- Proyección de emisiones. Los documentos de la Comisión de las Comunidades Europeas (Commission of the European Communities, 2005) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2011) presentan un modelo de proyección de emisiones basado en información de estimaciones de desarrollo económico, crecimiento del PIB, crecimiento poblacional y estimaciones del impacto de las políticas. Aunado a lo anterior, la EPA hace una aproximación de las emisiones que se tendrían si no hubiera ningún programa de control para analizar la diferencia entre escenarios.
- Proyección de la contaminación atmosférica. Tras elaborar las estimaciones de emisiones ambos documentos (Commission of the European Communities, 2005) (EPA, 2011) describen la elaboración de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos. A continuación, se muestran los procesos registrados en cada reporte (Figura 14 y 15).

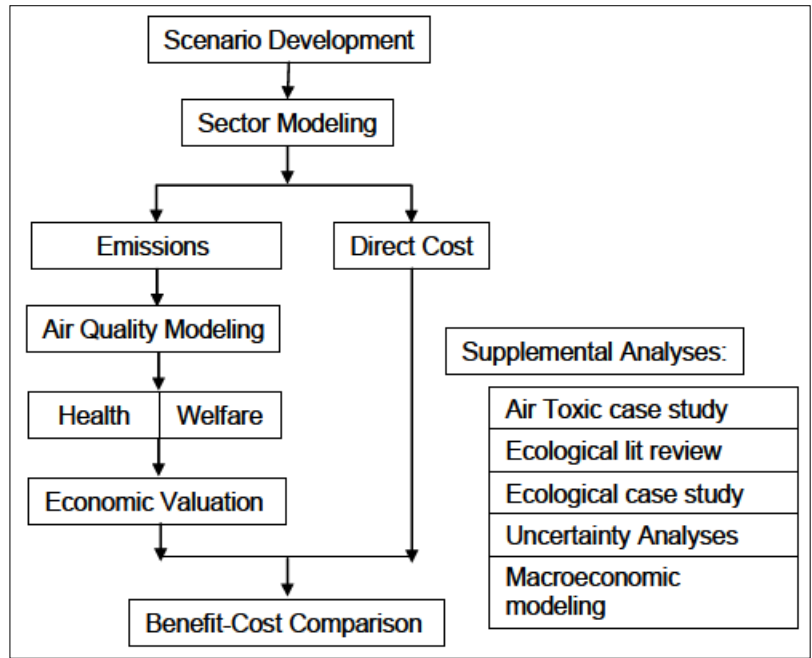


Figura 14. Marco de referencia para la elaboración de escenarios de acuerdo con EPA, 2011.

Figura tomada del documento: The Benefits and Costs of the Clean Air Act, p. 19 (EPA, 2011).

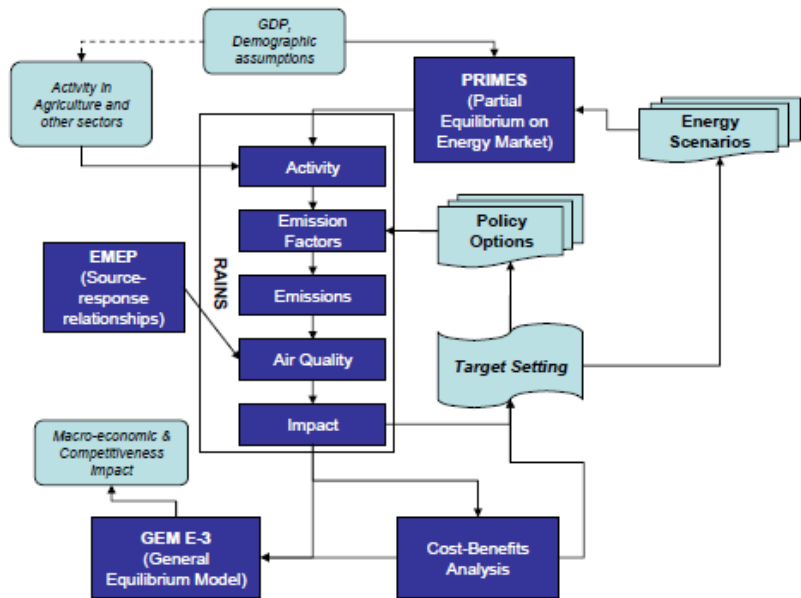


Figura 15. Marco de referencia para la elaboración de escenarios de acuerdo con Comisión de las Comunidades Europeas, 2005.

Figura tomada del documento: Annex to: The Communication on Thematic Strategy on Air Pollution and The Directive on “Ambient Air Quality and Clean Air for Europe” p. 153 (Commission of the European Communities, 2005).

Estos métodos son los más robustos, ya que estiman las emisiones y las concentraciones de contaminantes comprendiendo las dinámicas económicas y de crecimiento poblacional y establece objetivos claros de las estrategias. Esto a su vez hace que sea fácil evaluar la evolución de las estrategias y al final del periodo de aplicación definir si se cumplieron o no los objetivos. Sin embargo, también involucra una caracterización más detallada de las fuentes de emisión y un modelado más preciso de las dinámicas de emisión, reacción y dispersión de contaminantes. A su vez, también involucra modelado meteorológico como la base para generar los modelos de dispersión.

Línea base a partir de la comparación de las concentraciones de años anteriores:

- Año base estático. En el documento de Evaluación del desempeño del Plan de Acción de Prevención y Control de la Contaminación del Aire por el Consulado de Cooperación en Medio Ambiente y Desarrollo de China seleccionan las concentraciones de contaminantes en el año 2012 y se estiman reducciones en la concentración del promedio anual a partir de estos valores (CCICED, 2014). Con base en esta información se realizan modelaciones de la dispersión de contaminantes en China en el año 2012 y 2017.
- Tendencia de años anteriores. En el Reporte de avances de seis meses del Programa: Zona de Emisión Ultra Baja del Centro de Londres (Mayor of London, 2019) se busca evaluar el impacto de una estrategia específica que tiene una zona de aplicación

establecida. Para hacerlo, se analizan las tendencias de otras zonas de la ciudad y se compara contra la tendencia del área de aplicación para tratar de aislar el impacto de la estrategia.

La principal desventaja de estos métodos es que se analizan con base en información desactualizada y no se contemplan los cambios de dinámicas de emisión con el paso del tiempo. Pero, también es útil para estimar el desempeño anual y la evolución de la calidad del aire. Además, como se muestra en el segundo caso, se pueden identificar ciertas tendencias. Debido a la disponibilidad de información por parte del Sistema de Monitoreo Atmosférico de Jalisco (SIMAJ) de la SEMADET este método puede ser aplicado en la zona de interés, con una resolución espacial similar a la que se presenta en el caso de Londres (Mayor of London, 2019) pero con resolución temporal mayor.

Línea base a partir de indicadores:

- Días con mala calidad del aire. El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), en su Informe nacional de la calidad del aire 2018 (INECC, 2018) presentan su metodología de evaluación de la calidad del aire en las ciudades de México. Esta se basa en el análisis de los días con mala calidad del aire de acuerdo con la normatividad mexicana para cada uno de los contaminantes.
- Clasificación basada en el cumplimiento de normativas. En el documento Gestión integral de la calidad del aire en China del Banco Mundial y el Ministerio de Protección al Medio Ambiente de China (World Bank & The Ministry of Environmental Protection, 2012), se muestra un análisis de la calidad del aire en las ciudades de China a partir de categorías de cumplimientos de las normativas de

contaminantes en el país. Se establece la ubicación que tiene cada una en estas categorías y se marca la pauta para mejoras.

Para la definición de las líneas base, en los documentos del INECC y de la Oficina del Alcalde de Londres (INECC, 2018) (Mayor of London, 2019) se presentan metodologías de suavizado de datos a partir de eliminación de datos extremos y anómalos y de suavizado estadístico respectivamente. Esto es útil para eliminar los impactos individuales de un año y los efectos de las estaciones y condiciones meteorológicas. En la Figura 16 se muestra el procedimiento seguido por el INECC para limpieza de datos.

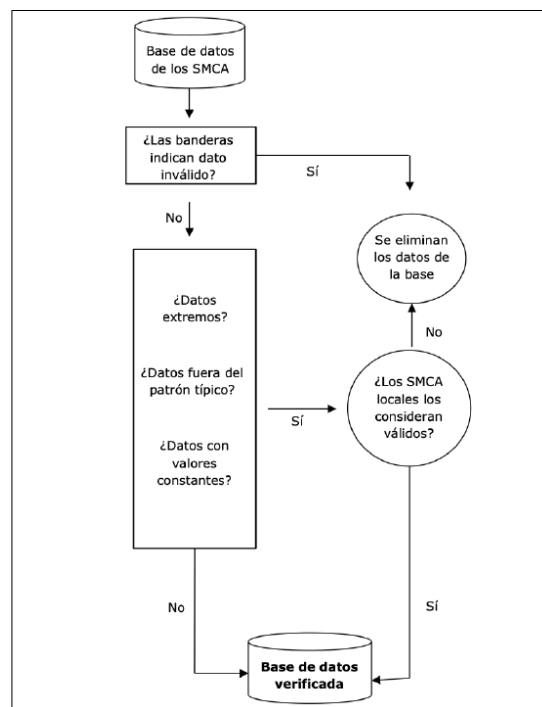


Figura 16. Procedimiento de verificación de las bases de datos del INECC, 2018.

Figura tomada del documento: Informe nacional de la calidad del aire p.25 (INECC, 2018).

Similar al ejemplo que se describió en el caso anterior, este método permite hacer la comparativa con años anteriores basado en normativas y caracterización de la contaminación

atmosférica. Sin embargo, como solo se analizan totales es difícil caracterizar temporalidades específicas. En el informe del INECC (INECC, 2018), además del análisis por días que se supera la norma, se presenta un método de análisis de la tendencia diaria de los datos (Figura 17) utilizando un diagrama de caja.

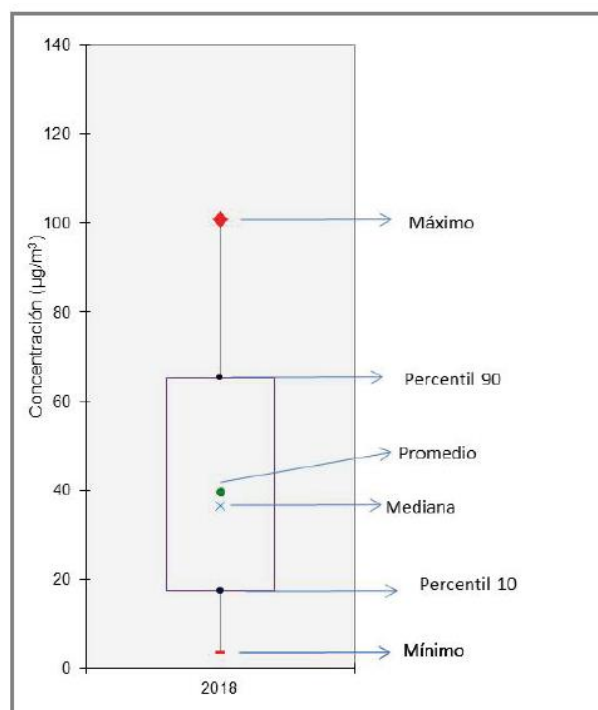


Figura 17. Ejemplo de la representación de las tendencias de los datos diarios.

Figura tomada del documento: Informe nacional de la calidad del aire p.35 (INECC, 2018).

Utilizando distintos elementos de los métodos evaluados se desarrolló una metodología de agrupación con la que se busca representar las dinámicas de cambio y tendencias estacionales. Con esto, se busca determinar si se han presentado cambios en los últimos años, además de dejar establecido el método para evaluar el impacto futuro de las estrategias implementadas.

2.2.8. Evaluación territorial de políticas

La determinación del impacto de las estrategias para evaluar la calidad del aire cuenta con elementos similares al de una ecuación de riesgo. En esta, se busca identificar la coincidencia espacial que existe entre la población expuesta (o vulnerable) y las concentraciones de contaminantes atmosféricos. Este acercamiento, a su vez, es similar a los que se describen en la sección 2.2.7., para los métodos de evaluación de proyecciones o estimación de emisiones. Sin embargo, estos estudios comúnmente emplean información sobre los efectos de distintos niveles de contaminación atmosférica y sus efectos en la población. Debido a que no se cuenta con este nivel de información para el AMG, se optó por realizar un modelo que adopte y adapte distintos elementos.

De acuerdo con ONU – Hábitat (ONU Habitat, 2019) el riesgo se encuentra en función del peligro y la vulnerabilidad. A su vez, establece que la vulnerabilidad se encuentra en función de la exposición, la sensibilidad y se reduce con la capacidad adaptativa. Ambas relaciones se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{Riesgo = f (Peligro \times Vulnerabilidad)}$$

(2)

$$\mathbf{Vulnerabilidad = f (Exposición \times Sensibilidad - Capacidad adaptativa)}$$

(3)

Como se mencionó anteriormente, para obtener la vulnerabilidad ante episodios de mala calidad del aire, y de acuerdo con las ecuaciones presentadas, es necesario integrar información sobre la sensibilidad a los contaminantes atmosféricos. Debido a que no se cuenta con esta información se optó por modificar el acercamiento y enfocarse únicamente en la exposición.

En el artículo por Garnica-Monroy, Garibay-Bravo, Gonzalez-Gonzalez, Martínez-Salgado e Hernández-Reyes (Garnica-Monroy, Garibay-Bravo, Martínez Salgado, & Hernández-Reyes, 2021) se presenta un acercamiento para evaluar la exposición a contaminantes atmosféricos generados por el tráfico. En este, se analiza la configuración urbana, la distribución de la población y actividades económicas. Se considera que para el presente estudio un acercamiento de estas características es útil para evaluar el impacto de las políticas con respecto a la posible población expuesta.

3. Marco Metodológico de la investigación

A partir del análisis de las estrategias para mejorar la calidad del aire en el ProAire 2014-2020 se realizó un filtrado y se consideraron dos de ellas: el incremento de áreas verdes y el impulso a estrategias de movilidad no motorizada, como la bicicleta. En el documento *“Review of interventions to improve outdoor air quality and public health”* por Public Health England (Public Health England, 2019), se realiza un análisis de las estrategias a través de entrevistas con población en general y expertos en la materia y de investigación de estudios previos. Dentro de su evaluación y las recomendaciones que se generan se incluye:

- Incremento de áreas verdes: se identifica que el diseño adecuado de áreas verdes puede reducir la exposición a contaminantes atmosféricos ya que pueden retenerlos y removerlos del aire, además de que dota de espacios recreativos funcionales a la población. Esta estrategia se clasifica como de mitigación y se reconoce que no hay muchos estudios que evidencien el impacto claro de su implementación.
- Impulso al ciclismo: esta estrategia se clasifica como orientada a la prevención y se establece que, a pesar de que sí hay efectos positivos en la salud de las personas ya que promueve la actividad física, no se ha identificado que genere impactos en la calidad del aire. De nuevo, se concluye que no se cuenta con suficiente información que contabilice el impacto.

En ambos casos se menciona que no se debe de confundir la falta de evidencia de la eficiencia con una evidencia de ineficiencia, simplemente es necesario estudiarlo más a fondo ya que pueden tener un papel importante en la reducción de la exposición a contaminantes atmosféricos. Con base en esto y, debido a la facilidad para acceder a datos de viajes, se optó

por evaluar la estrategia de impulsar el programa MiBici. Para la selección del área de evaluación se realizó un análisis de los viajes de MiBici (Figura 15). Se construyó una superficie con hexágonos de 22 hectáreas en el área de cobertura de las estaciones de MiBici para estudiar el territorio de forma homogénea. A cada hexágono, se le asignó el número de viajes que pasaban por ese polígono. El periodo de análisis para determinar el número de viajes fue de 6 meses, de agosto 2019 a febrero 2020. En las siguientes secciones se presentan las metodologías desarrolladas orientadas al cumplimiento del objetivo general y objetivos específicos de la investigación

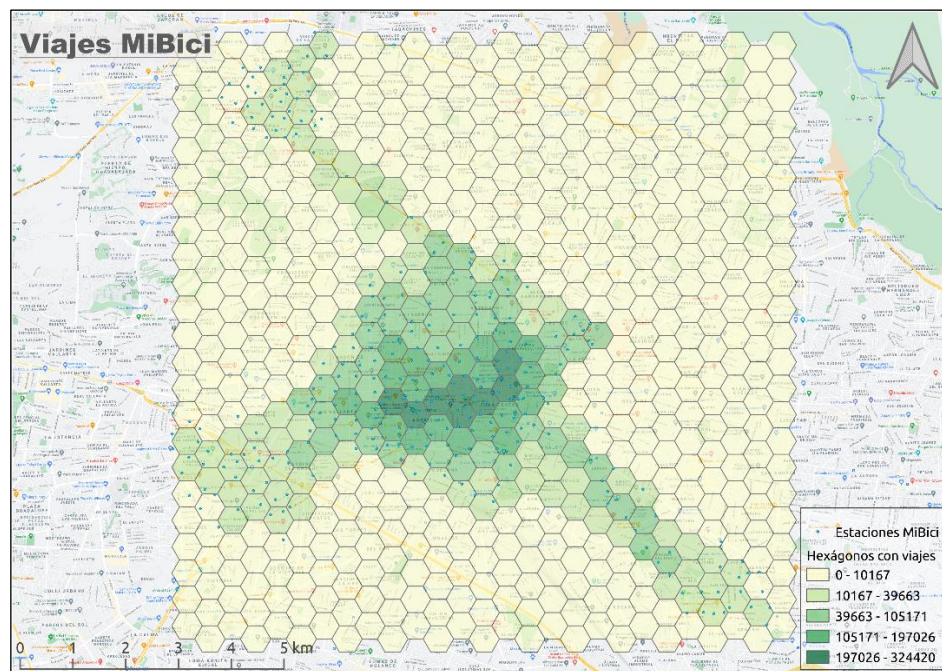


Figura 18. Distribución de viajes de MiBici.

Fuente: Elaboración propia

3.1. Análisis del ProAire 2014-2020

Como se mencionó en la sección anterior, se puede utilizar la herramienta de DMAIC como el marco de evaluación del ProAire 2014 – 2020 entendiendo al problema como una circunstancia sistémica. Para realizar la evaluación se hizo una sistematización de las

medidas en distintas categorías para facilitar su procesamiento y entendimiento. Se definieron dos categorías, la clasificación de las estrategias y el impacto que se espera con la medida. Estos grupos y sus elementos se describen de forma más detallada a continuación:

- Clasificación: se dividen las categorías dependiendo de la implicación de cada estrategia:
 - Acciones de mejora de la calidad del aire: aquellas acciones emprendidas por la SEMADET y que, de realizarse, impactan de forma directa en la emisión y control de emisiones de contaminantes.
 - Acciones complementarias: acciones que deben de formar parte del programa pero que no pueden ser emprendidas únicamente por la SEMADET, que necesitan de una segunda medida para generar un impacto en la calidad del aire o que complementan los procesos de reducción y control de emisiones.
 - Gestiones interinstitucionales: procesos de gestión que pueden impactar la calidad del aire pero que no entran completamente dentro de las actividades de la SEMADET o que representan vinculaciones que son clave para que la Secretaría tenga el impacto esperado.
 - Legislación: reglamentos, normas y programas que se deben de elaborar para sustentar las medidas propuestas.
 - Sistemas tecnológicos: sistemas que forman la base para la comunicación de la información a la población, sustentan toda la toma de decisiones por parte de la SEMADET y son necesarios para evaluar el impacto del programa y llevar su control.
- Impacto: representa el área o tema en el que se espera que la medida tenga impacto.
 - Fuente móvil: impacto en las emisiones provenientes de las fuentes móviles.

- Fuente de área: impacto en las emisiones de fuentes de área.
- Fuente fija: impacto en las emisiones de fuentes fijas.
- Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC): impacto en la recopilación y comunicación de la información de emisiones y calidad del aire en el AMG.
- Alineación legal: impacto en la legislación y lineamientos a partir de los que se podrá exigir a privados y tomar acciones de control de emisiones.
- Salud: impacto en el cuidado de la salud de la población por la exposición a contaminantes atmosféricos.

Después de que se realizó la sistematización se analizó la información con la perspectiva de la herramienta DMAIC para contar con un enfoque claro del método de evaluación del programa. Este acercamiento permitió observar los elementos con un objetivo claro, definiendo un problema que se debe de resolver y entendiendo las medidas como las estrategias para solucionarlo.

3.2. Evaluación del escenario actual

Al igual que en un proceso de gestión de la calidad, o en un proceso de mejora, el primer paso debe de ser entender dónde se encuentra el proceso. Previamente ya se estableció que existe un problema sistémico que las medidas del ProAire 2014-2020 no han logrado revertir de forma concreta y, más aún, no se conoce cuáles son los elementos que han logrado mejores resultados. Para poder dimensionar los impactos que tienen las medidas es necesario construir una línea base clara de las concentraciones de contaminantes criterio en el AMG. Para hacer esto el primer paso es acceder y tratar los datos con métodos estadísticos.

La propuesta de la metodología a utilizar en el proyecto de investigación mezcla las características del segundo y tercer método utilizados, específicamente de los métodos de la Oficina del Alcalde de Londres y del INECC (Mayor of London, 2019) (INECC, 2018). Se proponen caracterizar las tendencias meteorológicas de acuerdo con un diagrama de cajas creadas para cada hora por periodos de cuatro semanas.

Para realizar los diagramas de caja, como se mencionó en el párrafo anterior, se tomarán los promedios diarios de la concentración de contaminantes de cada mes para los años 2016-2019. Sin embargo, antes de hacer esto se debe determinar qué se puede considerar como un dato válido. De nuevo, tomando los ejemplos del reporte de Londres (Mayor of London, 2019) y el informe del INECC (INECC, 2018) se establece que se debe de contar con el 75% de los datos para ser considerado como válido. Debido a que, en las bases de datos registradas en la SEMADET hay huecos que se extienden a lo largo de varios días, se deberá realizar un llenado de huecos para contar con más días de análisis. A su vez, se deberá aplicar un método de suavizado de los datos para que los datos anómalos no hagan ruido en el análisis de la información.

3.2.1. Análisis de agrupaciones de datos

Como se mencionó previamente, la SEMADET se encarga de dar tratamiento y publicar los datos de calidad del aire de forma horaria para cada año y para cada una de las estaciones. Cada una de las 10 estaciones de monitoreo registra por lo menos 5 contaminantes y 5 variables meteorológicas. Por lo tanto, en un año promedio se tienen al menos 876,00 valores. En el presente trabajo se utilizaron datos del 2016 al 2019, lo que equivale a 3,504,000 valores posibles de concentración de contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas.

A pesar de que la información es de libre acceso y se puede descargar de forma gratuita la SEMADET realiza una validación previa antes de publicarlos. Con esto se busca eliminar datos espurios y detectar comportamientos anómalos. Este proceso de análisis representa un alto tiempo de procesamiento y esfuerzo de la Secretaría, lo que hace que los valores para un año t se publiquen por lo menos seis meses después en el año $t+1$. Esta circunstancia complica el estudio de la calidad del aire.

La base de datos de contaminantes atmosféricos cuenta con distintos problemas que se deben de solucionar antes de poder ser utilizados. El formato de estos es .xlsx y tienen matrices con hojas de cálculo por cada estación de monitoreo, son 10 estaciones de monitoreo en total, y en cada hoja hay columnas para la fecha, hora, contaminantes y variables meteorológicas. Algunas de las dificultades en el uso de la información que se identificaron en la base de datos fue que hay celdas con valores nulos, celdas sin fecha, sin hora o con formato incorrecto, columnas con nombres distintos para los contaminantes (por ejemplo, O₃ en una base de datos y Ozono en otra), y hojas de cálculo con nombres distintos para cada estación (por ejemplo, Las Águilas en una base de datos y Águilas en otra).

Por este motivo fue necesario realizar un tratamiento extensivo a la base de datos. Para esto se trabajó con el lenguaje de programación Python y la librería Pandas, con los que se generaron nuevos DataFrames para cada año con la información de todas las fechas, horarios, contaminantes y estaciones en una sola hoja, de forma que fuera más sencillo acceder a los valores individuales. El nuevo DataFrame cuenta con 13 columnas y 87,600 filas, ya que son 5 contaminantes y 5 variables meteorológicas por cada hora, para cada año.

Para generar la base de datos fue necesario identificar y corregir los huecos en las fechas, tomando como verdadera la fecha previa (que previamente había sido corregida), solucionar errores en formatos de fechas y horas, identificando si estaban registradas como texto o número, corregir nombres de columnas y de hojas de cálculo para estandarizarlos. Además, los nuevos DataFrames fueron creados con todas las fechas, parámetros y estaciones, dejando la información de concentraciones como nulos, de esta manera se redujo la posibilidad de problemas por huecos en la información. A su vez, esto hizo que, en caso de que un dato no se encontrara en la tabla original, el valor se conservó como nulo.

La exploración de los datos que se hizo estuvo altamente relacionada con la identificación de huecos en los datos. Para esto se realizaron matrices de datos con el objetivo de dimensionar el tamaño del problema en los vacíos. Debido a que mostrar una matriz no permite comunicar de forma clara los resultados se realizaron mapas de calor en los que, entre más alto el número de huecos, se tuvo un color más oscuro.

Para estudiar el problema, primero se contaron los vacíos en los datos por año y por estación de monitoreo. Posteriormente, se hizo la misma operación, pero en lugar de las estaciones se hizo desde los contaminantes atmosféricos. Esto permitió contar con una perspectiva general de los huecos para cada año y conocer si había alguna tendencia no identificada.

Como se mencionó en la Justificación, para que un dato sea válido se debe de contar con el 75% de las concentraciones de la agrupación deseada. Esto quiere decir que, si se busca hacer un promedio de 24 horas, por lo menos se necesitan tener datos de 18 horas. Con base en esto, se robusteció el análisis de nulos que se describió previamente para identificar

las agrupaciones válidas en la base de datos para un intervalo determinado. El método implicó iterar sobre los valores para un intervalo variable definido por el usuario (en este caso se usó una ventana de 24 horas) y, a partir de esto, contar los valores nulos. En caso de que los nulos superaran el 25% del total se contó como un promedio inválido.

Para el proceso de eliminación de espurios se probaron distintos métodos debido a que al revisar los resultados de estos se encontraron datos eliminados que se consideraron como no espurios. Con este antecedente se optó por un método que pudiera eliminar los valores atípicos identificando las características individuales de cada estación y las tendencias temporales.

Con base en esto se realizó una nueva matriz con los deltas, que se generaron restando el valor de la concentración en el tiempo t menos el valor previo en $t-1$, Sin embargo, para esto fue necesario establecer una condición en la que, si $t-1$ no tenía dato no se podría hacer la resta debido a que el delta no representaría el comportamiento real del contaminante y representaría a t como un espurio (ya que la resta sería con cero). Este proceso se hizo por cada estación y contaminante, de tal forma que los deltas capturaran los cambios promedios para cada hora.

A partir de la nueva matriz de deltas se calcularon desviaciones estándar por estación y por contaminante y se eliminaron los datos que superaran 3 veces la desviación. Aun así, al revisar los datos eliminados de nuevo se observó que se removieron valores que mantenían una tendencia esperada. Esto quiere decir que, si la tendencia era al alza se eliminaba un valor en tiempo t aunque este mantuviera una tendencia con respecto a $t-1$ y $t+1$.

Por este motivo se integró una nueva condición, únicamente se consideraría un valor como espurio si su delta superaba tres veces la desviación estándar con respecto a $t-1$ y la pendiente entre $t-1$ y $t+1$ tenían signos distintos. Esto quiere decir que si el valor en t tenía un delta de tres veces la desviación con respecto a $t-1$ y su signo era positivo, se analizaba el signo del delta de t a $t+1$, si era el mismo se conservaba y si no se eliminaba. De esta forma se integró la tendencia de los datos con respecto al tiempo y se redujeron los valores que se consideraron como espurios.

3.2.2. Llenado de huecos

De acuerdo con el análisis de agrupaciones de datos se determinó que era necesario aplicar un método que permitiera incrementar los promedios válidos. Para esto se desarrollaron y evaluaron distintos métodos de llenado de huecos de tal forma que se determinara aquel (o la mezcla de estos) que logran reducir al máximo los huecos que se tienen en las bases de dato sin procesamiento. Para la evaluación de los métodos propuestos se utilizará únicamente el contaminante PM_{10} , debido a que, como se mostró en la sección 1.4.1., es de los contaminantes que más superan la norma anualmente en el AMG.

El llenado de huecos utilizando el método de interpolación de ponderación de distancia inversa (IDW por sus siglas en inglés) y promedios móviles fue desarrollado por los alumnos de licenciatura que se encontraban cursando su Proyecto de Aplicación Profesional (PAP). En este se integraron ambos métodos dependiendo de las circunstancias. Los promedios móviles se aplicaron en vacíos por horizonte de tiempo, esto quiere decir que solo se usaron los datos de una estación a la vez. Como su nombre lo dice, se hicieron

promedios móviles de la concentración del contaminante en los tiempos $t-1$, $t-2$ y $t-3$, con los que se calculó el valor en el tiempo t .

Sin embargo, debido a que este acercamiento corre el riesgo de llegar a un valor constante se definió un límite de $t+5$ horas continuas de promedios móviles. Si en este periodo no se contaba con un nuevo dato de concentración capturado por la estación se detenía el cálculo con promedios móviles.

Por su parte IDW es un modelo determinístico que, como su nombre lo indica, hace una relación entre los datos conocidos y su ubicación geográfica (x y y). Este da un peso específico a la distancia, de tal forma que entre más crece la distancia del valor conocido menos influencia tiene en el valor calculado. A continuación, se muestra la ecuación:

$$IDW = \frac{\sum \frac{v}{d^p}}{\sum \frac{1}{d^p}} \quad (4)$$

Donde:

- v : es el valor de la concentración conocida.
- d : es un cálculo de la distancia a la estación de la concentración v .
- p : es una potencia que indica el nivel de decrecimiento de la influencia del valor v al incrementar la distancia.

Para calcular un valor de concentración para una estación es necesario contar con los datos de concentración de las otras estaciones de monitoreo. Este aspecto, a pesar de que

limita los cálculos que se pueden hacer con IDW, es importante para tratar de conservar las interacciones del sistema en todo momento. Otro aspecto relevante para destacar es que, si se contaba con todos los valores para aplicar IDW, pero uno de ellos se obtuvo utilizando promedios móviles, no se hacía la interpolación.

Por otro lado, y como se describió en la sección 2.2.6., las redes neuronales por horizontes de tiempo han sido aplicadas previamente como método de llenado de huecos en bases de datos de calidad del aire. Sin embargo, en la presente investigación se optó por el desarrollo y evaluación de una red neuronal por relación espacial. En su desarrollo solo se utilizó una estación y el contaminante PM_{10} para probar el método. Debido a que es un esquema de relación espacial, no se utilizaron temporalidades distintas de t y tampoco concentraciones de otros contaminantes, únicamente PM_{10} para las estaciones restantes.

Se pretende que al agregar suficientes datos de concentraciones al entrenamiento la red pueda modelar las relaciones no lineales que se dan en el entorno y en la dispersión de los contaminantes. La arquitectura propuesta es una red multicapa con alimentación hacia adelante (Figura 19) con el número óptimo de capas ocultas por determinarse.

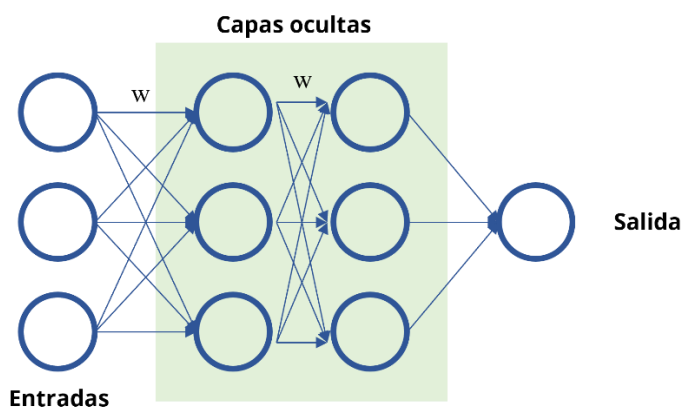


Figura 19. Ejemplo de red neuronal con alimentación hacia adelante.

Para este modelo la variable dependiente (Y) correspondió a los datos de concentración de la estación que se busca predecir y los regresores (X) fueron las concentraciones de las 9 estaciones de monitoreo restantes. Para que las predicciones y el modelo se ajuste a datos válidos se eliminaron de la matriz aquellas filas en las que la variable Y no tenía datos (vacíos reales). Este proceso no se repitió con las variables X, ya que se buscó que el modelo lograra estimar un valor para Y aun cuando se tengan huecos en los datos de X. Los vacíos en los regresores X se colocaron como -1 en la matriz, buscando que la red los identifique y descarte como parte del procesamiento. Por último, los datos se dividieron entre entrenamiento y prueba con una relación de 80% y 20% respectivamente.

Como parte del primer acercamiento a los datos se hizo un análisis de la correlación de los datos de concentración de PM₁₀ para las 10 estaciones de monitoreo. El coeficiente de correlación cuantifica la relación lineal que existe entre dos variables. Este aspecto es relevante para esta investigación debido a que, como se busca elaborar un modelo que logre capturar las relaciones espaciales entre las estaciones, entre más relación hubiera con una estación específica se espera un mejor desempeño del modelo. La ecuación para calcular el coeficiente de correlación y el resultado de este análisis en las estaciones se muestran a continuación:

$$r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

Aunque en el desarrollo de redes neuronales se recomienda escalar los datos con métodos como la escala de mínimos y máximos estos comúnmente son utilizados con variables que se miden en órdenes de magnitud distintas que pueden meter ruido al sistema.

Este no fue el caso para el análisis realizado debido a que el modelo únicamente utilizó concentraciones de contaminantes de PM₁₀, que se miden en las mismas unidades y con magnitudes similares.

La evaluación del desempeño de cada uno de los modelos desarrollados se hizo utilizando los siguientes estadísticos:

- Cuadrado medio de los residuales (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}}$$

(6)

- Coeficiente de determinación (R²)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

(7)

- Error cuadrático medio (MSE)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

(8)

- Error medio absoluto (MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)$$

(9)

- Índice de aceptación (*Index of agreement*)

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^k}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^k} \right]$$

(10)

- Gráficas de residuales

Como método de evaluación de las épocas de las redes neuronales se utilizó el error cuadrático medio. Esto quiere decir que los valores de los parámetros del modelo (w_i) se ajustaban para reducir este valor estadístico. El resto de los estadísticos fue calculado para cada uno de los modelos obtenidos con el objetivo de evaluar sus desempeños desde diversas perspectivas. Debido a la gran cantidad de modelos que se desarrollaron, las Gráficas de residuales se realizaron únicamente para los últimos modelos evaluados.

Para el desarrollo de la red neuronal de relación espacial se utilizaron los siguientes hiperparámetros:

- Épocas: Se utilizaron distintos números de iteraciones en las redes para ajustar los parámetros del modelo $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$. Durante las pruebas desarrolladas se aplicaron diversas épocas de entrenamiento para evaluar el desempeño de las redes, sin embargo, en las últimas pruebas realizadas estas fueron [50, 100, 200]. Las épocas representan el número de veces que se prueba el modelo y se ajustaron los parámetros de este.
- Regularización: Los términos de regularización evaluados fueron L1 y L2, en pruebas iniciales no se detectaron diferencias considerables entre estos métodos, por lo que en las últimas pruebas se conservó el término L1 y se utilizaron alfas de [1.0, 0.75, 0.5, 0.1, 0.05, 0.01, 0.005]. Estos términos penalizan a aquellos parámetros con

valores más altos, sumando este factor a la función de costo, por lo que un valor menor tiene a su vez, una penalización menor. A continuación, se muestra la ecuación del término L1:

$$L1 = \alpha \sum_{j=1}^p |w_j|$$

(11)

- Capas ocultas: Se buscó mantener en un número bajo la cantidad de capas ocultas en la red para no incrementar de forma innecesaria la complejidad del modelo, aun así, se hicieron pruebas con distintos números de capas con valores finales de [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Como se muestra en la Figura 15, las capas ocultas toman las entradas del modelo y utilizando distintos parámetros y funciones de activación, construyen el modelo que explica el fenómeno estudiado, llegando a un valor de salida.
- Neuronas en capas ocultas: Al igual que con las capas ocultas se buscó mantener el número de neuronas en valores bajos, pero en las pruebas preliminares se observaron mejores resultados con valores más altos de neuronas en capas ocultas, por lo que las pruebas se mantuvieron en [5, 10, 25, 50, 75, 100].
- Activación: Por su parte, las activaciones probadas durante la investigación fueron Softmax, tangente hiperbólica (tanh) y la unidad lineal rectificada (ReLU). Las pruebas preliminares mostraron que ReLU tenía el mejor desempeño, por lo que solo se conservó esta. Esta función se utiliza para determinar las salidas de las neuronas

en la red. Al utilizar ReLU se obtienen resultados de 0 o 1, con la ventaja de que todos los valores menores a cero los trata como 0.

Únicamente considerando los hiperparámetros descritos y el número de pruebas realizadas en la parte final se observa que hubieron más de 1200 redes entrenadas y estudiadas de acuerdo con los parámetros descritos previamente. Aun así, se hicieron pruebas adicionales iterando sobre una misma red para observar si se generaban datos distintos, con el objetivo de estudiar el impacto de los pesos de los inicializadores aleatorios de los parámetros (w_i). También, se probó con una única red iterando sobre las variables de entrada. Esto quiere decir, que se probaron con distintas divisiones aleatorias de los datos para entrenamiento y prueba. Con esto se identificó que, por la naturaleza de los huecos en los datos, las divisiones no seguían un comportamiento completamente aleatorio y sí lograban tener un efecto en el desempeño de las redes. Ya que podría variar el entrenamiento dependiendo de los huecos en los datos comparados contra la prueba.

Para generar las pruebas en la división de las matrices de entrada se iteraron sobre los mejores modelos obtenidos. Para seleccionar estos mejores modelos se evaluaron uno por uno los parámetros de desempeño. Esto quiere decir que se obtuvieron los modelos que generaron los mejores resultados en RMSE, R^2 , MAE, MSE, e Índice de aceptación tanto para los resultados de los entrenamientos, como los de las pruebas. Por lo tanto, se obtuvieron 10 modelos (2 por cada estadístico) que fueron evaluados de forma más detallada. Sin embargo, se observó que había modelos repetidos, por lo que al final se evaluaron menos de 10 modelos.

Para los modelos estudiados se hicieron iteraciones con estados aleatorios en la división de las variables X y Y en entrenamiento y prueba. Para esto se seleccionaron estados aleatorios de 2 en 2 del 0 al 100 (0, 2, 4, 6, ... 98), lo que se traduce en 50 modelos nuevos por cada *mejor modelo* seleccionado. Los pasos de selección de los mejores modelos iniciales descritos en el párrafo anterior se repitieron y de nuevo se extrajeron los mejores modelos para realizar más pruebas. Estos nuevos modelos incluyeron el valor del estado aleatorio de división X y Y.

Utilizando los nuevos modelos se realizaron iteraciones que de nuevo tomaban estados aleatorios, pero en esta ocasión de los inicializadores de los parámetros (w_i). Se repitió el proceso descrito en el párrafo anterior, en el que se seleccionaron inicializadores de 2 en 2 del 0 al 100 (0, 2, 4, 6, ... 98), con lo que se generaron 50 modelos nuevos para cada ajuste. De nuevo, se seleccionaron los mejores modelos de este proceso filtrando de acuerdo con los estadísticos. Debido a que los mejores modelos de cada estadístico se repitieron, se obtuvieron únicamente 3 modelos que se evaluaron con el resto de las estaciones de monitoreo.

3.2.3. Línea base

La agrupación de los datos de calidad del aire para la construcción de la línea base se hizo de acuerdo con la propuesta de los estudiantes de Licenciatura del Proyecto de Aplicación Profesional. En este propusieron realizar agrupaciones de los datos por periodos de cuatro semanas de forma horaria para cada día de la semana. De esta manera se obtuvieron resultados para los lunes de enero en cada una de las 24 horas del día, y se repitió para cada día y mes. Por lo que en un año se obtuvieron 2,016 valores agrupados para cada estación de

monitoreo. A estos datos se les agregó la desviación estándar con el propósito de evaluar su variación.

Además de utilizarse como el insumo para evaluar las tendencias generalizadas e identificar variaciones relevantes en los datos la línea base sirvió como el insumo para validar el modelado de datos de dispersión de contaminantes de la sección de modelado del proyecto de investigación (véase Figura 10). Con este acercamiento se discutieron los resultados obtenidos en conjunto con el equipo de investigación y se determinó que la resolución temporal de agrupación era más alta de lo que se necesitaba, por lo que se realizó una nueva propuesta. En esta, las agrupaciones se limitaron a un valor de concentración por mes y por año y únicamente se hizo la distinción entre día laboral (lunes a viernes) y fines de semana (sábado y domingo).

El nuevo método de agrupación logró capturar las variaciones de datos a lo largo del tiempo e identificar las tendencias a lo largo del año, de tal forma que fuera posible identificar los cambios con pendiente negativa (se reduce la concentración) o positiva (incrementa la concentración). Cabe resaltar que para que las agrupaciones representen de forma apropiada el comportamiento a lo largo del mes es necesario hacer un llenado de vacíos. Omitir esto puede llevar a estudiar tendencias que no son estadísticamente representativas del comportamiento en el tiempo.

3.3. Evaluación de sensores de bajo costo

Entendiendo a los sensores electrónicos como los elementos de un sistema de evaluación con los que se generan los valores e insumos para estudiar la calidad del aire y que se utilizan como parte prioritaria en el proceso de toma de decisiones, en las siguientes secciones se

presentan las metodologías para determinar la variación que se le puede atribuir al sistema y la estrategia para la determinación de la confiabilidad de este.

3.3.1. Análisis estadístico y gráfico de los sensores

Para evaluar el desempeño de los sensores de bajo costo se buscó implementar la metodología de Gage R&R que se utiliza comúnmente en la industria para evaluar cuánta variación en las mediciones se le puede atribuir al sistema de medición (véase sección 2.2.4.). En este caso, se entiende como el sistema de medición los sensores de bajo costo que se pretenden colocar en la ciudad. La ecuación para evaluar la variación es:

$$\sigma^2 = \sigma_{error}^2 + \sigma_{sitio}^2 + \sigma_{condiciones\ físicas}^2 + \sigma_{condiciones\ físicas:sitio}^2$$

(12)

- σ^2 es la varianza total
- σ_{error}^2 es la varianza atribuible al error inherente de la medición, esta es la repetitividad
- $\sigma_{condiciones\ físicas}^2$ es la varianza que se relaciona con las condiciones físicas y climáticas
- σ_{sitio}^2 es la varianza que se relaciona con el cambio de los sitios
- $\sigma_{condiciones\ físicas:sitio}^2$ se refiere a la varianza que se genera cuando hay interacción entre los sitios y las condiciones físicas

Para el estudio se intentó utilizar por lo menos dos sensores por cada marca evaluada, sin embargo, los datos de los sensores serán bloqueados. Para la ecuación propuesta se cambiaron los efectos de las partes y de los operadores por las condiciones físicas y los sitios en los que se encuentran los sensores de la SEMADET. El valor del operador se controló con la determinación de que se necesitan 75% de los datos en cada hora para ser considerado como válido y se sustituyó esta fuente de variación por los factores físicos.

Las condiciones físicas incluyen:

- Humedad relativa: esta es una variable continua, de acuerdo con Zheng, et al. (2018) la humedad relativa tiene un alto impacto en la variación de los registros de la concentración.
- Temperatura: esta es una variable continua, de nuevo, de acuerdo con Zheng, et al. (2018) la temperatura no tiene un impacto tan alto en la variación de los registros de la concentración, pero aun así se debe de considerar para tener un mejor ajuste en los datos.

Se asume que las variables meteorológicas tienen una distribución normal en cada temporada y que la selección de la muestra se puede considerar aleatoria. Debido a que en sistemas naturales es difícil controlar las variables y garantizar las repeticiones es posible crecer la muestra de las mediciones y así reducir el riesgo de confundir efectos (Quinn & Keough, 2002).

Para la medición de la variación atribuible al sitio se propuso realizar mediciones en tres puntos:

- Centro
- Miravalle
- Las Pintas

De nuevo, el efecto individual de los sensores se busca bloquear para que solo se evalúe el impacto de cada sitio. Tomando el caso Healy & Wallace (2011), se propone hacer

un cambio de los equipos de medición cada cierto tiempo determinado en conjunto con la SEMADET y evaluar si se presenta un cambio en la variación de los registros.

Los métodos estadísticos para evaluar el desempeño de los sensores son:

- Coeficiente de correlación de Pearson:

$$r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

(13)

- RMSE (7)
- *Index of agreement* (11)
- Desviación estándar de residuales

$$S_{res} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{df}}$$

(14)

De acuerdo con la Comisión Europea (2019b), los primeros tres estadísticos son relevantes para evaluar el desempeño de los sensores de bajo costo. Por último, el *index of agreement* es utilizado para evaluar el desempeño de un modelo de predicción (Zainuri, Jemain, & Muda, 2015). En este caso, se puede considerar que el resultado de la medición del sensor de bajo costo es la predicción que se compara contra el valor real del registro de la SEMADET.

Además de los estadísticos presentados se realizaron gráficas de dispersión de los residuales contra temperatura y contra humedad relativa. Con estas se buscó estudiar la relación en la variación de los residuales contra las variables meteorológicas. Su elaboración

permite obtener información relevante para la mejora y ajuste de las concentraciones registradas.

A partir de los datos recabados se realizó una ANOVA para determinar los efectos que son relevantes y el nivel del impacto que tienen las condiciones meteorológicas. Para la evaluación de los parámetros se generaron cuatro grupos o categorías sobre los cuales se evaluaron los residuales. Estas se muestran a continuación.

Tabla 6. Categorías por variable meteorológica evaluada

Categoría	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)
A	0 – 10	0 – 25
B	11 – 20	26 – 50
C	21 – 30	51 – 75
D	31 - 40	76 - 100

3.3.2. Determinación de la confiabilidad del sistema

Como se describió en la sección 2.2.5. para esta investigación, se entiende a la confiabilidad como la capacidad de los equipos de mantener una calidad (establecida en la determinación de la variación de los sensores) a lo largo de un periodo de tiempo. Por su versatilidad, se propone utilizar la función de Weibull:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

(15)

Donde:

- t es el tiempo evaluado
- γ es un parámetro de ubicación para el inicio del periodo en el que se pueden tener fallas. Para este caso se va a asumir que todos los sensores colocados llegan sin

fallas y el momento en el que empiezan a recolectar datos es $t=0$, por lo tanto, este parámetro también se toma como 0.

- β es el parámetro de la forma de la distribución e indica la manera en la que falla el producto. Debido a que no se cuentan con datos previos se deberá de estimar a partir de estudios del desempeño de sensores electrónicos y determinar si tienen a fallar más (de acuerdo con lo que se establece como una falla en esta investigación) al inicio, conforme pasa el tiempo o si es constante en toda su vida útil.
- η es un parámetro de la escala de las unidades utilizadas para medir el desempeño y las fallas.

A pesar de que no se tienen los valores de beta y eta de los sensores que se pretenden analizar, de acuerdo con la revisión de literatura de diversos sensores electrónicos, es posible estimar que tienen un modo de falla de desgaste, en la que los objetos incrementan su probabilidad de fallar conforme pasa el tiempo. Esto se puede traducir en que la beta que se debe de utilizar para realizar estimaciones de cálculos debe de ser mayor a 1.

A su vez, otro aspecto a destacar es que se trata de un sistema reparable, ya que, entiendo las fallas como la pérdida de variaciones consideradas aceptables, se pueden realizar calibraciones a los sensores de nuevo para tratar de ajustar los valores e incluso substituir el sensor de un contaminante en específico sin necesidad de cambiar todos los sensores. Con información recabada de las fallas y las reparaciones es posible realizar una regresión para programar calibraciones preventivas e incluso realizar una curva de costos para establecer el punto óptimo en el que se debe de hacer el cambio de algún sensor (Figura 20).

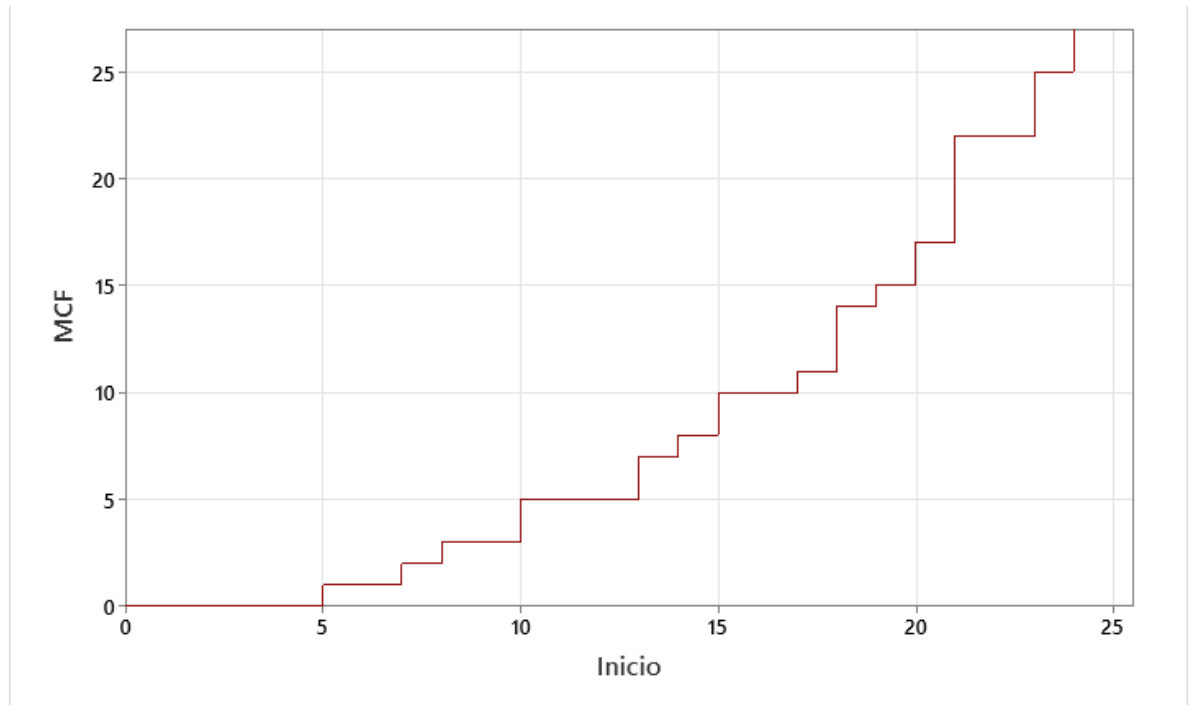


Figura 20. Análisis no paramétrico de fallas en un sistema reparable

El hecho de que un sensor pueda fallar sin que fallen todos, o incluso el sistema, es relevante para establecer el tipo de sistema con el que se está trabajando. Se trata de un sistema paralelo en dos niveles. En el primero, cada conjunto de sensores de contaminantes puede seguir registrando valores de forma correcta sin importar si otro conjunto de sensores ya no está funcionando apropiadamente. Por otro lado, dentro de un solo conjunto de sensores, cada sensor de contaminante puede funcionar o fallar sin afectar al resto. Este aspecto le agrega complejidad al sistema ya que hay más variables de reparación y falla que contemplar. Se muestra un ejemplo del sistema en la Figura 21.

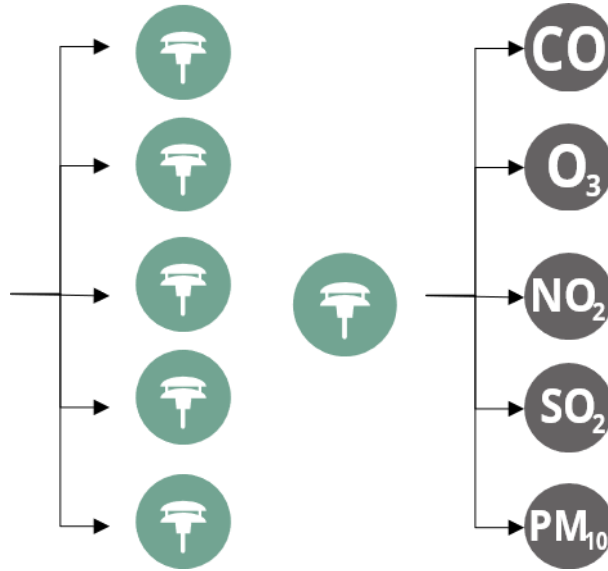


Figura 21. Representación del sistema en paralelo, a la izquierda se muestra el sistema de los sensores como el equipo completo y a la derecha el sistema de los sensores de medición.

Uno de los puntos más importantes en una ingeniería de confiabilidad es definir de forma clara qué es lo que se identifica como una falla en el sistema. El hecho de que sea un sistema reparable no quiere decir que no se tengan fallas de vida o muerte para el producto. Este aspecto es relevante y que nos permite, en un primer acercamiento, agrupar las fallas identificadas en reparables y no reparables, a su vez, se estima que las reparables tendrán una subdivisión, dado esto se entiende como:

- Falla no reparable: una pérdida total de las mediciones de alguno de los sensores de contaminantes atmosféricos. Se debe de hacer una sustitución de la pieza para seguir contando con registros de concentración.
- Falla reparable:
 - Calibración: Una falla reparable que se espera encontrar en campo es la necesidad de calibrar los sensores de nuevo después de un tiempo t . Los límites aceptables de variación se determinarán utilizando Gage R&R,

cuando se detecte que un sensor se sale de esa especificación se requiere una intervención. Este proceso debe de ser correctivo mientras se obtienen datos de los sensores, pero debe de pasar a ser de mantenimiento con suficiente información. Para llevarlo a cabo se deberán de retirar los sensores de su sitio de monitoreo y llevar de nuevo a una de las estaciones donde se evaluará, con mediciones durante un tiempo t si las mediciones cumplen con los requerimientos de calidad y, en caso de que no lo hagan, corregirlas.

- Cambio de sensor: La calibración de sensores es viable mientras se tenga un impacto durante un tiempo t (que se deberá de determinar más adelante). Sin embargo, si se identifica que las calibraciones no cumplen su propósito y las mediciones se alejan de los valores esperados, será necesario programar un cambio en el sensor del contaminante. Es importante identificar este momento ya que, aunque el producto no muera, y se sigan generando datos, con un sistema de medición que tiene una variación inaceptable no se pueden tomar decisiones ni monitorear la calidad del aire de forma confiable, por lo que pierde el propósito realizar la medición.

A continuación, se muestra de forma detallada y en resumen los aspectos relevantes de la recolección de información en campo:

- Tiempo cero: el tiempo cero se define como el momento en el que los sensores electrónicos se colocan en sitio para iniciar mediciones de concentraciones de contaminantes. La evaluación del Gage R&R se realiza con equipos de prueba, por lo que no entran en los tiempos de evaluación.

- Frecuencia de validación: para la evaluación de fallas reparables se deben de realizar monitoreos cada mes durante 24 meses y se hace por intervalo. Este proceso involucra retirar los sensores electrónicos de su ubicación y llevarlos a una estación de monitoreo donde registran datos por 24 horas. Por su parte, para la falla no reparable se realiza cada 2 semanas y es un esquema de censado a la derecha.
- Variables: las variables a revisar en las fallas son las mediciones de concentración de los contaminantes criterio (PM₁₀, SO₂, O₃, NO₂ y CO). En el caso de las fallas no reparables solo se busca identificar si el equipo sigue realizando registros de concentración. Para las fallas reparables (de calibración o sustitución) se utiliza la ecuación del Gage R&R para determinar si la variación cambio con respecto al estado de funcionamiento adecuado definido previamente.
- Formato de registro:
 - Falla reparable: en campo se utiliza una tabla con tres elementos y se realiza un registro únicamente en caso de que el sensor requiriera una recalibración de acuerdo con los resultados registrados en el Gage R&R. En esta tabla se registra el intervalo de tiempo de análisis y el total de sensores que se debieron de recalibrar. Estos datos deben de registrarse posteriormente en una base de datos en Excel.

Inicio	Fin	Frecuencia
--------	-----	------------

- Falla no reparable: de igual forma, se deben de registrar tres variables. Debido a que la falla no reparable se puede evaluar desde la computadora únicamente es necesario entrar a la página web donde el sensor electrónico registra la

información de concentración y determinar si sigue recolectando datos. En caso de que todos los sensores estén registrando concentraciones se establece el tiempo especificado en números consecutivos (cada uno representa dos semanas), el total de sensores que funcionan y el estado (C para censado y F para falla). En caso de que se identifique un sensor que no esté recolectando datos se debe de buscar en la base de datos el momento en que dejó de funcionar y registrar ese tiempo como decimal respecto a las 2 semanas de análisis.

Tiempo	Frecuencia	Estado
--------	------------	--------

- Análisis de confiabilidad:
 - Falla reparable: después de los 24 meses de registros de las reparaciones como intervalo se propone realizar análisis de sistemas reparables paramétricos y no paramétricos.
 - Falla no reparable: de nuevo, tras el intervalo de los 24 meses se propone hacer un análisis de distribución a través del tiempo y determinar la confiabilidad de los equipos.

3.4. Evaluación de la estrategia de impulso a la movilidad no motorizada: MiBici

A continuación, se presenta la metodología desarrollada para evaluar el impacto de la estrategia de MiBici en el área de estudio. Se describe la propuesta para territorializar la dispersión de los contaminantes para generar escenarios de emisión y su relación con la población expuesta a estos.

3.4.1. Selección de la resolución de estudio

En la sección de selección de variables (1.4.3.) se identificó a la resolución espacial como una variable de control, debido a que su determinación tiene un impacto en la forma en que se estudia la dispersión de la contaminación atmosférica y su interacción con los habitantes. Considerando la relevancia de tener un mayor control en la resolución se optó por elaborar una cuadrícula que cubriera el área de estudio en lugar de utilizar las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB). A pesar de que se consideró la elaboración de una cuadrícula propia se optó por utilizar la librería abierta de Python de H3, creada por Uber.

La librería H3 cuenta con cuadrículas preelaboradas que dividen el mundo en distintas resoluciones con polígonos de hexágonos. La ventaja de utilizar esta librería es que cada hexágono tiene un identificador único, por lo que facilita la reproducibilidad de la investigación, en lugar de crear una división propia. A su vez, usar hexágonos garantiza que la distancia de cada elemento con sus elementos se mantiene constante, a diferencia del uso de cuadrados, facilitando el análisis de dinámicas entre vecinos.

Habiendo definido el uso de la librería se continuó con la determinación de la resolución óptima para el estudio. Por la escala urbana de estudio que se manejó se consideró que la resolución con valor 8 cubría suficiente espacio urbano (87.3ha) para estudiar el territorio y las dinámicas sociodemográficas, además de la agrupación de las concentraciones de contaminantes atmosféricos.

A pesar de esto, debido a que la determinación de la resolución espacial también es relevante para el modelo de dispersión que se elabora en la sección de Modelado del Proyecto de investigación (Figura 10) se consideró que esta era muy elevada para la simulación de

emisiones. Por lo tanto, se redujo la resolución de H3 a 9, con un área de 12.5ha. Esto quiere decir que los datos de concentración del modelo se elaboraron en esta resolución y posteriormente se agruparon promediándolos a los hexágonos de resolución 8, donde a cada hexágono le corresponden 7 datos de concentración. Por los requerimientos del software de modelado, se extrajeron los centroides de estos hexágonos para obtener las concentraciones en estos puntos.

3.4.2. Validación del modelo con máximos por mes

Para la validación del modelo de dispersión fue necesario crear una nueva agrupación de datos que funcionara como una línea base o punto de partida. El software AERMOD modela las dispersiones para los puntos ingresados a lo largo del tiempo y reporta los valores máximos de concentración obtenidos a lo largo del tiempo de modelado (peor escenario posible). Además, en este se puede elegir el número de valores máximos que el usuario desea obtener. Esto quiere decir que, si solo se elige uno y se corre el modelo para un año entero se obtendrá el valor máximo absoluto anual de concentración para cada centroide de los hexágonos de H3 con resolución 9.

Esta forma de reportar resultados permite estudiar zonas críticas de contaminación y potenciales puntos de riesgo, sin embargo, dificulta su validación. Por lo tanto, el grupo de investigación diseñó un método para crear datos comparables entre las estaciones de monitoreo y las simulaciones. El método incluye solicitarle al software 365 valores máximos para cada punto. Debido a los huecos en los datos no es posible conseguir 365 valores máximos, pero se pretende obtener lo más cercano a esto. Estos datos se promedian por mes

para eliminar el efecto de máximos absolutos y tener valores que ejemplifiquen de mejor forma la distribución de la contaminación a lo largo del tiempo.

Habiendo definido el método de elaboración de los modelos de dispersión se construyó una metodología de agrupación de las concentraciones registradas por las estaciones de monitoreo que permitiera comparar los valores. Para esto se adaptó la metodología de línea base y en lugar de generar promedios mensuales se obtuvieron los valores máximos diarios registrados en cada estación y posteriormente se calcularon los promedios mensuales de estos valores máximos.

Con los promedios máximos por estación se realizaron superficies de dispersión con IDW y si bien, no se buscó estudiar los resultados de forma puntual (debido a que ambos modelos cuentan con un grado de error e incertidumbre), sí se utilizó para identificar si la orden de magnitud obtenida por el modelo de dispersión es similar a la de las estaciones de monitoreo y, en caso de que no sea, realizar los ajustes correspondientes.

3.4.3. Indicador de exposición

Para determinar el impacto de la movilidad no motorizada, en específico del programa MiBici, se buscó territorializar el posible impacto en las emisiones, utilizando el software AERMOD, y lo que esto representaría para la población expuesta a los contaminantes. Comúnmente, este acercamiento busca encontrar correlaciones entre los niveles de concentración de distintos contaminantes atmosféricos con registros de incidencias de enfermedades de salud específicas, principalmente respiratorias.

Sin embargo, al no contar con acceso a los datos de problemas respiratorios territorializados por fecha, se optó por proponer un modelo que evalúe la exposición de la

población, identificando sitios potenciales de conflicto. Con esto, se continua con el eje rector de las metodologías planteadas en la investigación, que sean fáciles de desarrollar y aplicar, reduciendo la complejidad en la obtención y tratamiento de datos, con énfasis en su reproducibilidad y representatividad.

Por lo tanto, se optó por elaborar un método que identificara los sitios potenciales de exposición de la población, sin realizar clasificaciones por población vulnerable. Esto último se determinó en conjunto con el grupo de investigación ya que forma parte de axioma de la elaboración de un modelo sin altos niveles de complejidad.

Al estudiar las variables disponibles para elaborar este acercamiento, se optó por utilizar los datos del Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI para extraer la información de población total e identificar los sitios en los que está expuesta la población en relación con los sitios que habitan. De nuevo, aprovechando los datos abiertos del INEGI, se utilizó la información de personas ocupadas del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE). Y, por último, se obtuvieron los datos de viajes de transporte público masivo y rutas de transporte público cruzando información de la Secretaría de Movilidad (Semov), el Instituto de Información Estadística y Geográfica (IIEG) y el Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara (Imeplan). Estas tres variables se manejaron como densidades dentro de los hexágonos de H3 de resolución 8 para facilitar su comparación.

La densidad de población se obtuvo calculando el total de población que se encuentra dentro de cada uno de los hexágonos de H3 con resolución 8 y dividiéndolo entre el área de cada hexágono (87.3ha). Para definir la población que se encuentra dentro de cada hexágono

se extrajeron los centroides de las manzanas del Marco Geoestadístico 2020 del INEGI y se realizó una unión por localización espacial en QGIS, cada centroide incluía la población total de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020, la cual se sumó para obtener los totales por hexágono.

La metodología para obtener la densidad de personas ocupadas fue similar a la de densidad de población, sin embargo, en lugar de utilizar los centroides de las manzanas se utilizaron los puntos de las unidades económicas del DENU. Para obtener la estimación de personas ocupadas por unidad económica se utilizó la información de personas ocupadas que se encuentra dentro del DENU y se dividió entre el área de cada hexágono. No obstante, por la forma en que esta información es reportada fue necesario dar un tratamiento a los datos, este se muestra en la siguiente tabla (Tabla 7).

Tabla 7. Tratamiento de datos de personas ocupadas del DENU

Personas ocupadas DENU	Valor utilizado para cálculo
0 a 5 personas	3
6 a 10 personas	8
11 a 30 personas	20
31 a 50 personas	40
51 a 100 personas	75
101 a 250 personas	175
251 personas y más	325

Para la mayoría de los casos se observa que únicamente se utiliza el valor medio entre los límites de la categoría. El único caso en el que no se puede aplicar este criterio es en el de 251 personas y más, para este se tomó el último incremento del que se tenía conocimiento y se volvió a utilizar. Esto quiere decir que como en el último incremento se le sumaron 75 a 100, de nuevo se utilizó el 75, por lo que se colocó 325. Todos estos valores son estimaciones, pero logran representar las tendencias generales de esta variable.

La construcción de la densidad de viajes requirió un mayor procesamiento de datos en comparación con la densidad de población y densidad de personas ocupadas. El primer cálculo de esta variable se hizo utilizando los viajes totales por estación del Macrobus para el año 2019. Los viajes se tenían desagregados por hora y día del año y por estación específica. Con estos datos se sumaron los totales diarios y posteriormente se obtuvo el promedio diario, o visto de otra manera, los viajes que se generan en cada estación en un día promedio.

A diferencia de las variables de densidad de población y densidad de personas ocupadas, el promedio de viajes por estación sí tenía un dato de temporalidad. Sin embargo, se consideró apropiada su omisión debido a que la información de densidad de población y densidad de personas ocupadas también se podría considerar como el comportamiento esperado en el sitio en un día promedio. No todos los días las personas ocupadas en una unidad económica acuden a ella para trabajar ni la población que habita un hogar se encuentra en este todo el año. Por lo tanto, se considera correcto decir que el comportamiento que se está estudiando para todas las variables es el de un día promedio y, para facilitar su interpretación, es posible su eliminación de las unidades.

Con esto, se prosiguió a la estimación de datos de viajes para las estaciones de Tren Ligero y para las rutas de transporte público. Utilizando el reporte de Usuarios en el Sistema de Transporte Urbano de Pasajeros en Guadalajara Enero a mayo 2019 (IIEG, 2019) se obtuvieron los viajes totales para el Macrobus y alimentadoras, el Tren eléctrico y el Sistema Integral del Tren Ligero (SITREN). Aunque los datos únicamente son para los meses de enero a mayo lo que se busca identificar es la relación de los datos de viaje por modo de transporte, más que los totales del año. A su vez, se utilizan los valores registrados en 2018

debido a que se establece en el documento que los del año 2019 son preliminares. Los valores que se muestran son:

Tabla 8. Viajes por tipo de transporte – enero a mayo 2018

Tipo de transporte	Viajes
Macrobus	15,494,411
Alimentadoras Macrobus	4,408,018
Tren Eléctrico	41,977,668
SITREN	2,177,306

A partir de estos datos se obtuvieron los viajes por ruta analizada. Para el Macrobus solo se tiene una ruta, por lo que se consideran estos valores como totales. Para el Tren Eléctrico se tienen dos rutas, por lo que el total de viajes se dividió entre dos, esto mismo se hizo con el total de rutas alimentadoras del Macrobus y las rutas del SITREN. Para obtener el total de rutas de estos últimos se utilizó la capa de Rutas Mapa base de octubre del 2019 que se encuentra disponible en el SIGMetro, publicada por el Imeplan.

Utilizando los datos de viajes por ruta de transporte y por tipo de transporte se generaron datos de relación de viajes comparándolos contra los viajes del Macrobus (que son los únicos valores que se obtuvieron por estación y desagregados temporalmente). Esa relación se utilizó para estimar los viajes generados por cada medio en el área de estudio.

Debido a que se conocen los viajes promedio para cada estación del Macrobus, se utilizó esta información para obtener el valor de viajes promedio de todas las estaciones del área de estudio. También, se cuenta con los datos de estaciones del Tren Ligero en el área de estudio y la cantidad de rutas por hexágono del área de estudio. Para obtener la estimación de viajes del Tren Ligero se utiliza la relación calculada con los datos de la Tabla 9 y los datos de viaje promedio en las estaciones de Macrobus en el área de estudio. Por ejemplo, si hay 100 viajes en promedio para las estaciones del Macrobus en el área de estudio y la

relación de viajes del Tren Ligero es de 2:1, se estimaría que cada estación de Tren Ligero en el área de estudio correspondería a 200 viajes. Cabe aclarar que en el caso de que una sola estación corresponda a dos líneas del tren ligero el valor se multiplicó por 2.

Tabla 9. Viajes promedio en el área de estudio por tipo de transporte

Tipo de transporte	Viajes por ruta	Viajes promedio en el área de estudio
Viajes Macrobus	15,494,411	5574.75
Viajes Tren Ligero	20,988,834	7551.59
Viajes Transporte público	293,868	105.73
Viajes SITREN	725,769	261.13

Por su parte, para las rutas de transporte público y las rutas alimentadoras del Macrobus se utilizaron los mismos datos de la relación de la Tabla 9, asumiendo que hay una sola estación por hexágono, pero contabilizando cada ruta de forma individual. Esto se traduce en que si la relación es 0.5:1 con 100 viajes de Macrobus y hay 10 rutas que pasan por un hexágono, se obtiene un valor de 500. Este mismo proceso de contabilización de rutas se repitió para el SITREN, donde se considera una parada por ruta que cruza el hexágono. El resumen de los cálculos se muestra en la Tabla 9.

A partir de los datos de viajes promedio por hexágono se calculó la densidad dividiendo el valor de los viajes totales para los tipos de transporte analizados entre el área de los hexágonos.

Los datos de densidad de población, personas ocupadas y viajes cuentan con un orden de magnitud equivalente, por lo que se considera que cumple el objetivo de usar densidades en lugar de valores totales para facilitar su comparación. Aun así, se optó por estandarizar los valores de las tres variables con la siguiente ecuación:

$$x_{estandarizada} = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (16)$$

Para elaborar el indicador de exposición simplemente se sumaron los resultados de los valores estandarizados. Posteriormente, se evaluó la distribución del indicador de exposición y se crearon tres grupos de exposición. Se definieron los grupos a partir de los puntos de quiebre que se identificaron en los datos y buscando que la cantidad de hexágonos por categoría fuera similar. Los grupos se definieron como indicador de exposición alta, media y baja.

$$I_{Exposición} = DensPob_{estandarizada} + DensPerOcup_{estandarizada} + DensViajes_{estandarizada} \quad (17)$$

3.4.4. Indicador de concentración

Al igual que los datos del indicador de exposición se realizó una normalización de los datos de calidad del aire. Sin embargo, para estos no se usó una normalización estadística, sino que se propone un método que integra el valor límite de la concentración para PM₁₀ de acuerdo con la NOM-025-SSA1-2020, que establece un valor de 70µg/m³ para un periodo de 24 horas. Con esto, se obtiene la siguiente ecuación:

$$x_{norm} = \left| \frac{x_{lim} - x}{x_{lim}} - 1 \right| \quad (18)$$

Con esta ecuación, a diferencia de una normalización estadística, se extrae información interpretable de los niveles de contaminación atmosférica dañinos para la población, ya que se identifica que aquellos valores superiores a 1 representan concentraciones que superan el límite marcado por la norma para 24 horas.

Además, los datos normalizados fueron categorizados para representar el nivel de la contaminación atmosférica. Los valores normalizados se dividieron en 4 categorías, siguiendo las convenciones de nombramiento del IMECA, esto quiere decir que son Baja, Regular, Alta y Muy Alta, por lo tanto, se omitió el nivel Extremadamente alta.

3.4.5. Indicador de impacto

Con el indicador de exposición y las concentraciones normalizadas se construyó el indicador de impacto, el indicador relaciona ambas variables para representar los sitios potenciales de exposición por la concentración de población y niveles de contaminación y, a partir de este valor, observar el cambio tras la aplicación de una estrategia o política. Para su desarrollo, se debe de estimar el impacto de la estrategia o política sobre las emisiones de contaminantes atmosféricos, para esta investigación, esta representa el cambio en la cantidad de vehículos tras el impulso a la movilidad no motorizado. Además, para su interpretación, se requiere tener la información en dos momentos comparables y así observar y estudiar el momento previo y posterior al impulso de la política.

Se consideró que el acercamiento de una ecuación tradicional de riesgo en la que se multiplica la vulnerabilidad por el peligro era apropiado para construir el indicador de impacto. Por lo tanto, se realizó una multiplicación de las concentraciones de PM_{10} normalizadas con el indicador de exposición:

$$I_{Impacto} = I_{Exposición} \cdot PM_{10 Norm}$$

(19)

Un aspecto importante para resaltar es que, por el método de estandarización que se utilizó para el indicador de exposición, este cuenta con valores negativos. Sin embargo, si se

utilizan los valores negativos para construir el indicador de impacto se generarían resultados inesperados y difíciles de interpretar desde una perspectiva del impacto de las estrategias o políticas. Esto hizo necesario desplazar los valores del índice de exposición para evitar valores negativos. Para no tomar únicamente el valor mínimo del indicador, se observaron los datos de las variables de densidad de población, densidad de personas ocupadas y densidad de viajes y se sumó el valor mínimo de cada uno. Este dato representa el escenario más bajo posible del indicador de exposición, con un valor de -3.5. Por lo tanto, se le sumó 3.5 al resultado del indicador de exposición para desplazar los datos a valores mayores a 0.

Tras realizar la multiplicación se definieron las categorías del impacto. Al estudiar la distribución de los datos se determinó que se requerían 4 categorías (Bajo, Regular, Alto y Muy Alto) para representar las variaciones en el territorio y en los resultados, siguiendo con los lineamientos establecidos para los niveles de contaminación atmosférica.

Como se mencionó previamente, si se analizan los datos en un solo tiempo t el indicador de impacto solo representa la coincidencia espacial entre la población expuesta. Para identificar el impacto esperado de la estrategia se tiene que observar de forma comparativa con y sin su implementación. Para esto, en esta investigación se crearon dos escenarios, uno con las emisiones en enero y mayo 2015 y otro con las emisiones de enero y mayo 2019. En estos escenarios se simularon las emisiones con el programa MiBici y sin él. A partir de información recabada de entrevistas a usuarios del servicio MiBici se estimó que su implementación resultó en una reducción del 15% del parque vehicular en el área de estudio.

4. Estrategia de implementación del marco metodológico de la investigación.

El presente proyecto de investigación cuenta con tres alcances principales, los que se aplicarán en conjunto para alcanzar el objetivo general. Las etapas de desarrollo se dividen a grandes rasgos en investigación, desarrollo y aplicación de distintas herramientas y métodos para la gestión de la calidad, análisis estadístico, modelos de aprendizaje automático, entre otros. Las herramientas e instrumentos utilizados para el desarrollo de la investigación y cumplir los objetivos específicos de la investigación se muestran en la sección 4.1., por su parte, una descripción general de los cronogramas de implementación se muestra en la sección 4.2.

4.1. Herramientas e instrumentos

Las herramientas para llevar a cabo la investigación incluyen paquetes de Software, herramientas y métodos estadísticos, lenguajes de programación y librerías y sensores de calidad del aire (de bajo costo y en estaciones de monitoreo). Debido a la variedad de instrumentos utilizados se agruparon en las categorías descritas y se muestran a continuación con una descripción de su aplicación:

- Paquetes de Software:
 - Minitab: es un software para realizar distintos análisis estadísticos, en este caso, ANOVA, análisis de confiabilidad y regresiones.
 - QGIS: es un Sistema de Información Geográfica (SIG) para analizar datos que tienen asociada una ubicación espacial. La representación de la ubicación de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire del AMG y de los viajes

realizados en MiBici se realizaron utilizando QGIS. Además de los indicadores de exposición, concentración e impacto.

- Excel: software para el manejo de datos con la capacidad de elaborar programaciones y análisis de datos a nivel de celda. A partir de los datos de calidad del aire se determinaron los días con mala calidad del aire utilizando Excel.
- Python: es un lenguaje de programación de código abierto con distintas librerías que lo convierten en una de las opciones más populares para manejar y analizar bases de datos, realizar representaciones y construir modelos de aprendizaje automático.
 - Pandas: es una librería de Python para manejar y tratar bases de datos. Los análisis de nulos y análisis de agrupaciones inválidas que se presentó se hizo utilizando la librería de Pandas.
 - Matplotlib; librería de Python para realizar representaciones y gráficas de datos. Tiene una alta integración con Pandas para mostrar la información de las bases de datos, como fue en el caso de los mapas de calor del análisis de nulos y análisis de agrupaciones inválidas.
 - TensorFlow: librería de código abierto de Python para realizar modelos de aprendizaje automático como redes neuronales con distintos métodos y ajuste de variables e hiperparámetros.

- Jupyter Notebook: herramienta complementaria a Python que permite correr códigos por celdas, mostrar bases de datos, imprimir gráficas y describir los procesos que se realizan.
- Sensores electrónicos de bajo costo: la SEMADET evalúa distintos sensores de bajo costo con distintas mediciones de contaminantes atmosféricos, los sensores analizados fueron:
 - EcoMeasure – ECOSMART: este sensor tiene mediciones de temperatura, presión, humedad relativa PM2.5, entre otros factores. Sin embargo, para este análisis solo se van a analizar los sensores de PM₁₀, O₃ y NO₂.
 - eLichens – eLos: aunque se contemplan otros contaminantes y variables atmosféricas el análisis solo se enfoca en su desempeño con respecto a PM₁₀, O₃ y NO₂.

4.2. Etapas del proceso de aplicación/investigación

4.2.1. Cronograma de trabajo

A continuación, se presenta un esquema general del cronograma de trabajo para IDI I, II, III y IV. Como lenguaje de comunicación se colocó en color azul el trabajo de investigación y en naranja el desarrollo y aplicación de los elementos investigados. Cabe destacar de nuevo que esta investigación forma parte de un proyecto más grande llevado a cabo en el ITESO y con el cual interactúa para avanzar y cumplir los tiempos establecidos. Este proyecto se coordina con los avances realizados en otra maestría y con alumnos de licenciatura en su

Proyecto de Aplicación Profesional. Además, la coordinación con la SEMADET es de gran importancia para lograr cumplir de forma concreta los objetivos establecidos.

Tabla 10. Cronograma de trabajo para IDI I, II, III y IV

Tema	Componentes	Año 1		Año 2	
		Primavera	Otoño	Primavera	Otoño
Delimitación de investigación	Objetivos				
	Objeto de estudio				
	Variables				
Evaluación del escenario actual	Llenado de huecos				
	Evaluación de medias				
	Agrupación de medias de desviación				
Evaluación de sensores de bajo costo	Gage R&R				
	Estadísticas de sensores				
	Confiabilidad				
Aplicación de modelo de evaluación de políticas públicas	Evaluación de impacto en el territorio				

En la tabla anterior, el color azul representa los tiempos de dedicados a la investigación y los recuadros en naranja muestran la aplicación y desarrollo de los métodos propuestos.

4.2.2. Imprevistos

De acuerdo con las pláticas establecidas con la SEMADET durante la investigación se estimó que los sensores electrónicos se iban a colocar y probar a partir de enero del año 2021. Sin embargo, por retrasos provocados por la pandemia no se lograron obtener los equipos en los tiempos acordados y su colocación y el análisis de datos se retrasó a mayo – julio 2021. Aunado a este retraso, no se lograron obtener diversos sensores de cada marca para evaluar las variaciones que se dan entre productos y tampoco se logró colocar sensores en diversos puntos para estudiar si esto genera un impacto. Aun así, se piloteó la metodología y se

evaluaron los sensores electrónicos a partir de variables estadísticas y representaciones gráficas.

5. Exposición de hallazgos

5.1. Análisis del ProAire 2014-2020

A partir de los lineamientos presentados en la sección 3.1. se realizó la clasificación de las estrategias y de las medidas del ProAire 2014-2020. Esta clasificación permitió analizar de forma sistematizada los distintos componentes que intervienen en el programa, entender los sectores que se pretenden impactar y los mecanismos a través de los cuáles se pretende realizar este impacto. En la Tabla 11 se muestra un resumen del resultado de este proceso. Se pueden consultar los resultados completos en el Anexo B.

Tabla 11. Descripción y clasificación de medidas del ProAire

Eje ProAire	Clasificación	Impacto	Medida	Descripción
Reducción de emisiones a la atmósfera	Acciones complementarias	Fuente móvil	Medida 1	Promover la movilidad integral en el AMG
	Acciones complementarias	Fuente móvil	Medida 2	Impulsar la construcción y desarrollo de nuevas líneas en los sistemas de transporte público masivo del AMG.
	Acciones complementarias	Fuente móvil	Medida 3	Mejorar la inspección a las emisiones vehiculares, así como el mantenimiento a los vehículos que circulan en el AMG.
	Acciones de mejora a la calidad del aire	Fuente móvil	Medida 4	Implementar un programa de detención y retiro de vehículos visiblemente contaminantes y/o no verificados (PVVC).
	Acciones de mejora a la calidad del aire	Fuente móvil	Medida 5	Reforzar los programas de verificación vehicular para vehículos pesados e implementar programas para mejorar las prácticas operativas
	Gestiones interinstitucionales	Fuente móvil	Medida 6	Promover la renovación, retro adaptación e incorporación de vehículos con bajas emisiones en la flota vehicular privada y de uso intensivo
	Gestiones interinstitucionales	Fuente móvil	Medida 7	Maximizar el beneficio de los combustibles UBA distribuidos en el AMG
	Acciones complementarias	Fuente fija/Fuente de área	Medida 8	Fomentar esquemas de autorregulación, mejora continua y auditoría en la industria para el cumplimiento de la legislación vigentes.
	Acciones complementarias	Fuente de área	Medida 9	Fomentar el uso, la instalación y capacitación de mejores tecnologías en procesos industriales, quema de combustibles y el control de emisiones en las industrias de jurisdicción federal y estatal.
	Acciones complementarias	Fuente de área	Medida 10	Impulsar el uso de combustibles más limpios en el sector industrial

	Acciones complementarias	Fuente de área	Medida 11	Establecer convenios de cooperación y coordinación con la industria papelera del Estado de Jalisco para reducir las emisiones de SO2.
	Acciones complementarias	Fuente fija	Medida 12	Establecer convenios de cooperación y coordinación con la industria vidriera y la industria química del Estado de Jalisco para reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera
	Acciones complementarias	Fuente fija	Medida 13	Elaborar un convenio de colaboración para regular y reducir emisiones provenientes de los ingenios.
	Acciones de mejora a la calidad del aire	Fuente de área	Medida 14	Regular y reducir las emisiones por el uso de pinturas base solvente por recubrimiento de superficies y desengrasado.
	Acciones de mejora a la calidad del aire	Fuente de área	Medida 15	Promover mejores prácticas y equipos más eficientes para la cocción de alimentos en establecimientos a través de esquemas de regulación y nuevas tecnologías.
	Acciones de mejora a la calidad del aire	Fuente fija	Medida 16	Regular las actividades de elaboración artesanal de ladrillos y crear un programa para que los productores apliquen las mejores prácticas en las ladrilleras.
	Gestiones interinstitucionales	Fuente de área	Medida 17	Impulsar el control de vapores en terminales de almacenamiento y reparto de PEMEX, en el transporte y en estaciones de servicio.
	Legislación	Fuente de área	Medida 18	Establecer los lineamientos, regulaciones y buenas prácticas para reducir las emisiones generadas por quemas agrícolas (roza-tumbaquemado y zafra de azúcar), forestales y residuos urbanos.
	Acciones de mejora a la calidad del aire	Fuente de área	Medida 19	Regular las actividades de extracción en bancos de materiales y las actividades de preparación de sitios en construcción.
	Legislación	Fuente móvil	Medida 20	Impulsar la creación de una Norma Ambiental Estatal (NAE) para establecer límites máximos permisibles de emisión más estrictos para vehículos automotores a combustión.
Gobernanza	Acciones complementarias	Fuente móvil	Medida 21	Implementación del programa de Transporte Escolar para planteles educativos en el Estado de Jalisco.
	Acciones de mejora a la calidad del aire	Fuente fija/Fuente de área	Medida 22	Fortalecer los esquemas de inspección y vigilancia en la industria.
Fortalecimiento institucional	Gestiones interinstitucionales	Tecnologías de la Información y Comunicación	Medida 23	Instrumentar del Registro de Emisiones y Tránsito de Contaminantes estatal.
	Sistemas tecnológicos	Fuente fija	Medida 24	Crear el Sistema de Información Estatal de Emisiones Industriales.
	Gestiones interinstitucionales	Tecnologías de la Información y Comunicación	Medida 25	Instrumentar del Registro de Emisiones y Tránsito de Contaminantes municipal.
	Legislación	Alineación legal	Medida 26	Actualizar y mejorar el Plan de Contingencias Atmosféricas del AMG.

	Legislación	Alineación legal	Medida 27	Actualizar el Programa estatal de educación ambiental para el desarrollo sustentable en materia de calidad del aire.
	Acciones complementarias	Tecnologías de la Información y Comunicación	Medida 28	Desarrollar las capacidades para generar el pronóstico de la calidad del aire, analizar la dispersión de contaminantes y desarrollar escenarios utilizando herramientas de modelación.
	Acciones complementarias	Tecnologías de la Información y Comunicación	Medida 29	Asegurar el funcionamiento eficiente, confiable y oportuno, así como la ampliación del Sistema de Monitoreo Atmosférico de Jalisco (SIMAJ).
	Gestiones interinstitucionales	Alineación legal	Medida 30	Establecer el Comité Núcleo para la implementación, seguimiento y evaluación para el ProAire.
Generación y aplicación del conocimiento	Acciones de mejora a la calidad del aire	Tecnologías de la Información y Comunicación	Medida 31	Mejorar y ampliar los esquemas de comunicación a la población sobre la calidad del aire en tiempo real y su importancia.
	Acciones complementarias	Tecnologías de la Información y Comunicación	Medida 32	Desarrollar proyectos de investigación científica para conocer la dinámica atmosférica y los mecanismos de formación de contaminantes secundarios en la atmósfera del AMG.
	Acciones complementarias	Tecnologías de la Información y Comunicación	Medida 33	Actualizar el inventario de emisiones de contaminantes criterio para el Estado de Jalisco y desarrollar el inventario de emisiones de contaminantes tóxicos.
Protección a la salud de la población	Acciones de mejora a la calidad del aire	Salud	Medida 34	Reducir la exposición de la población a partículas por medio de la expansión de la cubierta vegetal en las ciudades.
	Gestiones interinstitucionales	Salud	Medida 35	Desarrollar el Sistema de Vigilancia Epidemiológica (SVE) del Estado de Jalisco en materia de calidad del aire.

Elaboración propia con base en SEMADET 2014a

Tras analizar las estrategias y medidas del programa ProAire, se identificó que es un programa robusto y altamente ambicioso, al punto que se aleja de la realidad y del funcionamiento de los aparatos gubernamentales. Esto lo convierte en un proyecto difícil de iniciar (hay muchos puntos de entrada relevantes y no están priorizados), de darle seguimiento (no se establece un líder y se distribuyen las actividades entre una amplia cantidad de actores que pueden tener poca o nula experiencia en el tema de calidad del aire) y de medir su impacto (no se establecen indicadores para las medidas, por lo que solo se pueden medir acciones aisladas y desvinculadas).

El contexto gubernamental y medio ambiental son dinámicos y, por este motivo, el programa debe de tener la capacidad de adaptarse a estos escenarios cambiantes. Para lograr esto de forma correcta y ordenada es necesario establecer un mecanismo de revisión y modificación con lineamientos claros. El proceso de mejora se verá beneficiado de un método evaluación del desempeño, en el que se pueden identificar porcentajes de avances a partir de los cuales se deberán de impulsar medidas que están demostrando ser exitosas y cambiar aquellas que no arrojan los resultados esperados.

Aunado a esto, otro problema que se observó es que el programa asume participación activa de todos los actores. Para concretar diversas estrategias se colocaba como responsable a otras dependencias (no a la SEMADET). Esto asume que los encargados tienen los recursos económicos y de personal necesarios para llevar a cabo las medidas, que, en casi todos los casos, involucran procesos de gestión interinstitucionales e intergubernamentales complejos.

A pesar de que la problemática de la calidad del aire se debe a una serie de interacciones socioeconómicas y ambientales altamente complejas e involucra a una gran cantidad de actores e interesados, es relevante establecer un líder para todo el proyecto de la implementación de la política. Que, por su área de trabajo y responsabilidades (establecidas en reglamentos y leyes), debe de ser la SEMADET. Este aspecto se relaciona con el conocimiento del contexto de la organización, de que se cuenta con un número finito de recursos económicos y humanos para realizar las gestiones e implementación de acciones necesarias.

Es por esto que es prioritario identificar cómo funciona la SEMADET y los otros actores gubernamentales con los que se deben de elaborar las gestiones. Para lograrlo, es

necesario dejar de lado el escenario ideal y acotar objetivos y acciones que sean alcanzables. Con este planteamiento se pretende cambiar el acercamiento de un programa tan robusto, como el ProAire, en el que es difícil identificar puntos para iniciar su implementación, darle seguimiento y/o medir su impacto.

Por otro lado, los indicadores establecidos en las medidas se orientaban únicamente a la acción. En la mayoría de las ocasiones estos eran binarios y no permitían definir impacto esperado para toda la medida. Por ejemplo, en la medida 19 se propone elaborar una norma técnica, el indicador únicamente especifica si la norma se elaboró o no. Este tipo de criterios de evaluación pierde el objetivo de las acciones que se hacen, ya que, es posible que se publique la norma, pero sin un seguimiento apropiado, la calidad del aire se siga deteriorando. Esto complica el seguimiento a los avances del programa, se pierde el objetivo de a dónde se pretender llegar y no permite evaluar los resultados.

Este aspecto adquiere mayor importancia al tratarse de un programa de una institución pública, la comunicación de los resultados a la población y la transparencia de los procesos deben ser ejes rectores. Por estos motivos, se propone no utilizar indicadores binarios que solo muestran cumplimiento o incumplimiento, es deseable diseñar herramientas de seguimiento y evaluación que permitan identificar porcentaje de avances con los que el ciudadano pueda observar un antes y un después.

De acuerdo con esto, un aspecto fundamental que debe de resolver el ProAire, o el programa que siga después de este, es acotar las acciones y definir objetivos alcanzables y medibles. Desde una perspectiva técnica el programa es sólido, pero, ya sea en la industria o la administración pública (más en el segundo) los recursos son finitos y saberlos administrar

y emplearlos de forma eficiente cobra más importancia que plantear un caso de cómo debería de funcionar algo.

Cabe destacar que, a pesar de que en esta sección se busca sistematizar y analizar el ProAire aplicando la visión de una herramienta como DMAIC el alcance de esta investigación no es evaluar todo el programa. Debido a la complejidad que representaría tomar cada una de las estrategias, estudiarlas y proponer métodos de evaluación de impactos, únicamente se busca realizar este proceso con una medida. Sin embargo, esta visión del ProAire es un precedente relevante en la cual se basan las propuestas que se muestran más adelante y que buscan sentar una ruta metodológica para su implementación en otras estrategias.

5.2. Evaluación del escenario actual

De las secciones 5.2.1. a 5.2.3. se muestran los resultados que se obtuvieron dentro del proceso de elaboración de la línea base, que forma parte del primer objetivo específico de la investigación. En estas secciones se presentan los resultados del análisis de agrupaciones de datos, los resultados del desarrollo del método de llenado de huecos con redes neuronales por relación espacial y, por último, la construcción de la línea base.

5.2.1. Análisis de agrupaciones de datos

En esta sección se presentan los resultados de la exploración de los datos de calidad del aire. En la Figura 22 se muestra el resultado de agrupar los valores nulos por estación y por año (izquierda) y por contaminante y por año (derecha). Los decimales que se muestran en el gráfico representan porcentaje de huecos (por ejemplo, 0.53 indica un 53% de vacíos para cierto año y para cierta estación o parámetro). De igual forma, los colores más oscuros

indican un mayor porcentaje de huecos para cierta estación o contaminante y en un año específico

Al analizar la figura es posible observar que hay porcentajes de vacíos más elevados en las estaciones que en los parámetros. Se asume que esto se debe a que los contaminantes agrupan una mayor cantidad de datos, por lo que los vacíos se comparan contra un mayor número de valores que sí se encuentran disponibles, lo que reduce el porcentaje. Sin embargo, para las estaciones, que representan la forma en que se van a trabajar los datos y que se usará como insumo para la línea base, sí se identifican valores elevados de huecos que pueden convertirse en un problema para la validez de las agrupaciones.

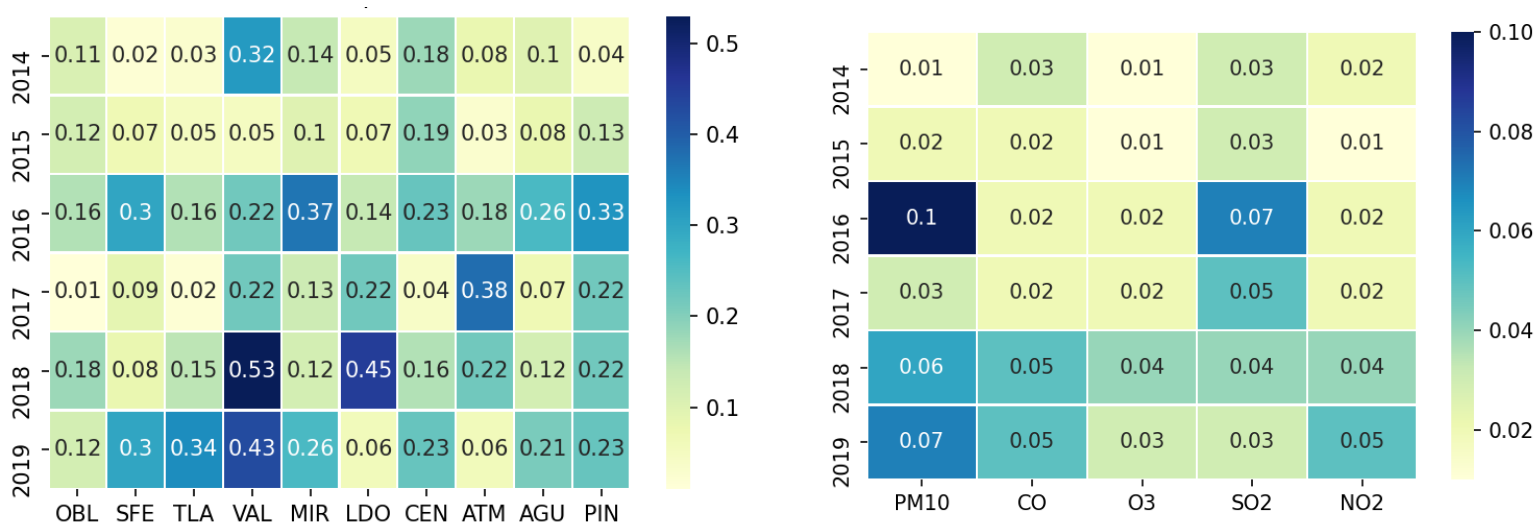


Figura 22. Matriz de huecos por estación (izquierda) y por parámetro (derecha).

A partir del análisis de la Figura 22, se decidió puntualizar la evaluación de los vacíos para estudiar los datos con agrupaciones inválidas en rangos de 24 horas (esto quiere decir, que no tienen por lo menos el 75% de registros de concentración, equivalente a 18 valores). La Figura 23 muestra cuáles son los contaminantes y las estaciones que podrían generar problemas en la agrupación de los datos para los años 2015 y 2016, los resultados en los años 2018 y 2019 se muestran en el Anexo C. Una revisión rápida de la Figura permite identificar

que, si se utilizan los datos crudos de la SEMADET sin un tratamiento previo, diversas agrupaciones no serán válidas. Con porcentajes de agrupaciones inválidas que llegan al 100% de los valores para la estación Las Pintas (PIN) y el contaminante SO₂. Esta gráfica destaca la importancia de aplicar un método de llenado de huecos a la base de datos.

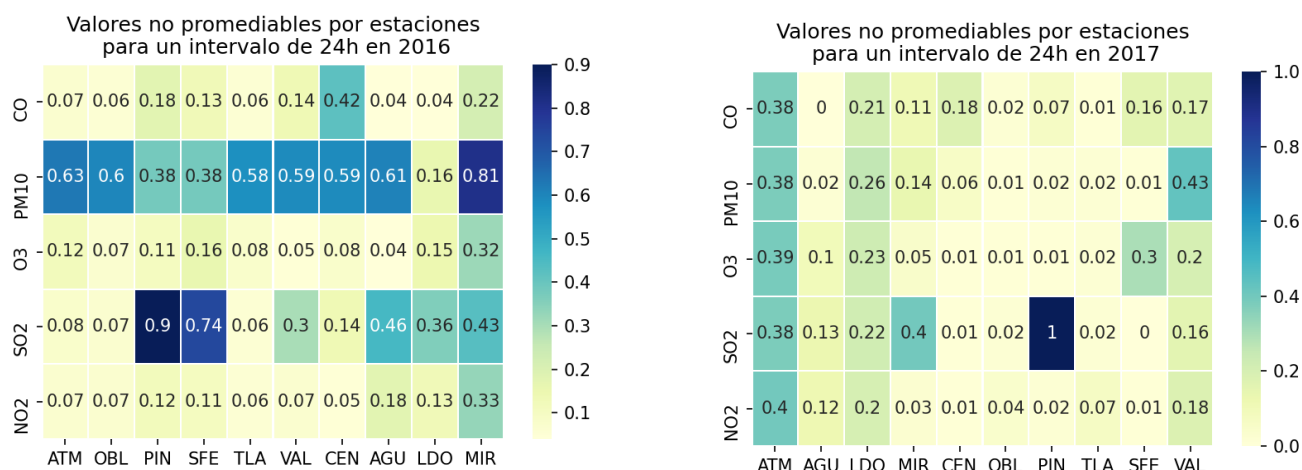


Figura 23. Análisis de agrupaciones inválidas para rangos de 24 horas para cada contaminante, por estación y por año.

Otro aspecto que se puede destacar al observar la Figura 23 es que no se identifica una tendencia en los vacíos. A pesar de que hay estaciones, como la de Centro (CEN), que aparecen con porcentajes elevados de agrupaciones inválidas, estos resultados no son consistentes a lo largo de los años e incluso para todos los contaminantes en un mismo año. Esto da indicios de que se trata de un problema que no es sistémico, lo que es relevante ya que se puede traducir en la necesidad de un modelo de llenado de huecos más robusto y optimizado para cada estación y contaminante.

5.2.2. Redes neuronales por relación espacial

Previo al desarrollo de la red neuronal por relación espacial se analizó la correlación de los datos de concentración de PM₁₀ entre las estaciones con el objetivo de seleccionar aquella

que mostrara una correlación más elevada contra las otras. Entendiendo a la red como la representación de las relaciones entre las concentraciones registradas por las estaciones, usar aquella con la correlación más alta permitiría facilitar el desarrollo del modelo por la relación lineal existente.

Al analizar la Figura 24, se puede observar que la estación Centro (CEN) es la que tiene una mayor correlación con las otras estaciones (excepto Águilas, que no tiene una relación fuerte con ninguna estación). Por este motivo, se optó por utilizar la estación Centro para desarrollar el modelo de llenado de huecos con redes neuronales. Por último, se muestra la dispersión de los valores de concentración de PM_{10} para cada estación con respecto a las otras (Figura 25). En esta es posible visualizar de forma gráfica el análisis de correlación que se muestra en la Figura 24.

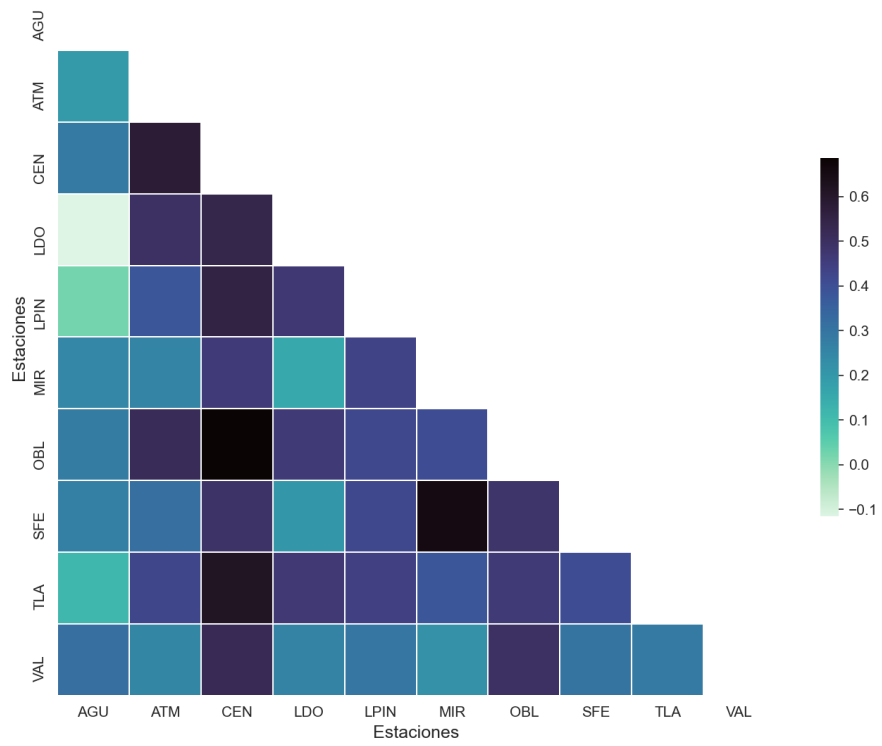


Figura 24. Correlación entre concentraciones de PM10 para las estaciones de monitoreo.



Figura 25. Dispersión entre concentraciones de PM10 para las estaciones de monitoreo.

En la Figura 26 se presenta la manera en que la red neuronal aprende ajustando los parámetros del modelo. Es posible observar que las pérdidas del modelo caen de forma acelerada en las primeras épocas. Aunque este es un ejemplo, representa el método para todos los modelos desarrollados en la presente investigación. También, se puede ver el resultado

de los datos de validación. En estos se aprecia el problema que hay para el modelo en general, la variación en la disponibilidad de la información de entrada (generada por los vacíos) altera el resultado obtenido y dificulta el ajuste de los parámetros.

Por otro lado, cabe resaltar que en las primeras iteraciones del modelo se estaban utilizando hasta 1000 épocas para el entrenamiento. Sin embargo, en este momento no se estaba utilizando regularizaciones, su aplicación optimizó la estabilización de los parámetros y redujo alrededor de 800 épocas de entrenamiento para llegar a resultados similares.

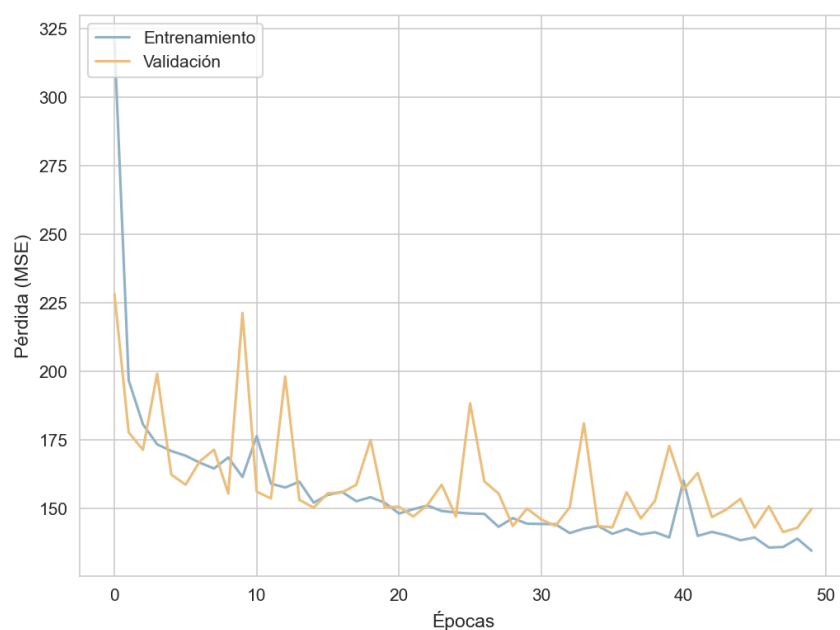


Figura 26. Ejemplo de los resultados del entrenamiento de la red.

De forma análoga a la Figura 26, en la Figura 27 se muestra el ejemplo de una red generada con las predicciones vs las mediciones obtenidas. Se logra apreciar en esta que, aunque existe una correlación positiva entre ambos valores también hay una dispersión elevada en los valores y esta se observa más mientras más crecen las concentraciones, tanto las predichas como las medidas. Estos resultados preliminares se buscaron mejorar con los ajustes de distintos hiperparámetros.

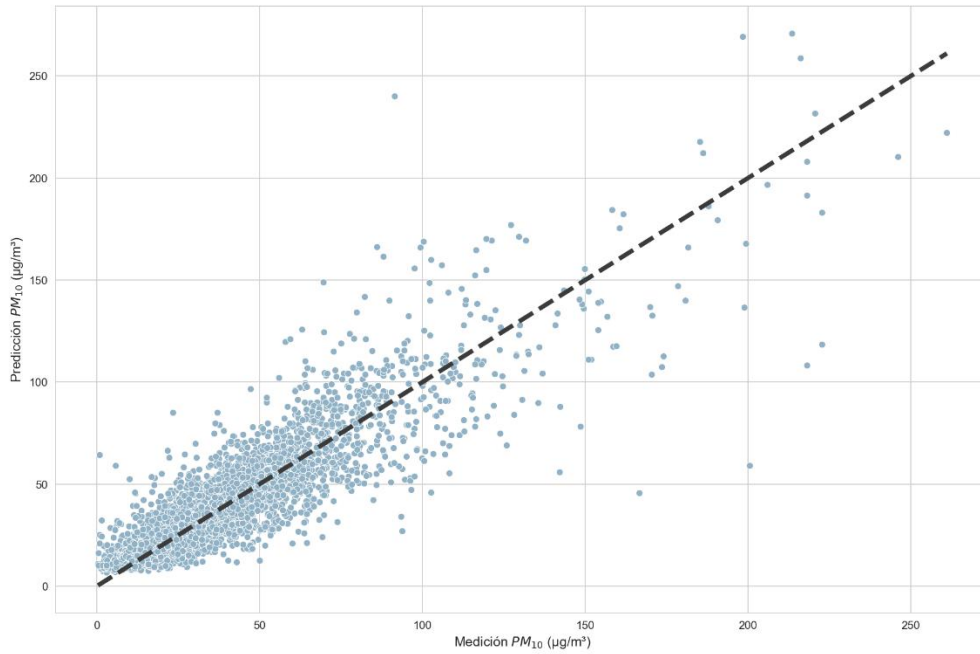


Figura 27. Ejemplo de la dispersión de predicciones vs los datos de concentración reales.

Debido a la gran cantidad de modelos que se evaluaron únicamente se muestran los resultados de los estadísticos de los mejores 3 modelos y los parámetros que se utilizaron para generarlos. En la Tabla 12 se muestran los valores de los hiperparámetros utilizados para cada modelo y en la Tabla 13 los resultados de los estadísticos obtenidos. Cabe destacar que estos mismos estadísticos fueron utilizados para evaluar los modelos aplicados en el resto de las estaciones de monitoreo atmosférico.

Tabla 12. Parámetros obtenidos para los mejores modelos de redes neuronales

Modelo	Épocas	Neuronas ocultas	Capas ocultas	Activación	α	Estado aleatorio	Inicializador w_i
Modelo 1	200	100	10	relu	1	16	16
Modelo 2	100	75	5	relu	0.1	20	58
Modelo 3	100	75	5	relu	0.1	96	72

Tabla 13. Resultados estadísticos obtenidos para los mejores modelos de redes neuronales

Modelo	R ² - E	MSE - E	MAE - E	RMSE - E	IA - E	R ² - P	MSE - P	MAE - P	RMSE - P	IA - P
Modelo 1	0.891	71.801	5.613	8.474	0.970	0.734	174.798	8.165	13.221	0.922
Modelo 2	0.836	109.303	6.876	10.455	0.951	0.802	125.693	7.367	11.211	0.941
Modelo 3	0.843	102.777	6.826	10.138	0.957	0.808	130.746	7.640	11.434	0.946

En la tabla se coloca un indicador con E para los resultados en el entrenamiento (los datos con los que se desarrolló el modelo) y una P para pruebas (los datos con los que se probó el desempeño del modelo). IA representa el estadístico *Index of Agreement*.

El Modelo 1 muestra los resultados que se pueden obtener con el entrenamiento e hiperparámetros adecuados; con datos de R² cercanos al 0.9, y una baja dispersión de los residuales. Sin embargo, la cantidad de épocas, capas ocultas y neuronas ocultas, indican que se trata del modelo más complejo de los 3 mostrados, y que tiende a sobreentrenar los datos. Esto quiere decir que se ajusta bien con los datos de entrenamiento, pero empeora su desempeño cuando se pone a prueba. Se puede corroborar esta dinámica al observar los resultados en los estadísticos de prueba, con una reducción en el coeficiente de determinación e incremento de la dispersión de los residuales.

Por el contrario, los modelos 2 y 3, aunque no logran tan buenos resultados en el entrenamiento, logran ser más estables al ponerse a prueba, con ligeras variaciones en los estadísticos empleados. Si se revisan los parámetros utilizados para su construcción se puede identificar que son muy similares, únicamente con variaciones en el estado aleatorio y el inicializador. Lo que podemos concluir de esto es que, aunque la aleatorización de los datos de entrada y los inicializadores sí generan un impacto en los resultados, no son tan determinantes como los parámetros del propio modelo.

A su vez, algo que es constante en todos los modelos es que el estadístico *Index of agreement* logra capturar de forma general el desempeño de las predicciones, pero no cuenta con el detalle necesario para estudiar de forma más específica el modelo y proponer mejoras.

Parece representar las tendencias generales de las predicciones con respecto a las concentraciones medidas, por lo que es útil para identificar si los valores calculados por el modelo representan la dinámica de variación de los datos reales. Aun así, para los objetivos de los modelos de predicción espaciales desarrollados en esta investigación no cuenta con la resolución suficiente.

Para representar lo que están haciendo los modelos, en la siguiente figura (Figura 28) se muestra la interpolación de las concentraciones, en la izquierda, se presenta la interpolación con el dato real y en la derecha la interpolación con el valor predicho. Para este caso en específico, se seleccionó una predicción que se alejara del valor real para crear una visualización más evidente. Mientras que el valor real está cercano a los $100\mu\text{g}/\text{m}^3$, la predicción se encuentra cercana a los $70\mu\text{g}/\text{m}^3$. La red neuronal entrenada busca identificar y reconstruir las relaciones espaciales de las concentraciones para generar un valor puntual.

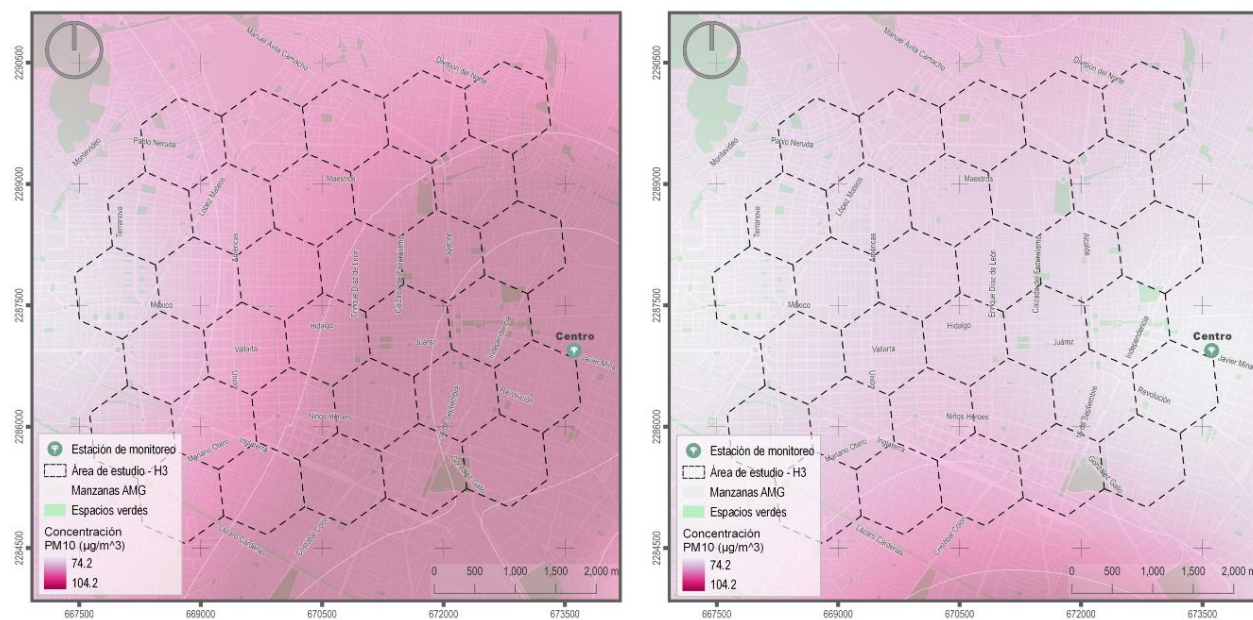


Figura 28. Interpolación de concentraciones con el valor medido (izquierda) y el valor predicho (derecha).

Desde la perspectiva de la dispersión espacial este cambio en las concentraciones produce superficies significativamente diferentes y rompe la dispersión esperada del contaminante. Por ejemplo, en la medición real se observa que hay concentraciones elevadas en el sur, que se mantienen en la estación Centro y se reduce hacia el oeste. Sin embargo, en la predicción, la concentración baja de forma pronunciada hacia la estación Centro y después vuelve a subir hacia el norte. Estas circunstancias dificultan el estudio de la contaminación desde una perspectiva puntual. A su vez, se destaca por qué se requieren modelos tan robustos en cuestión de capas y neuronas ocultas, ya que las dinámicas espaciales y de emisión a partir de las cuales se genera la predicción (y por lo tanto la superficie) son complejas. Más aún, cuando se agrega la variable de vacíos aleatorios en los datos de entrada.

A continuación, se presentan las gráficas de dispersión de los modelos 1, 2 y 3 (Figura 29). Estas se construyeron únicamente para las concentraciones de prueba, no con las de entrenamiento. En las 3 gráficas las mediciones se encuentran en las x mientras que las predicciones en el eje de las y . Al observar estas gráficas se identifica que la dispersión de los residuales sigue tendencias similares, con mayores similitudes entre el modelo 2 y 3, que es de esperarse. Sin embargo, también se puede analizar que en el modelo 1 hay un dato de medición cercano a los $400\mu\text{g}/\text{m}^3$, que se predijo como $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual puede estar afectando los estadísticos calculados para el modelo en las pruebas y su desempeño aparente.

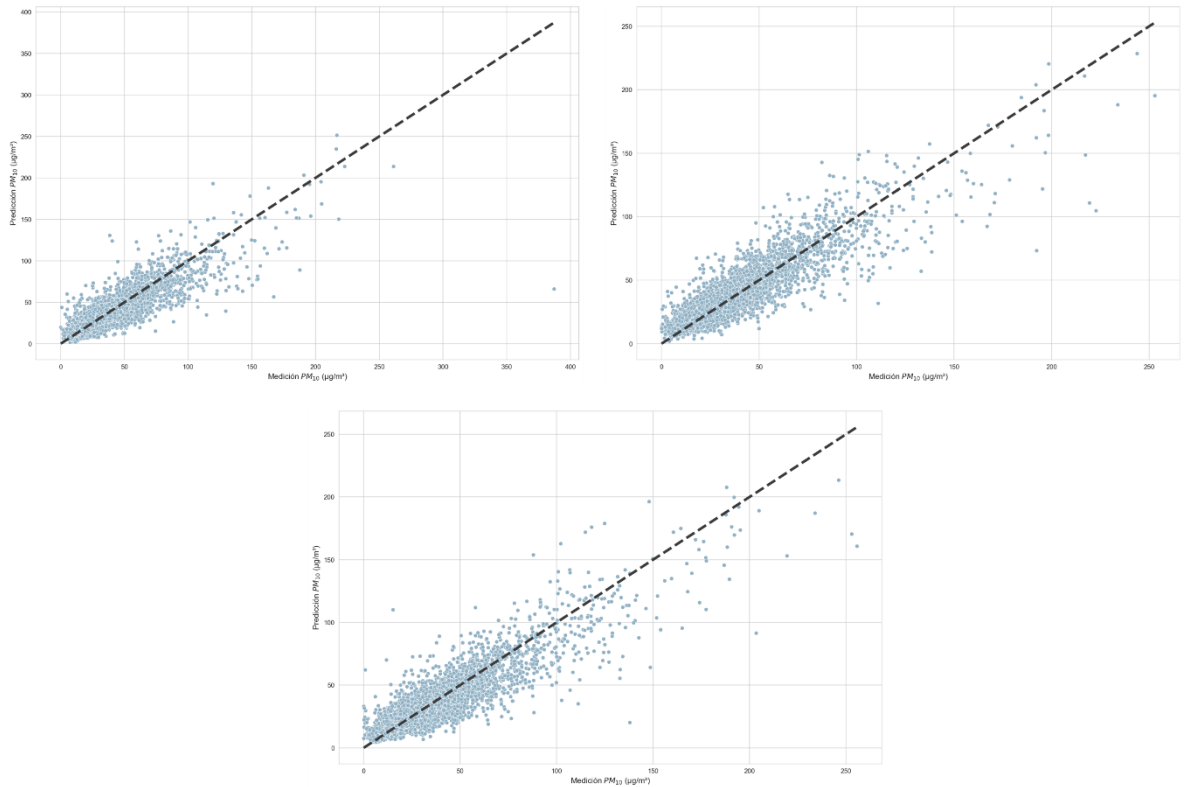


Figura 29. Gráficas de dispersión medición vs predicción. Izquierda superior – Modelo 1, Derecha superior – Modelo 2, Centro inferior – Modelo 3.

Como se describió en el análisis del estadístico del *Index of agreement*, los modelos parecen representar de forma adecuada las tendencias generales de los valores medidos y esto también se logra identificar con las gráficas. Por lo general, la dispersión que se observa se genera alrededor de la línea de tendencia ideal.

Para lograr analizar de forma más detallada los resultados se generaron gráficas de dispersión de residuales (Figura 30, Figura 31, Figura 32). En estas se muestra el error correspondiente al valor de predicción y las líneas de 1, 2 y 3 desviaciones estándar de los residuales con el objetivo de entender más sobre los errores del modelo. Esto corrobora lo observado en los estadísticos, ya que en el Modelo 2 se presenta la menor dispersión de residuales. Si se analiza la desviación estándar de los residuales y el promedio de las

predicciones se identifica, de forma general, que la dispersión se encuentra en $\pm 30\%$ del valor real.

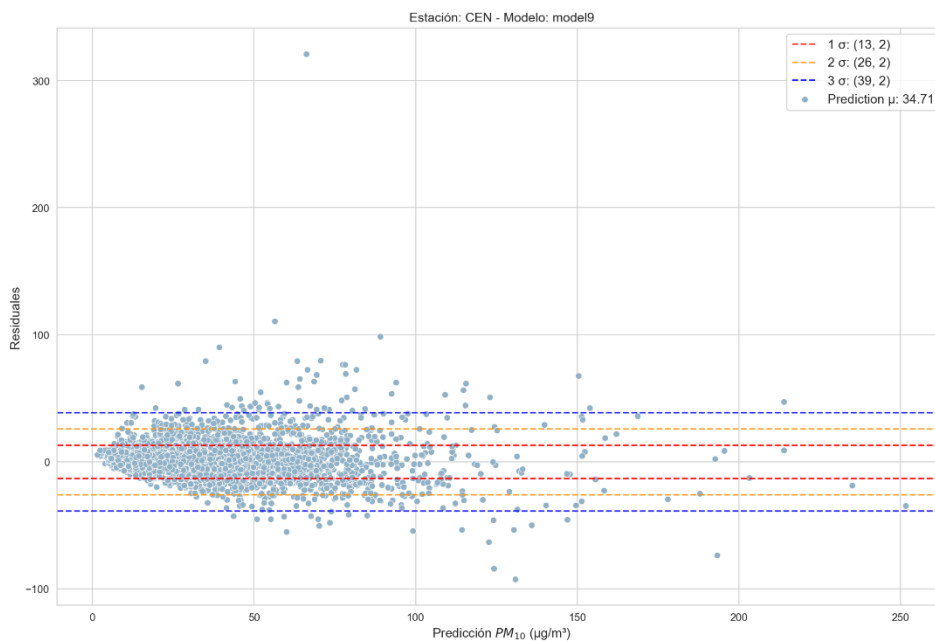


Figura 30. Dispersión de residuales para el Modelo 1.

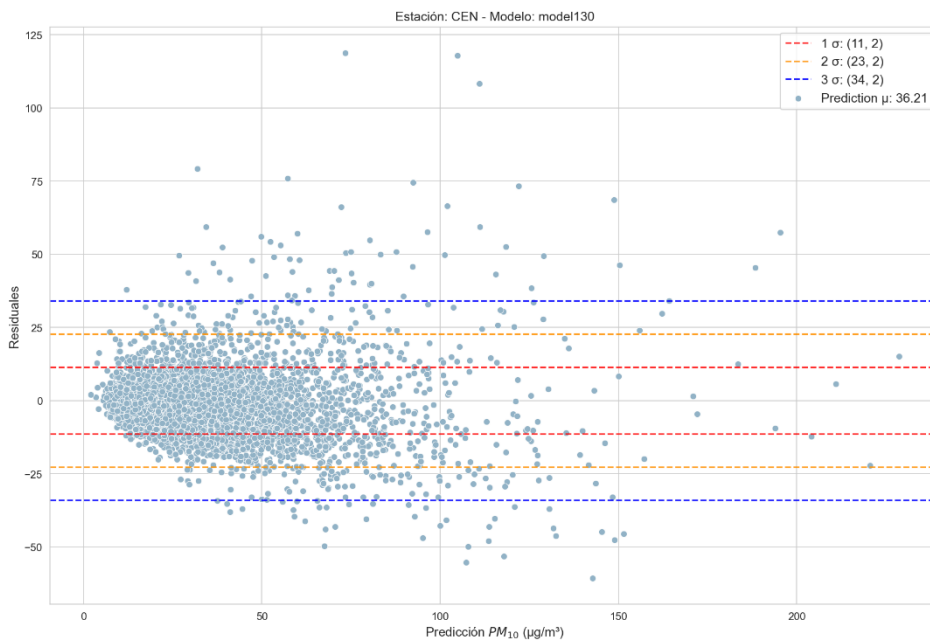


Figura 31. Dispersión de residuales para el Modelo 2.

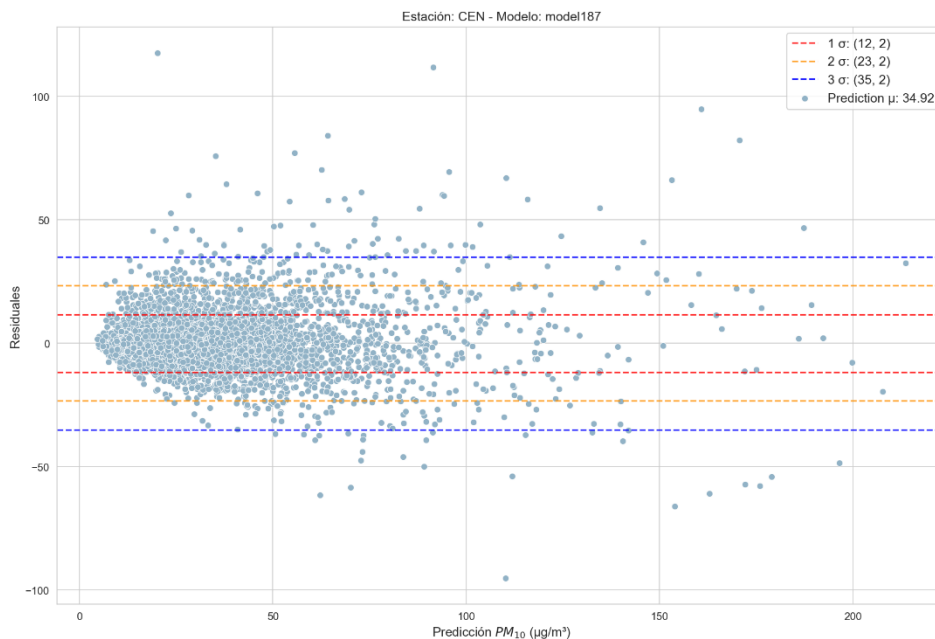


Figura 32. Dispersión de residuales para el Modelo 3.

A su vez, y corroborando lo que se muestra en la gráfica de dispersión, el error en el Modelo 1 atribuible a la predicción de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con valor real de $400\mu\text{g}/\text{m}^3$ agrega ruido al análisis. Sin este valor, parece que la variación entre el Modelo 1 y Modelo 3 es similar, aunque en ambos casos mayor que en el Modelo 2.

Para facilitar el análisis y presentación de resultados, a continuación, se muestran únicamente los resultados del Modelo 2 aplicado al resto de las estaciones. Sin embargo, los 3 modelos fueron aplicados en todas las estaciones y los resultados completos se encuentran en el Anexo D.

En la Tabla 14 se presentan los estadísticos para cada estación, en todos los casos, los hiperparámetros utilizados fueron los del Modelo 2 (Tabla 12). Tras revisar los resultados se observa que los modelos no logran representar de forma apropiada las dinámicas espaciales para el resto de las estaciones. Aunque no se esperaba obtener los mismos resultados que en la estación de entrenamiento (Centro), se consideraba que el modelo podría ser útil con otras

estaciones, o dar bases para la construcción de modelos más precisos para estas. Sin embargo, esto no se cumple, por el contrario, se resalta la importancia de construir modelos específicos para cada estación.

Tabla 14. Resultados estadísticos obtenidos para el Modelo 2 aplicado a 9 estaciones

Estación	R ² - E	MSE - E	MAE - E	RMSE - E	IA - E	R ² - P	MSE - P	MAE - P	RMSE - P	IA - P
Águilas	0.795	82.112	6.517	9.062	0.941	0.676	126.233	7.991	11.235	0.904
Atemajac	0.659	201.014	9.389	14.178	0.886	0.622	207.806	9.996	14.415	0.876
Loma Dorada	0.671	281.660	11.481	16.783	0.894	0.601	322.856	12.292	17.968	0.875
Las Pintas	0.708	1217.428	21.996	34.891	0.913	0.620	1528.139	23.341	39.091	0.880
Miravalle	0.694	828.991	18.299	28.792	0.904	0.577	1111.755	20.550	33.343	0.870
Oblatos	0.746	112.914	7.183	10.626	0.925	0.705	121.403	7.579	11.018	0.912
Santa Fe	0.619	1158.929	22.258	34.043	0.865	0.539	1352.378	23.982	36.775	0.833
Tlaquepaque	0.704	287.295	10.555	16.949	0.908	0.623	384.963	11.705	19.620	0.879

Aunque los resultados de los estadísticos muestran desempeños inadecuados para el proceso de llenado de huecos, en las Águilas, en los datos de experimentación y en Oblatos, tanto para experimentación como en prueba, se obtuvieron resultados que sería relevante continuar explorando. Para el resto de las estaciones, la dispersión de los estadísticos en las pruebas indica que no hay una buena relación entre la predicción y medición. Además, se refuerza lo descrito previamente sobre el *Index of agreement*, en todos los casos se tuvieron valores superiores al 0.8 para las pruebas, lo que demuestra que solo identifica una tendencia general pero no las desviaciones específicas.

En la Figura 33 y Figura 34 se muestran los resultados de la dispersión de residuales para las estaciones Miravalle y Oblatos respectivamente. En Miravalle se identifica la elevada dispersión de los residuales, lo que ejemplifica los modelos que no se ajustan de forma adecuada. Si observamos el promedio de predicción vs la desviación estándar, esta representa

+50% de la predicción. Este nivel de variación se puede corroborar al analizar los estadísticos para Miravalle (Tabla 14).

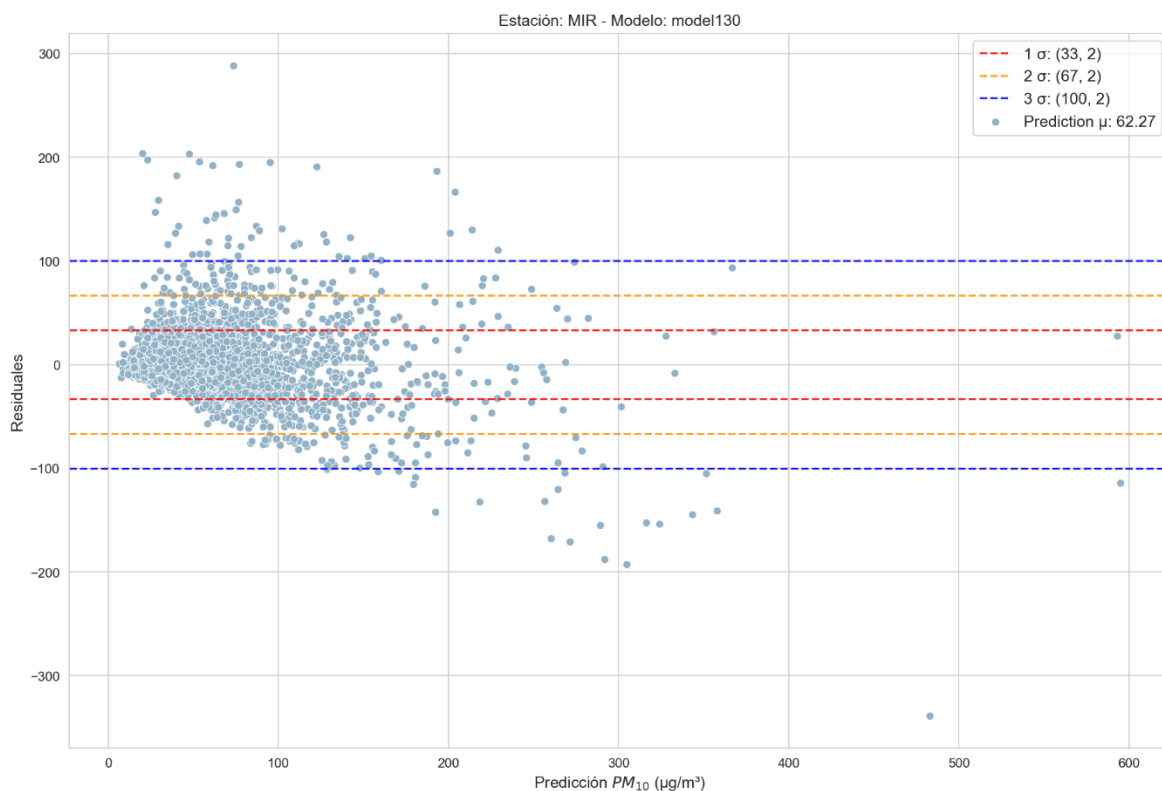


Figura 33. Dispersión de residuales para el Modelo 2 en la estación Miravalle.

Por otro lado, en la Figura 34 se observa la dispersión de Oblatos. En esta, aunque los estadísticos no representen un modelo particularmente bueno, la dispersión de los residuales y el valor de la desviación estándar es similar a la que se observa en el entrenamiento de Centro. Se consideraría relevante estudiar las características de los datos de concentración en Oblatos en comparación con Miravalle y definir cuáles son los elementos que hacen que el modelo se ajuste de forma adecuada.

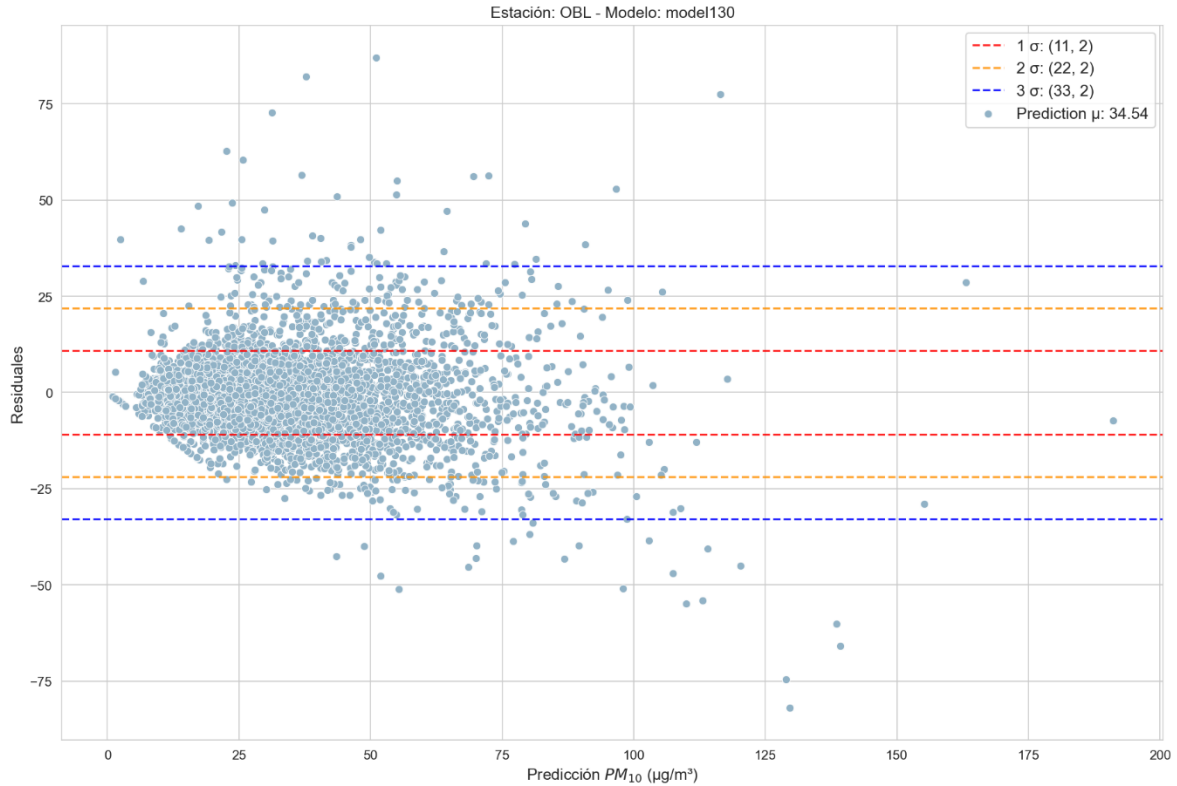


Figura 34. Dispersión de residuales para el Modelo 2 en la estación Oblatos.

Como se describió en la Figura 28 sobre la interpolación de las concentraciones, la construcción de los modelos a partir de la relación espacial reconstruye la superficie de dispersión, a partir de la cual se genera la predicción. Por lo tanto, se puede considerar que las relaciones de dispersión para cada estación son distintas, por lo que los hiperparámetros para la red neuronal se deben de ajustar de forma particular. Estas características de los modelos complican el acercamiento propuesto en la investigación, sobre el desarrollo de una red para todas las estaciones de monitoreo. De acuerdo con los resultados obtenidos se recomendaría a otros trabajos el desarrollo de modelos por relación espacial específicos para cada estación.

A su vez, los resultados indican que sería necesario probar con distintas arquitecturas y métodos más robustos para predecir los datos de concentración. Esto es, si se busca que las

variables de entrada tengan huecos, como en el método propuesto. Por su parte, otro acercamiento que se propone es el llenado de huecos por horizonte de tiempo y el uso de modelo de relación espacial para realizar ajustes en las concentraciones.

Otro aspecto que se debe de considerar es que, como parte de pretratamiento de los datos se eliminan aquellas filas con huecos en la estación de predicción. Debido a que cada estación tiene distintos números de huecos se tiene una cantidad distinta de datos para el entrenamiento y prueba. Por lo tanto, una estación con mayor cantidad de huecos tiene una menor cantidad de datos para desarrollar y adaptar los parámetros del modelo.

Aunque el modelo desarrollado para la estación Centro y su aplicación en el resto de las estaciones no generó los resultados esperados y, por lo tanto, no se pudo aplicar para el llenado de huecos, el desarrollo de la red es un complemento en el desarrollo de la metodología de la línea base y no el objetivo de esta investigación. Por este motivo, se presentan los aprendizajes y las recomendaciones para futuras investigaciones que busquen elaborar modelos de predicción espaciales, pero no se continúa con el desarrollo de un modelo satisfactorio de llenado de huecos.

5.2.3. Línea base

Siguiendo la metodología para la construcción de la línea base se realizaron las agrupaciones a los datos tratados sin espurios por año, mes, día de la semana y hora. En la Figura 35 se muestra la primera línea base construida, en esta gráfica se muestran todos los datos agrupados de forma continua, esto quiere decir que hay un dato para cada fecha, manteniendo la dispersión a lo largo del tiempo. Por otro lado, las líneas azules semitransparentes representan la desviación estándar para cada dato agrupado.

Como se mencionó en la metodología, esta primera iteración de la línea base no se conservó ya que se consideró que la resolución temporal era más alta de la que se podría requerir para evaluar el desempeño de las políticas públicas. Aun así, se mantiene en el reporte ya que resulta relevante observar la dispersión y las tendencias de los datos de la calidad del aire a través de las estaciones a lo largo del año.

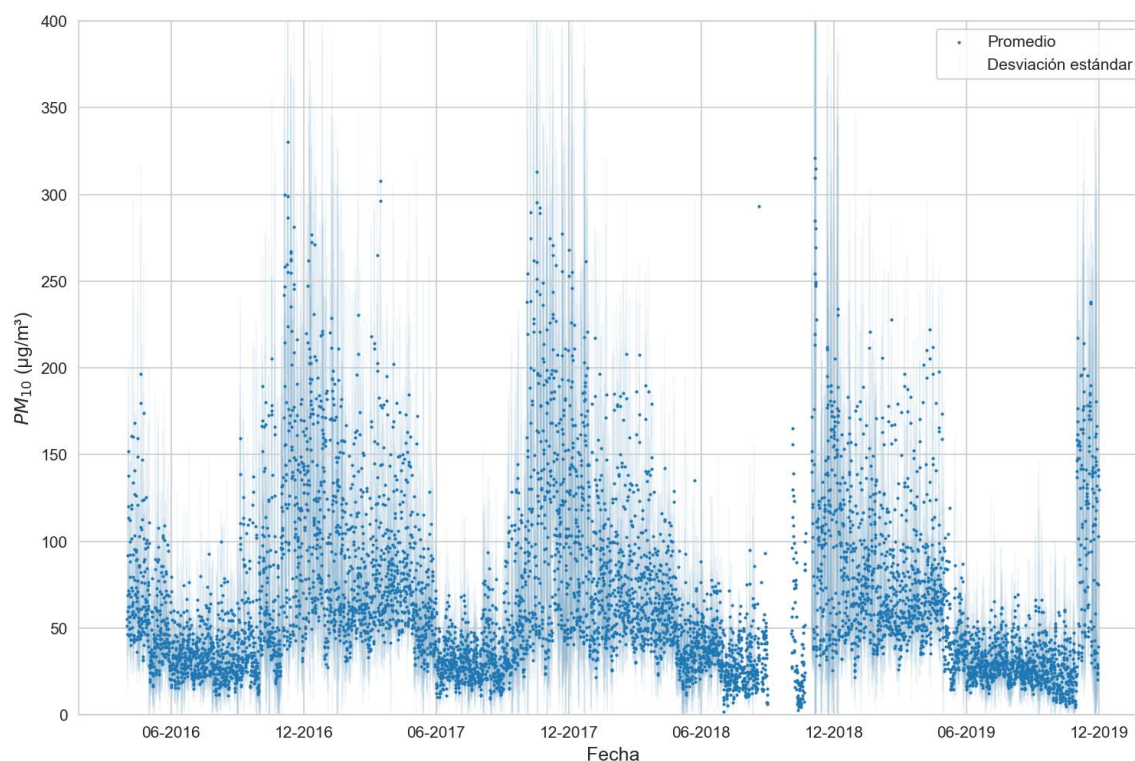


Figura 35. Línea base de contaminantes con agrupaciones por año, mes, día y hora para los años 2016 a 2019 continuo para Las Pintas.

Además, como complemento a la Figura 35 en la Figura 36 se muestran los mismos valores, sin embargo, en esta se muestran los tiempos agrupados, de forma que en lugar de mostrar los datos de forma continua las agrupaciones para los lunes de enero a las 00:00 horas se muestran en un mismo espacio en el eje de las x. De nuevo, aunque se identifica la dispersión de los datos y la heterogeneidad de los registros a lo largo de los años, es posible identificar tendencias globales que se mantienen en el tiempo.

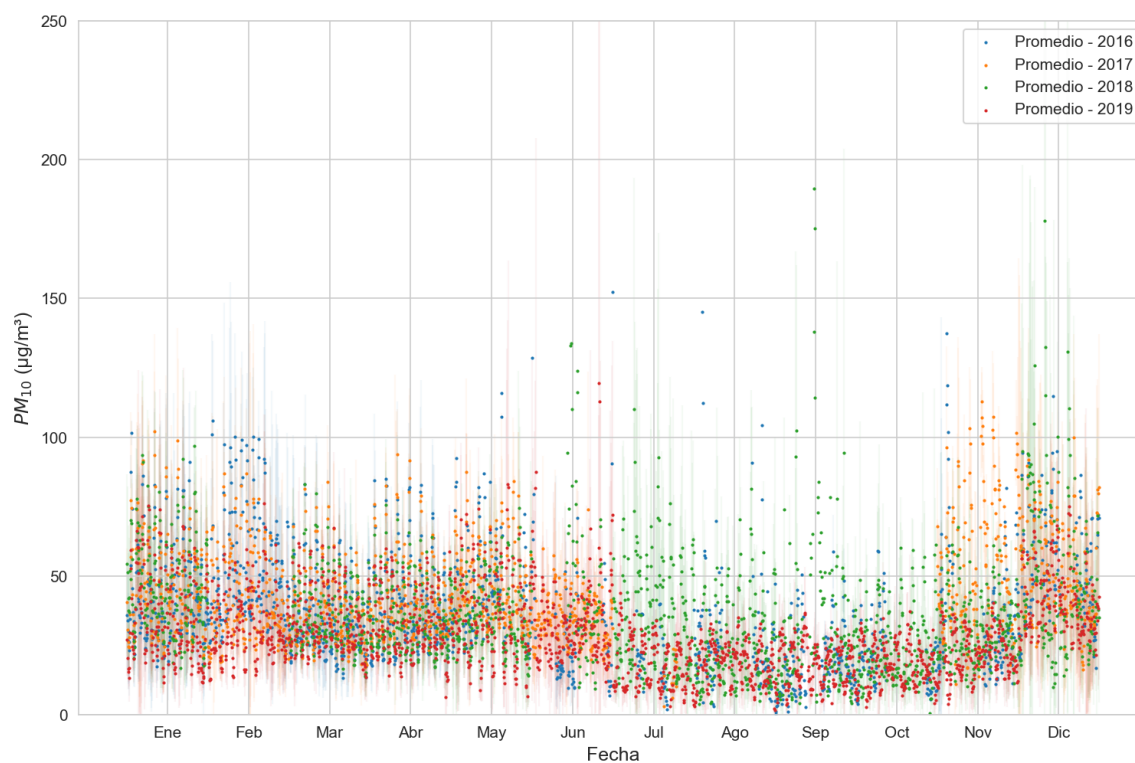


Figura 36. Línea base de contaminantes con agrupaciones por año, mes, día y hora para los años 2016 a 2019 para Atemajac.

En el segundo método de agrupación y de elaboración de la línea base se reduce considerablemente la resolución temporal y la cantidad de datos representados. Sin embargo, se conserva la tendencia estacional, con la que es posible estudiar de forma clara el comportamiento y el cambio en las concentraciones. En la Figura 37 se logran observar los picos de concentración que se generan en invierno y cómo esta concentración baja el resto del año. Otra cosa que se logra identificar es el cambio en la variación de los datos se reduce de forma importante en los meses de menor concentración, esto quiere decir que no solo baja la concentración, sino que tiene un comportamiento más predecible. En estas épocas, dado el contexto de la ciudad, es probable que los incrementos relevantes en la concentración se deban a incendios en el Bosque La Primavera.

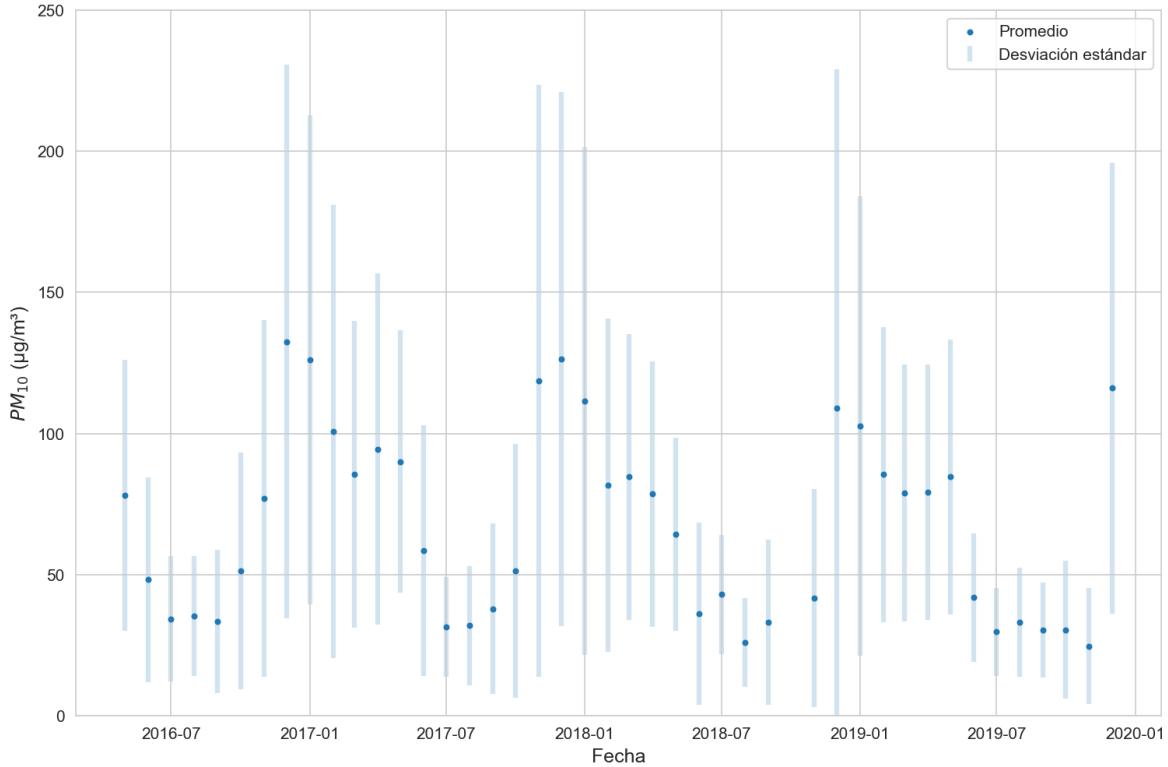


Figura 37. Línea base de contaminantes con agrupaciones por año, mes, día y hora para los años 2016 a 2019 continuo para Las Pintas.

De igual forma, las tendencias de los días con mala calidad del aire estudiadas y observadas de la Figura 4 a la Figura 9 se pueden identificar de nuevo en estos datos, corroborando el acercamiento propuesto en esta investigación, en el que se menciona que se trata de una circunstancia sistémica y no aleatoria que se puede entender y revertir con acciones focalizadas.

En la Figura 38 se muestra una gráfica similar a la de la Figura 36, en la que se colocan los promedios y sus respectivas dispersiones en el mismo eje de las x, correspondiendo a cada mes del año. De esta manera es posible identificar los años con mayor dispersión o comportamientos que se alejan de la tendencia estacional. Como se mencionó en la Figura 37, este acercamiento logra representar las tendencias de forma clara y permite evaluar el estado de la calidad del aire con respecto al comportamiento histórico.

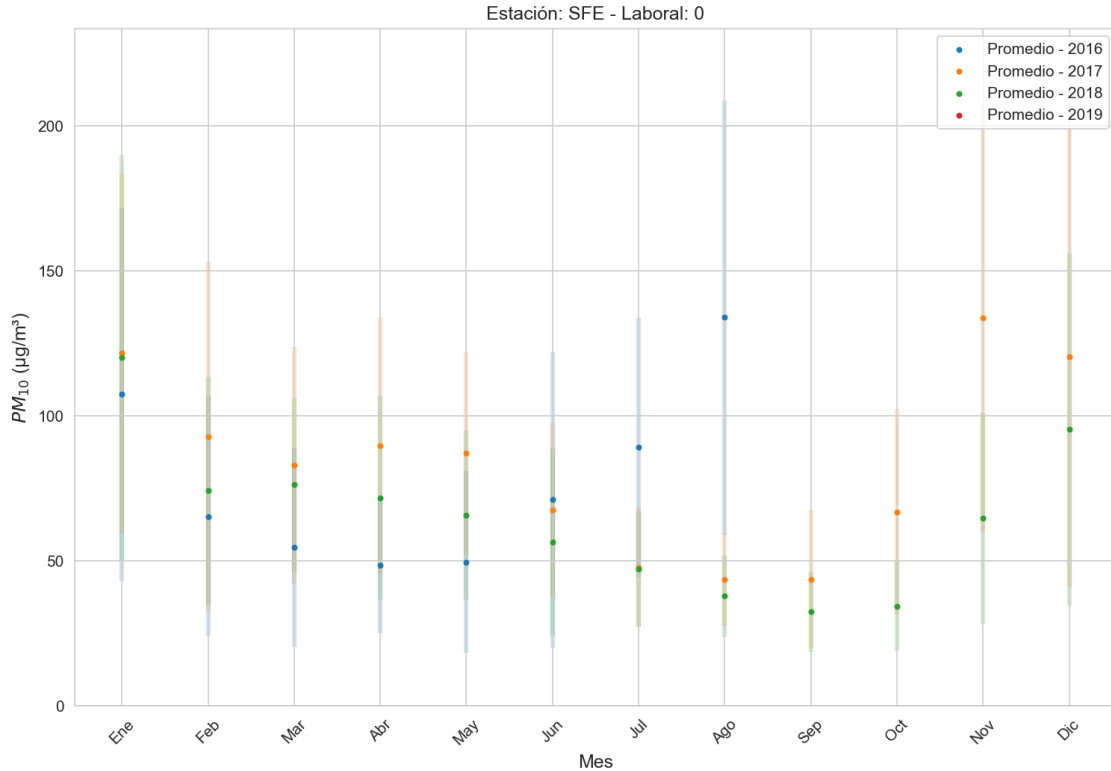


Figura 38. Línea base de contaminantes con agrupaciones por año, mes, día y hora para los años 2016 a 2019 para Santa Fe.

Cabe resaltar que, aunque la línea base elaborada logra registrar las variaciones estacionales, la dispersión en los datos se puede ver exacerbada por los huecos en los registros. Debido a que no se logró desarrollar y aplicar un método robusto de llenado de huecos es altamente probable que se muestren agrupaciones que no cumplen con el requerimiento mínimo del 75% de los datos. Esto quiere decir que, para que se incremente la confianza en los datos, se deben de enfocar más esfuerzos en el proceso de llenado de huecos.

De cualquier manera, aunque no se lograran generar las agrupaciones con el nivel de confianza deseado, se cumple el objetivo del desarrollo de la metodología para la elaboración de la línea base, ya que, aun con estas limitaciones, se logró identificar y aplicar la agrupación de datos en una resolución temporal suficiente para representar las variaciones a lo largo del año, pero con la capacidad de registrar cambios en tendencias. Este proceso se repitió para

todas las estaciones y las gráficas específicas se encuentran en la sección de Anexos (Anexo E).

Este acercamiento permite establecer el punto de partida para la evaluación de los años y del desempeño de las políticas públicas en materia de calidad del aire. Además, la elaboración de líneas base por estación también permite evaluar de forma localizada el estado inicial. Esto resulta relevante en circunstancias en las que se busque aplicar un proyecto en un espacio determinado. Tomando distintos elementos de las metodologías para línea base identificadas se logró elaborar una propuesta que mezcla un desarrollo e implementación sencillo con una capacidad de comparación y de estudio elevado.

5.3. Evaluación de sensores de bajo costo

En la sección 5.3.1. se presentan los resultados y el análisis de los estadísticos y gráficos generados durante la evaluación de los sensores electrónicos EcoMeasure y eLichens. Los elementos de análisis incluyen el desempeño de los sensores con respecto a las mediciones de la estación Vallarta de la SEMADET, pero también del análisis estadístico del impacto que tienen las condiciones meteorológicas sobre los registros de concentración.

5.3.1. Análisis estadístico y gráfico de los sensores

Para estudiar el impacto de las condiciones meteorológicas sobre las mediciones se inició por evaluar la suposición de normalidad en la distribución de los parámetros de temperatura y humedad relativa. Para esto, se realizaron pruebas de normalidad para ambas variables utilizando los valores meteorológicos recolectados por la estación Centro y tomando 1000 valores de forma aleatoria. En la Figura 39 y Figura 40 se muestra un histograma y una gráfica de cuantil-cuantil respectivamente, ambas son útiles para evaluar de forma visual la

distribución de los datos. En la Figura 39 se identifica que la distribución parece no ser Gaussiana y que los datos de la humedad relativa se encuentran distribuidos de una forma cercana a la homogeneidad. Por su parte, en la Figura 40, se identifica que en los límites iniciales y finales de los cuantiles los datos reales se alejan de los teóricos, de nuevo, esto viene reforzado por la distribución que se observó en el histograma.

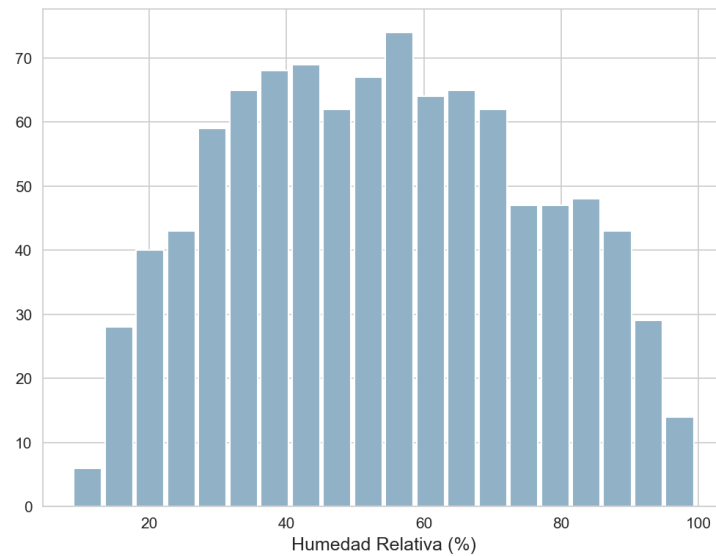


Figura 39. Histograma de la humedad relativa.

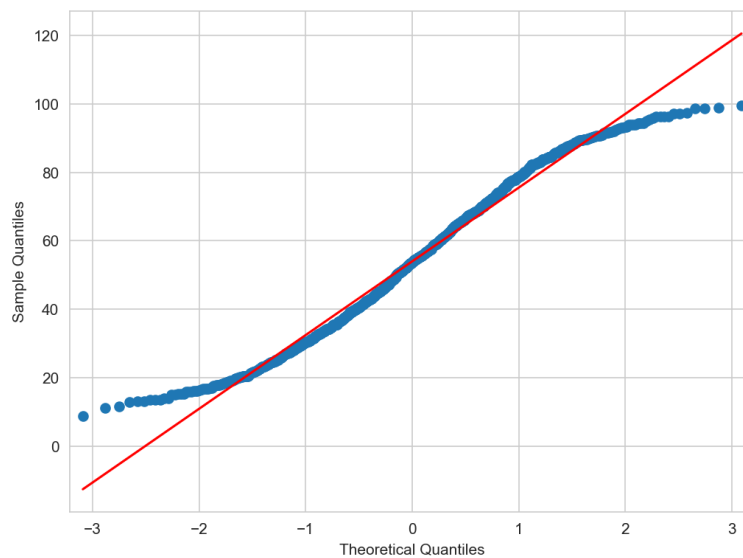


Figura 40. Gráfica de cuantiles de la humedad relativa.

A su vez, en el histograma y gráfica de cuantiles para la temperatura (Figura 41 y Figura 42 respectivamente), se identifica la concentración de los datos alrededor de los 20 – 25°C, lo que indica que tampoco cuenta con una distribución normal. En la Figura 42 se puede observar como el comportamiento oscilan alrededor del esperado.

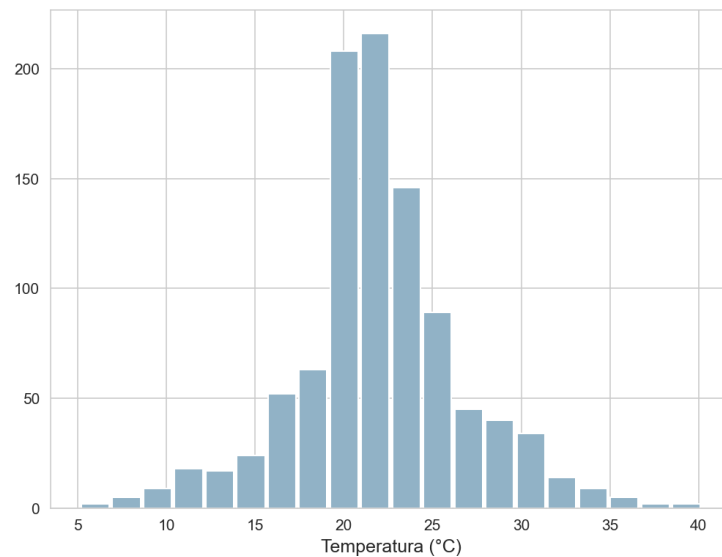


Figura 41. Histograma de la temperatura.

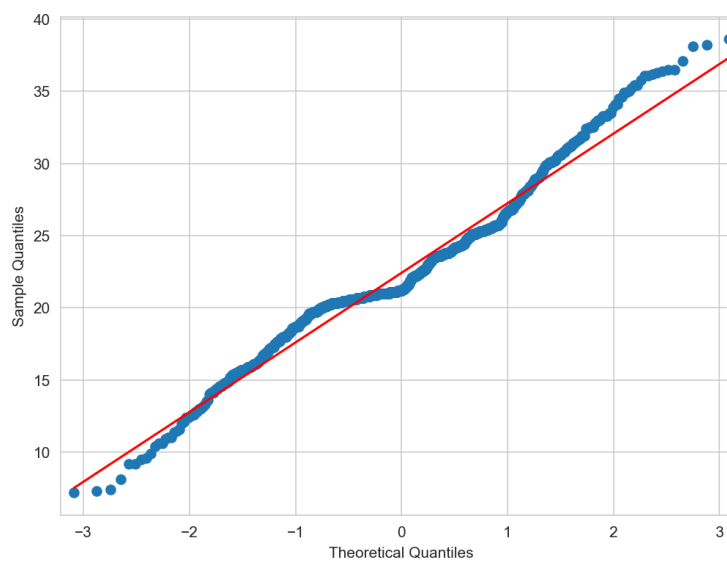


Figura 42. Gráfica de cuantiles de la temperatura.

Aunada a la revisión gráfica, se calcularon estadísticos para determinar el tipo de distribución, específicamente Anderson-Darling y se evaluó para un valor crítico del 5% (Tabla 15). De nuevo, se puede confirmar que ambos parámetros meteorológicos no siguen un comportamiento normal y se puede rechazar la hipótesis nula debido a que se superan los valores críticos. Aun así, es importante corroborar la importancia de estos datos estudiando el impacto que tienen estos parámetros sobre las mediciones de concentración de los sensores.

Tabla 15. Resultados de estadísticos Anderson-Darling

Anderson- Darling		Humedad Relativa	Temperatura
Nivel de significancia	Valor crítico	Resultado estadístico	Resultado estadístico
15%	0.574	5.83	13.9
5%	0.784		
1%	1.088		

Ahora bien, para la aplicación de la metodología se estudió el desempeño de los sensores EcoMeasure y eLichens de acuerdo con 3 contaminantes criterio; PM₁₀, O₃ y NO₂. Debido a que los sensores de O₃ y NO₂ registraban sus valores en ppb, en lugar de ppm, se realizaron conversiones de ambos contaminantes de tal manera que fueran comparables con las mediciones realizadas por las estaciones de la SEMADET. Para su conversión se dividió el dato de O₃ entre 1960 y el dato de concentración de NO₂ entre 1880.

A continuación, se muestran algunas de las gráficas más representativas para explicar los resultados obtenidos y su análisis correspondiente, el resto de las gráficas generadas se encuentran en el Anexo F. En las gráficas de dispersión, se presentan los datos obtenidos por el SIMAJ y los del sensor electrónico evaluado. Estas, nos permiten tener un primer

acercamiento al comportamiento de los datos e identificar si el valor registrado por el sensor de bajo costo se relaciona con los de la SEMADET.

En la Figura 43, se muestra la dispersión de los datos de PM_{10} en la comparación entre SIMAJ (color azul) y EcoMeasure (color crema). Lo que se observa es que los valores de concentración recolectados por EcoMeasure tienden a ser superiores a los de la estación Vallarta y cuentan con una mayor dispersión, generando a su vez más valores espurios.

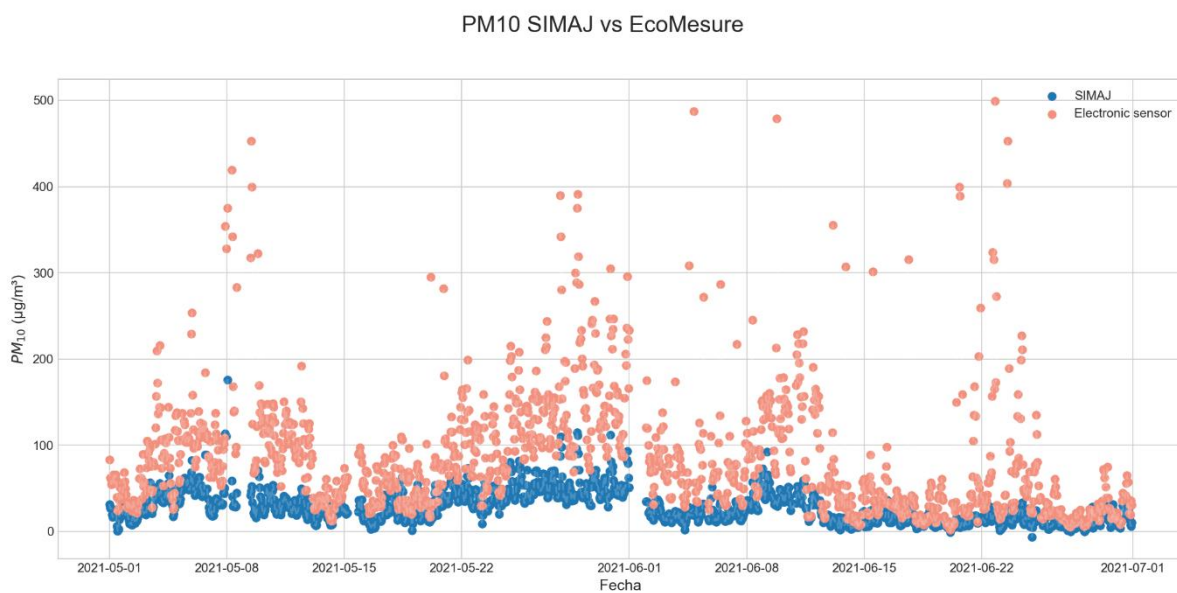


Figura 43. Dispersión de concentraciones de PM_{10} - EcoMeasure vs SIMAJ

Por otro lado, estas representaciones nos permitieron identificar la presencia de un sistema de control de los registros que, como se observa en la Figura 44 (contaminante NO_2 y sensor eLichens), afecta las mediciones obtenidas. Al igual que en la Figura 43, los datos color rosa/crema son del sensor de bajo costo y los azules del SIMAJ. En la gráfica se observa que el sensor registra el comportamiento tendencial en las concentraciones, pero no las concentraciones reales. En esta figura también se reconoce un punto de quiebre en la representatividad de los datos, identificada por un incremento en la oscilación de las

concentraciones. Tras una reunión con los promotores del equipo de medición, nos indicaron que esto corresponde a una actualización en software. Este aspecto corrobora la hipótesis del equipo de investigación, que consideraba que el propio sistema estaba impidiendo que las concentraciones se acercaran más a los valores reales.

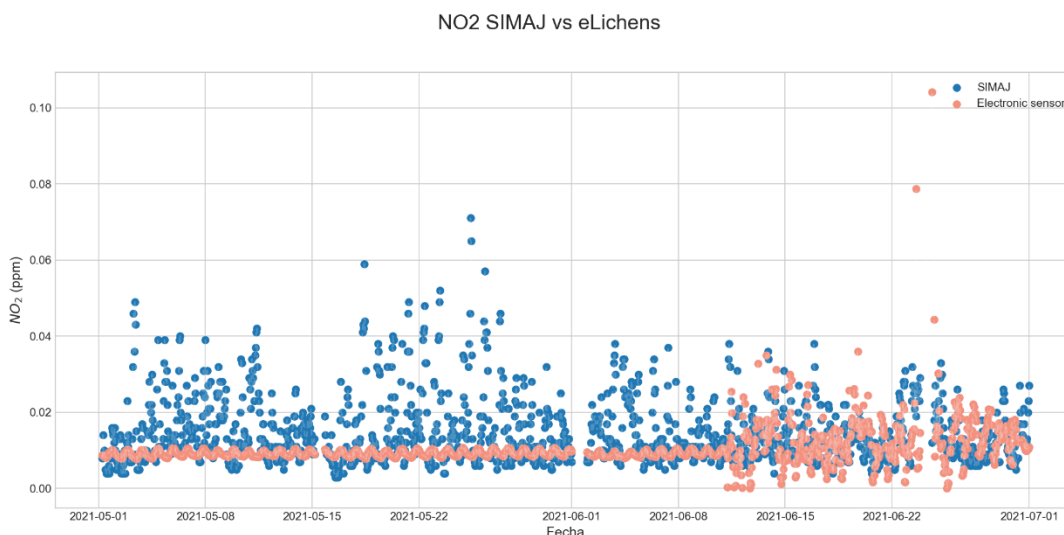


Figura 44. Dispersión de concentraciones de NO₂ - eLichens vs SIMAJ.

Aunadas a las gráficas de dispersión de concentraciones, se elaboraron gráficas para representar la función de densidad de probabilidades, de esta manera se puede visualizar de forma más clara lo que se muestra en las Figuras 43 y 44. En la Figura 45 observamos la distribución de probabilidad para EcoMeasure con PM₁₀ contra la del SIMAJ. Al igual que en la Figura 43, se mantienen los colores, con los sensores del SIMAJ en azul y el sensor de bajo costo se coloca en naranja.

PM10 - EcoMeasure

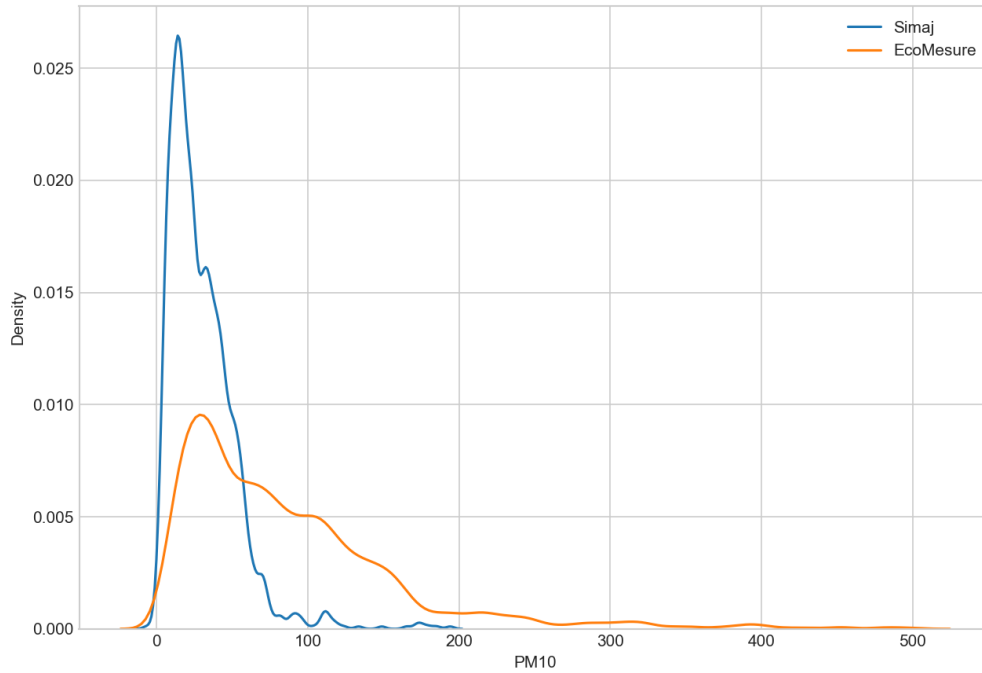


Figura 45. Función de distribución de probabilidad PM10 - EcoMeasure vs SIMAJ.

Al analizar los datos del SIMAJ, se observa una distribución más reducida y con bajas probabilidades de superar la concentración de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto se contrasta con los datos de EcoMeasure, que tienen una campana más extendida en la gráfica indicando que está registrando valores más altos que el sensor del SIMAJ, corroborando lo que se identificó en la Figura 43.

A su vez, en la Figura 46 podemos observar la función de distribución de probabilidad de eLichens de NO_2 . En esta se refuerza lo que se observaba en la Figura 44, el ajuste en los datos de concentración de dióxido de nitrógeno hace que la distribución de probabilidad se encuentre muy restringida en un rango muy bajo. Un aspecto relevante podría ser conseguir

más información sobre las concentraciones registradas por eLichens y por el sensor del SIMAJ después de la actualización del software para estudiar su nuevo desempeño.

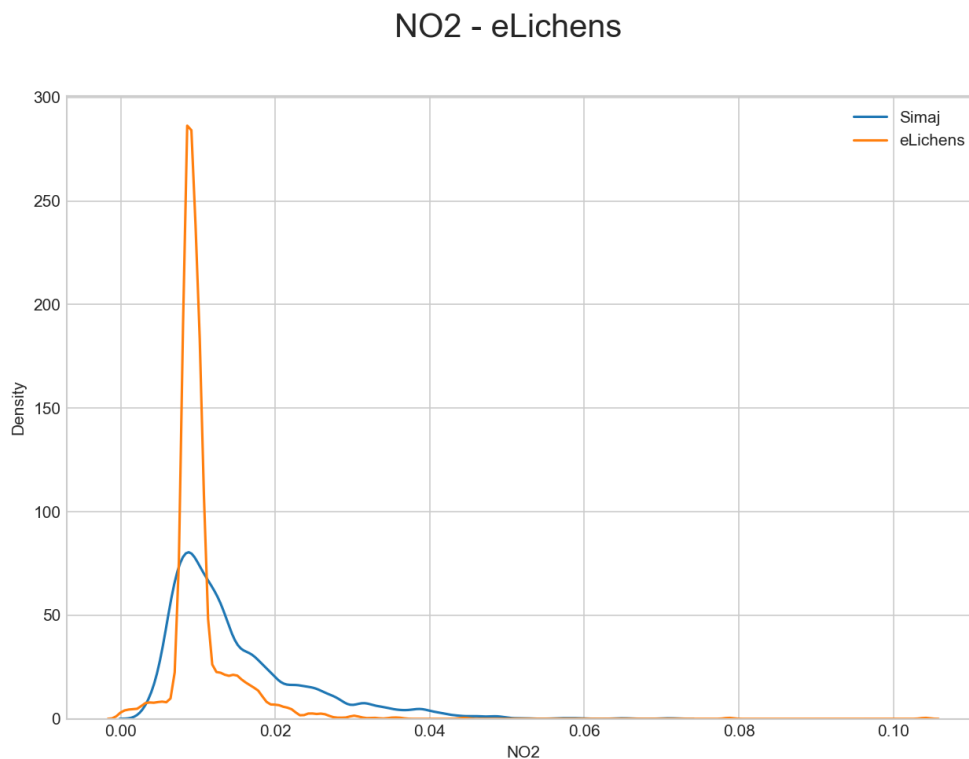


Figura 46. Función de distribución de probabilidad NO2 - eLichens vs SIMAJ.

Por su parte, las gráficas de residuales buscan identificar relaciones entre los factores ambientales (humedad relativa y temperatura) y la variación de los datos de concentración registrados. Esto es útil tanto para conocer si hay una variación causada por estos elementos como para establecer posibles rutas de mejora en la precisión de los registros. En las Figuras 47 y 48 se muestran dos de los análisis realizados. La Figura 47 representa la temperatura vs residuales (gráfica de la izquierda) y humedad relativa vs residuales (gráfica de la derecha) para eLichens y PM₁₀. Como se puede observar, la distribución horizontal indica que no hay

una relación fuerte entre las variables estudiadas, ya que el incremento de la temperatura o la humedad relativa no se relaciona con un incremento en los residuales.

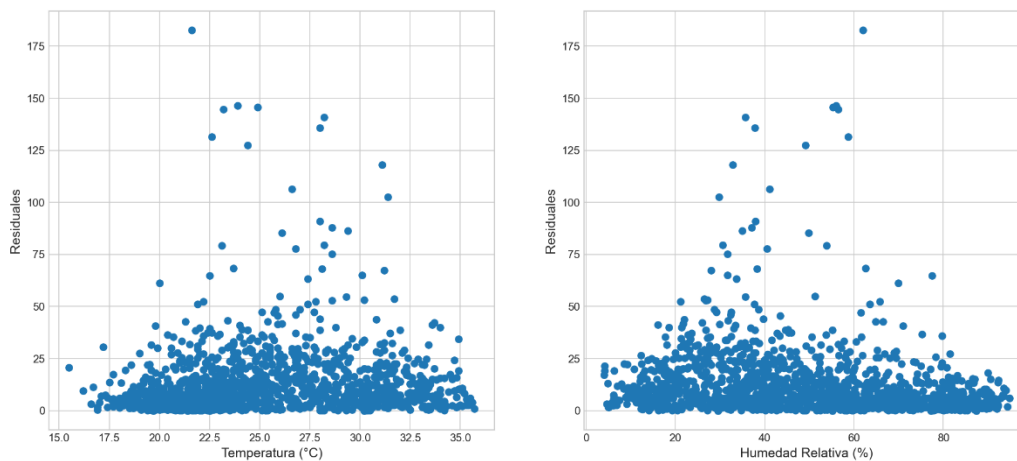


Figura 47. Residuales vs Temperatura (izquierda) y Residuales vs Humedad Relativa (derecha) para eLichens PM10.

Por otro lado, en la Figura 48 se puede observar la relación que existe entre los errores de las mediciones de concentración de NO_2 con EcoMeasure y el cambio en la temperatura y humedad relativa. Especialmente en la temperatura, se logra identificar como su incremento provoca un aumento en el error de la medición. Esto indica la necesidad de realizar calibraciones del dispositivo que integren los registros de las variables meteorológicas.

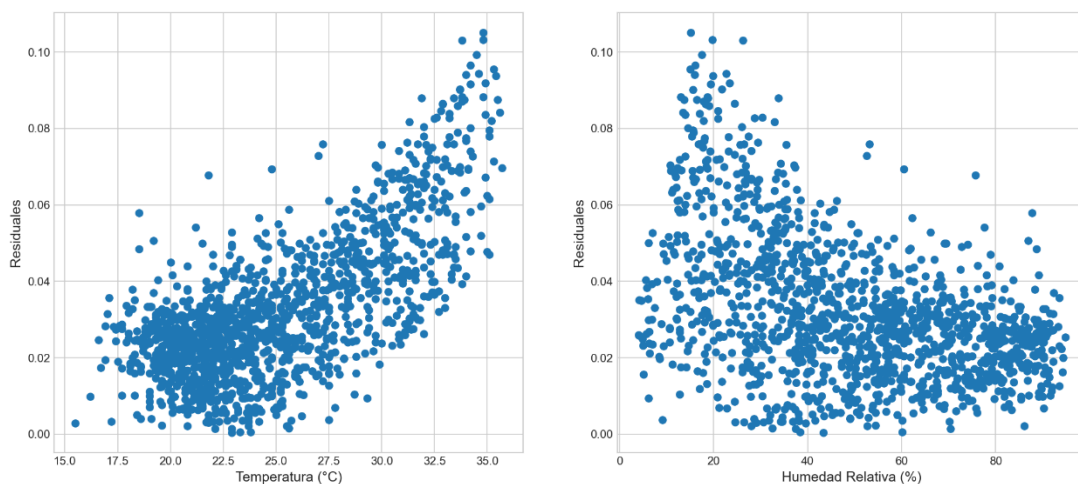


Figura 48. Residuales vs Temperatura (izquierda) y Residuales vs Humedad Relativa (derecha) para EcoMeasure NO2.

Además de las gráficas de residuales en las Figuras 47 y 48 se realizaron ANOVA de los residuales contra los datos de temperatura y humedad relativa. Buscando la representatividad de los datos, se hicieron 4 grupos para ambos casos, con los grupos de temperatura que aumentaban de 10 en 10°C y los de humedad relativa de 25 en 25%. Aunado a esto se tomaron 20 valores residuales aleatorios de cada grupo para realizar el ANOVA, los resultados que se muestran a continuación son los valores de p para el análisis de las medias (Tabla 16).

Tabla 16. Valor de p de ANOVA de promedio de residuales vs categorías meteorológicas

Equipo	NO ₂ - RH	NO ₂ - Temp	O ₃ -RH	O ₃ -Temp	PM ₁₀ -RH	PM ₁₀ -Temp
EcoMeasure	0.001	0.000	0.000	0.000	0.405	0.007
eLichens	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.143

Con estos resultados se logra observar que, para la mayoría de los contaminantes, especialmente los gases, se genera un impacto por los cambios en las condiciones atmosféricas (con resultados de p menores a 0.05), resaltando la importancia de su calibración. Por otro lado, es de destacar los resultados de PM₁₀ con Humedad Relativa para eLichens y Temperatura con EcoMeasure, ya que los resultados no concuerdan con lo que se

observan en sus respectivas gráficas de residuales. Se asume que la variación se produce por la selección aleatoria de los residuales y no porque representen un impacto en las mediciones. Estos resultados resaltan la importancia de utilizar tanto métodos gráficos como estadísticos para analizar las variaciones.

Tanto por el análisis de normalidad de las variables meteorológicas como por el ANOVA realizado, se determina que es importante buscar la distribución y representatividad de las condiciones meteorológicas al realizar la evaluación de un sensor. Para la presente investigación esto se logró obteniendo valores suficientes para realizar el ANOVA de las variables meteorológicas para los grupos propuestos. Únicamente no se obtuvieron resultados para el grupo de 0 a 10°C en temperatura. Sin embargo, a pesar de esta ausencia, con el análisis de los grupos con datos se determinó que sí hay un impacto de estos parámetros sobre los resultados. De acuerdo con los estadísticos obtenidos, únicamente se podrían impactar los resultados para eLichens en PM₁₀, por lo que sería relevante evaluarlo.

Por otro lado, previamente se describieron los estadísticos a utilizar y sus ecuaciones. Estos nos sirven para evaluar el desempeño desde una perspectiva multidimensional (Tabla 17). Para empezar, el Coeficiente de Correlación de Pearson nos indica la relación lineal que hay entre los datos de los sensores de bajo costo y del SIMAJ. La correlación más fuerte se observa en los sensores EcoMeasure de PM₁₀ y O₃, mientras que las más bajas se observan para ambas marcas en NO₂, donde indica que no hay relación entre los datos registrados por los sensores y los del SIMAJ. En cada caso esta variación puede tener un origen distinto. Se considera que con EcoMeasure, la variación en NO₂ sucede por el impacto que tienen condiciones ambientales que se observaron en la Figura 48. Por su parte, con eLichens, se

asume que el resultado se debe a las restricciones del software en el registro de los datos que se observó en la Figura 46.

Tabla 17. Estadísticas de desempeño de los sensores de bajo costo.

Sensor	Coefficiente de correlación de Pearson	RMSE	Índice de aceptación	Promedio de mediciones SIMAJ	Promedio de residuales	Desviación estándar de residuales
ecomasure – PM ₁₀	0.675	81.01	0.39	28.66	-55.427	59.101
eLichens – PM ₁₀	0.51	20.974	0.644	30.214	7.983	19.403
ecomasure – O ₃	0.891	0.021	0.816	0.03	-0.012	0.016
Elichens – O ₃	0.321	0.026	0.555	0.03	-0.003	0.026
ecomasure – NO ₂	-0.006	0.037	0.235	0.015	-0.032	0.019
Elichens – NO ₂	-0.036	0.011	0.36	0.015	0.004	0.01

Aunque el Coeficiente de Correlación de Pearson es mayor para los sensores EcoMeasure es posible observar que los valores del RMSE son 4 veces más grandes para PM₁₀ en comparación con eLichens. Este mismo aspecto que se corrobora en el promedio de residuales y su desviación estándar. Esto quiere decir que, aunque las concentraciones no tengan una relación lineal tan fuerte como la que se observa con EcoMeasure, su variación es menor en comparación con los datos reales.

En la Figura 43 y 45 se mostró que los valores de concentración de PM₁₀ para EcoMeasure se encuentran constantemente por encima de los datos reales, lo que contribuye a que su Índice de Aceptación se vea penalizado y que su promedio de residuales y desviación estándar de residuales también sean mayores, a los de eLichens. En el caso de este último, también se estima que los estadísticos de dispersión son menores debido a que, con este sensor, también se identificó la presencia de un método de reducción de oscilación en los registros de concentración de PM₁₀, aunque no tan pronunciada como en NO₂.

La dispersión en las concentraciones de los contaminantes por parte de EcoMeasure es algo que se puede observar en los 3 parámetros analizados. Esto indica que es necesario realizar ajustes que se adapten a los sitios de monitoreo de forma más precisa. Por otro lado, aunque esta dispersión es menor en los sensores de eLichens, esto se debe al procesamiento posterior que reciben los datos y que también impactan su representatividad.

A pesar de que en la presente investigación no se logró desarrollar la metodología propuesta de forma precisa, la adaptación de esta logró obtener resultados satisfactorios de análisis y suficientemente robustos para evaluar el desempeño de los sensores desde una perspectiva multidimensional. Una de las conclusiones más relevantes que se generaron es que, para todos los sensores, es necesario tomar acciones de calibración en sitio para que los valores de concentración registrados logren representar de forma más certera los datos reales. Además, se destaca la importancia de llevar a cabo procesos de evaluación de sensores de bajo costo previo a su colocación en la ciudad, tanto para realizar las calibraciones correspondientes como para determinar su variación y utilizar este conocimiento cuando se pretenda analizar los valores que registran.

5.3.2. Determinación de la confiabilidad del sistema

El resultado de la determinación de la confiabilidad del sistema de medición con sensores de bajo costo es la metodología que se presentó en la sección 3.3.2. Esto se debe a que en el transcurso de la investigación no se contó con el tiempo suficiente para poner a prueba el método propuesto y lograr realizar los cálculos de confiabilidad de los equipos. Por este motivo se hace referencia a la metodología para determinar la confiabilidad de los sensores

como una recomendación y un aspecto deseable a estudiar por la SEMADET o en trabajos posteriores.

5.4. Evaluación de la estrategia de impulso a la movilidad no motorizada: MiBici

En las secciones 5.4.1. a 5.4.5. se presentan los resultados del método seguido para determinar el impacto de la estrategia MiBici. Esta va desde la selección de la resolución espacial y la definición del área de estudio hasta la construcción de los indicadores de exposición, concentración, de impacto. Además, se presentan sus respectivos tratamientos de datos e interpretaciones de resultados.

5.4.1. Definición del área de estudio y resolución espacial

La propuesta del área de estudio fue realizada por la estudiante de la Maestría de Ingeniería de Procesos que se encuentra desarrollando el Modelo de dispersión (Figura 22). En la Figura 49 se muestra el área de estudio en un contexto municipal. Se logra identificar que se encuentra en la zona centro de Guadalajara, y que se encuentra bordeada por la estación de monitoreo Centro (a la derecha) y dentro del área de influencia de la estación Vallarta (a la izquierda). Por su parte, hacia el Norte se tiene la estación Atemajac. Estas estaciones, incluyendo al sur Tlaquepaque y Águilas, se utilizaron para construir la superficie de máximos mensuales, más adelante.

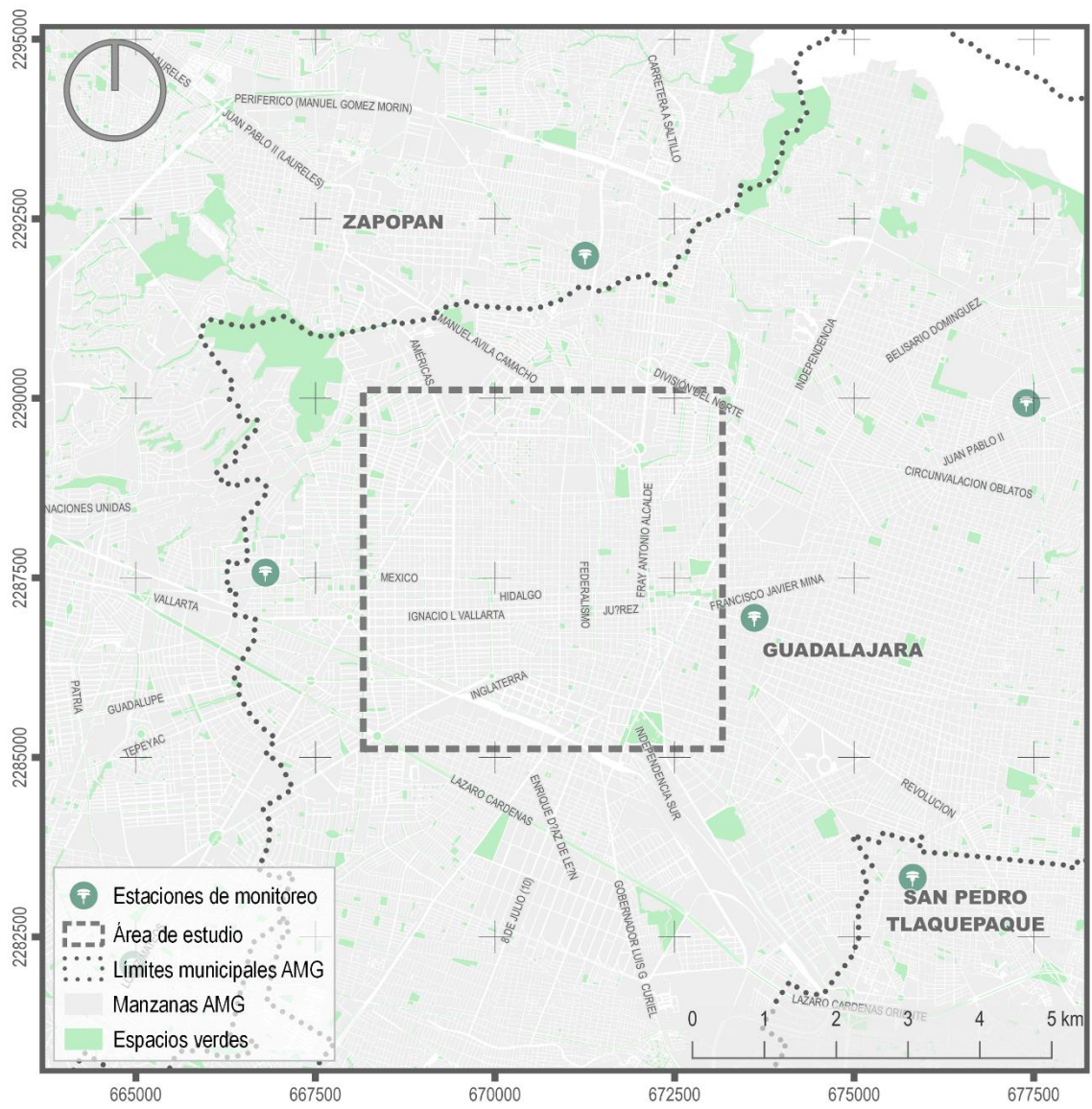


Figura 49. Área de estudio dentro del contexto municipal.

Como se mencionó en la metodología, el área de estudio se reconstruyó con hexágonos de H3 de Uber. En la Figura 50, se muestra a la izquierda el área de estudio y a la derecha, los hexágonos de resolución 8 utilizados para reconstruir el área. Se identifica que, por las geometrías de los hexágonos, hay secciones dentro del área de estudio original que quedan fuera y otras secciones de la ciudad que se integran al estudio.

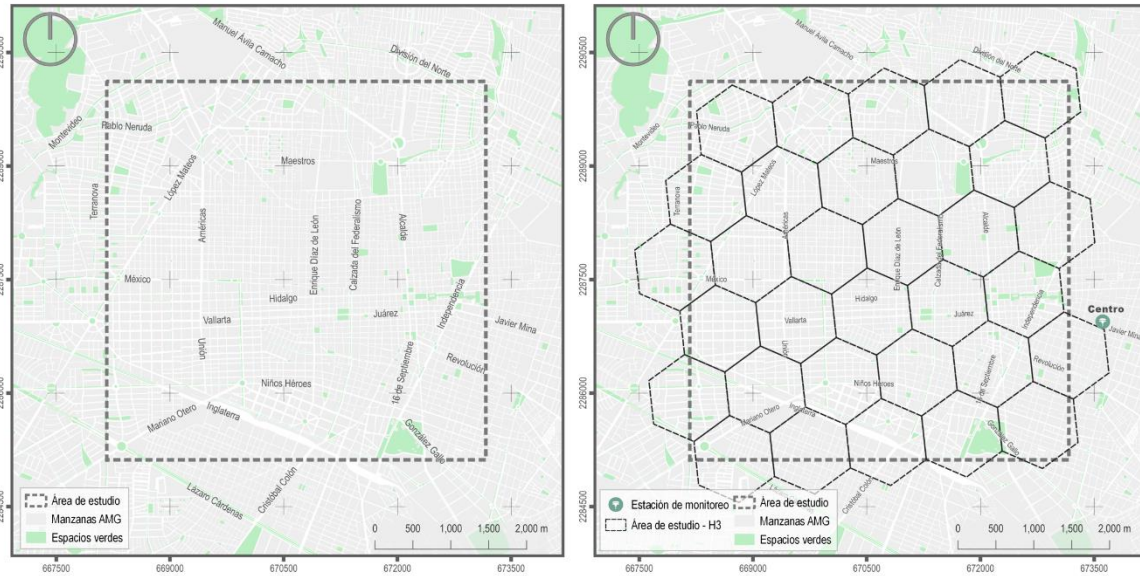


Figura 50. Reconstrucción del área de estudio (izquierda) con hexágonos de H3 de Uber de resolución 8 (derecha).

El resultado del área de estudio se presenta en la Figura 51, en conjunto con las manzanas que se consideran dentro de esta (y que se utilizaron para calcular las densidades), espacios públicos en el área y las vialidades principales que cruzan el entorno. A partir de estos hexágonos se calcularon las densidades de población, de personas ocupadas y de viajes y se generaron los hexágonos de resolución 9 para modelar las emisiones con AERMOD.

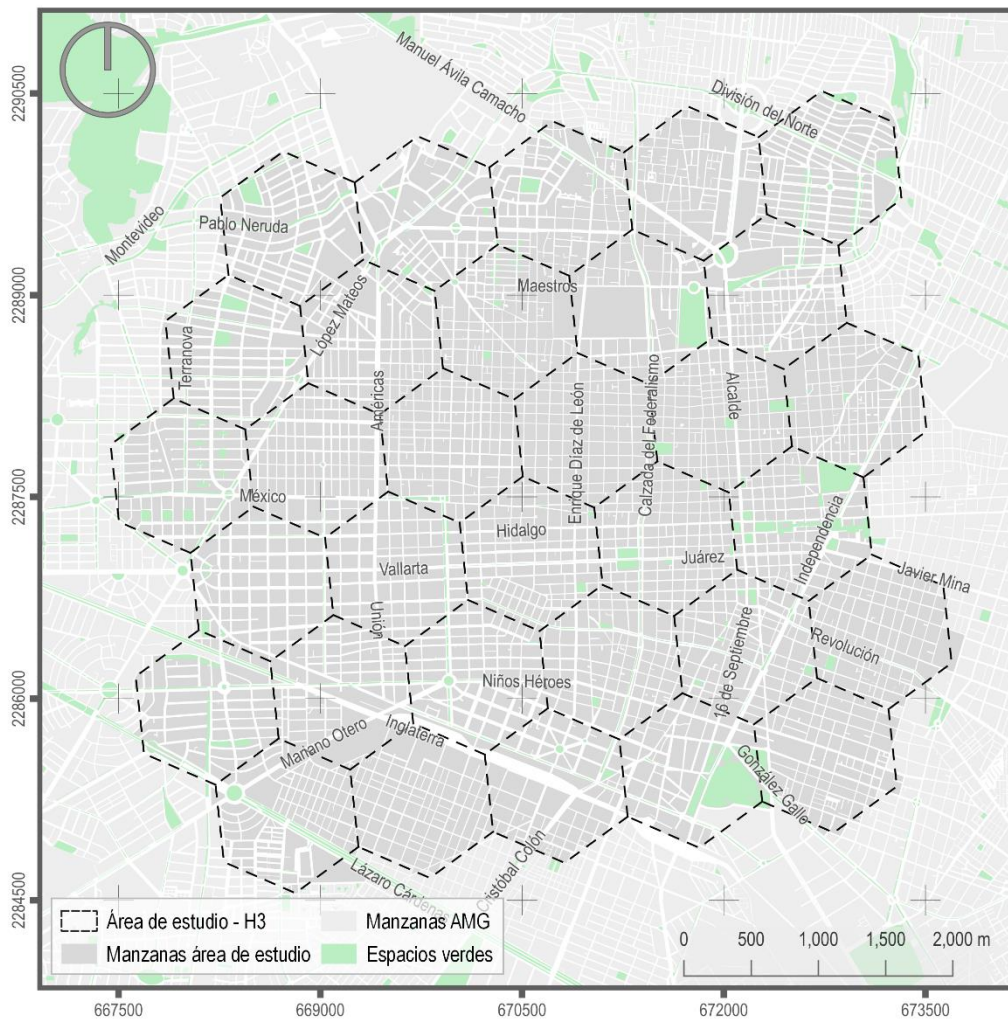


Figura 51. Área de estudio y manzanas consideradas dentro del área.

5.4.2. Insumos para la modelación de emisiones con AERMOD

Con la librería de H3 de Uber se redujo la resolución de hexágonos, de 8 (que se utilizó para el área de estudio y el cálculo de las variables sociodemográficas) a 9, que divide con mayor detalle el territorio. En la Figura 52, se representan los hexágonos de resolución 9 y sus centroides correspondientes. Estos puntos se compartieron con la estudiante de la Maestría en Ingeniería de Procesos para el uso de AERMOD y la obtención de máximos mensuales.

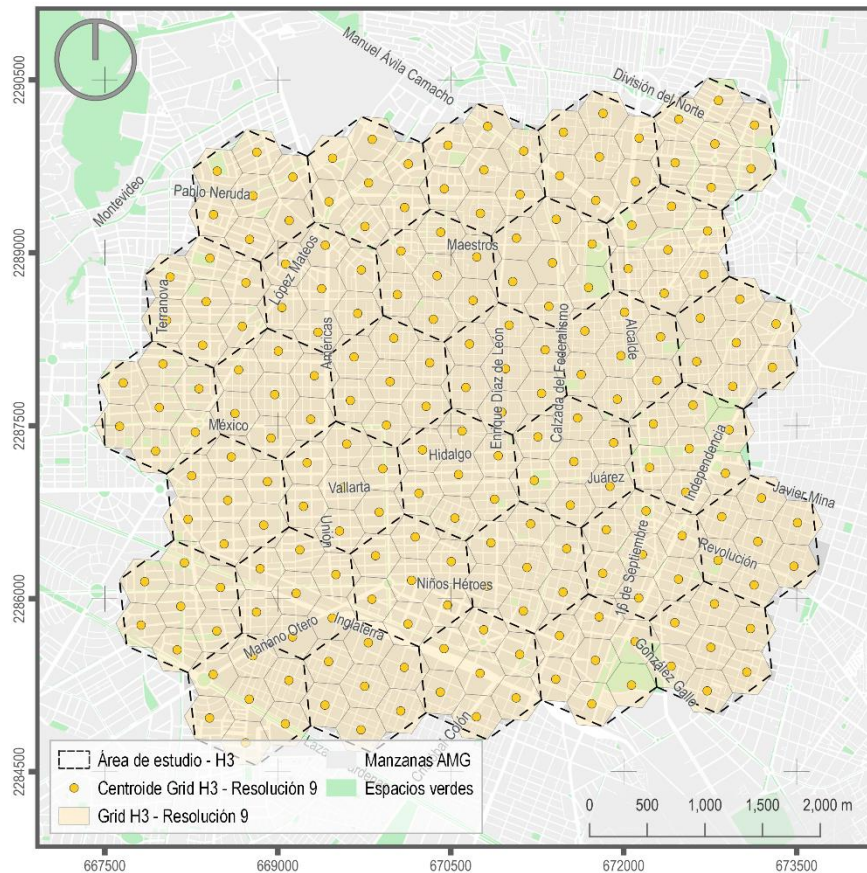


Figura 52. Hexágonos de resolución 9 en el área de estudio.

Por otro lado, y de acuerdo con lo que se definió con el equipo de investigación, se repitió la metodología de agrupación por mes para generar los promedios máximos mensuales. En las Figuras 53 y 54 se muestran ejemplos de los promedios máximos mensuales generados por estación. El resto de los resultados se muestran en los Anexos (Anexo G). Estos datos se compartieron con la estudiante encargada de elaborar la modelación de las emisiones para reconstruir la superficie de dispersión utilizando el método de interpolación IDW (Figura 55) y comparar sus resultados.

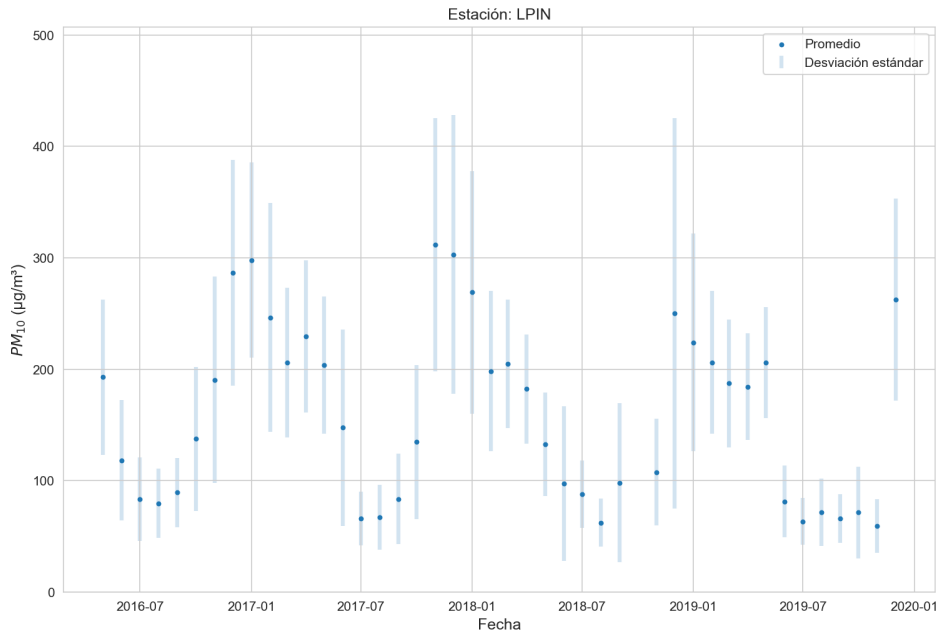


Figura 53. Gráfica de promedios máximos mensuales para la estación Las Pintas.

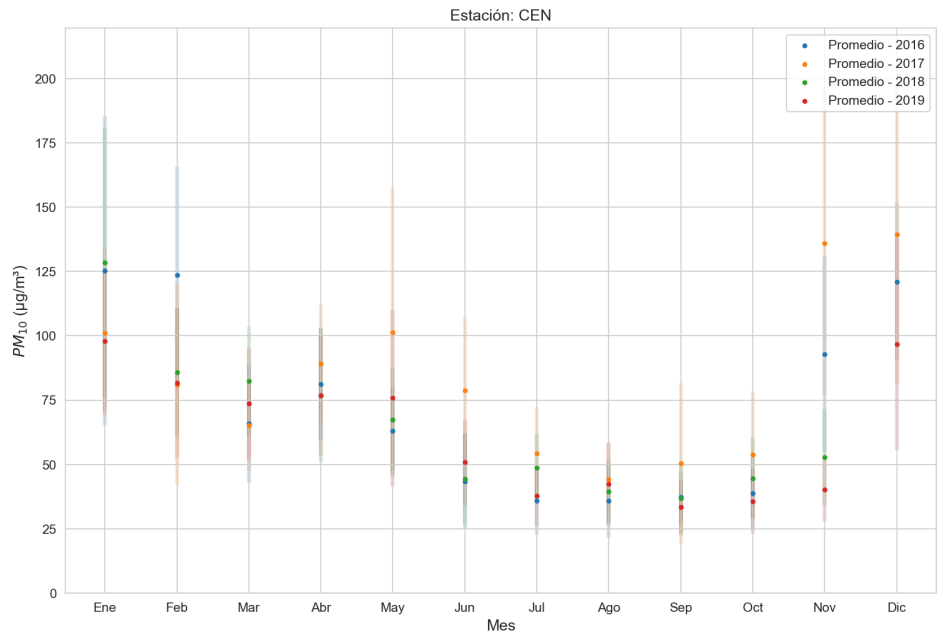


Figura 54. Gráfica de promedios máximos mensuales para la estación Centro con comparativa por año.

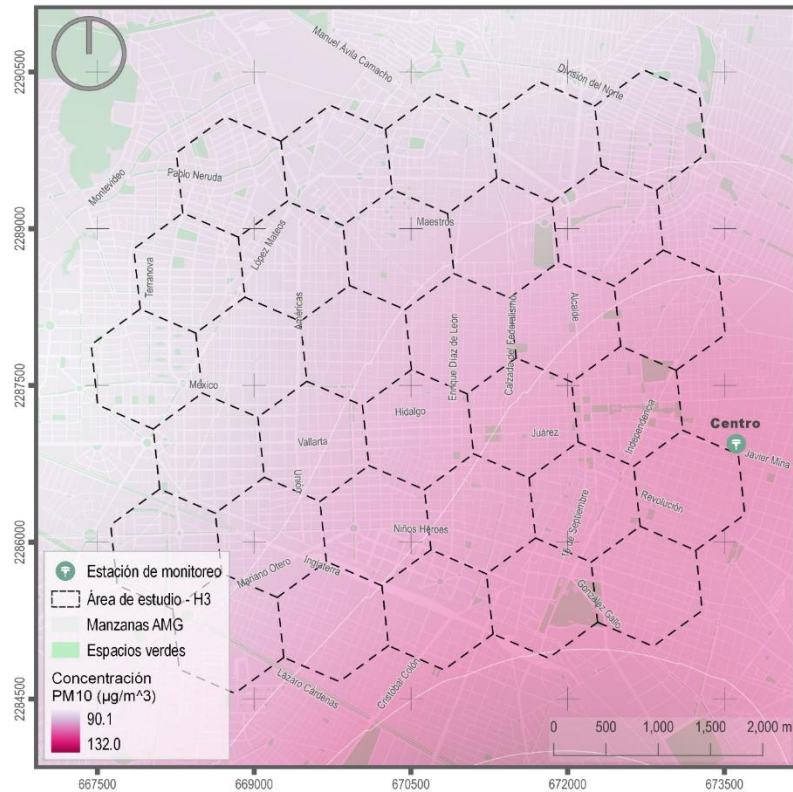


Figura 55. Interpolación de promedios máximos mensuales con IDW¹.

5.4.3. Indicador de exposición

El indicador de exposición se construyó a partir de las densidades de población (Figura 56), la densidad de personas ocupadas (Figura 57) y la densidad de viajes (Figura 58). Al observar estas figuras se puede observar que existe una relación inversa entre las densidades de población y de personas ocupadas. Por lo que, cuando se tienen altos valores de una la densidad de la otra variable se reduce. Además, los mapas parecen representar agrupaciones de estas variables, con la sección norte del área de estudio con una mayor población y la zona sur con mayor densidad de empleos.

¹ Como contexto, el límite establecido por la NOM-025-SSA1-2014 para promedios de 24 horas es de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

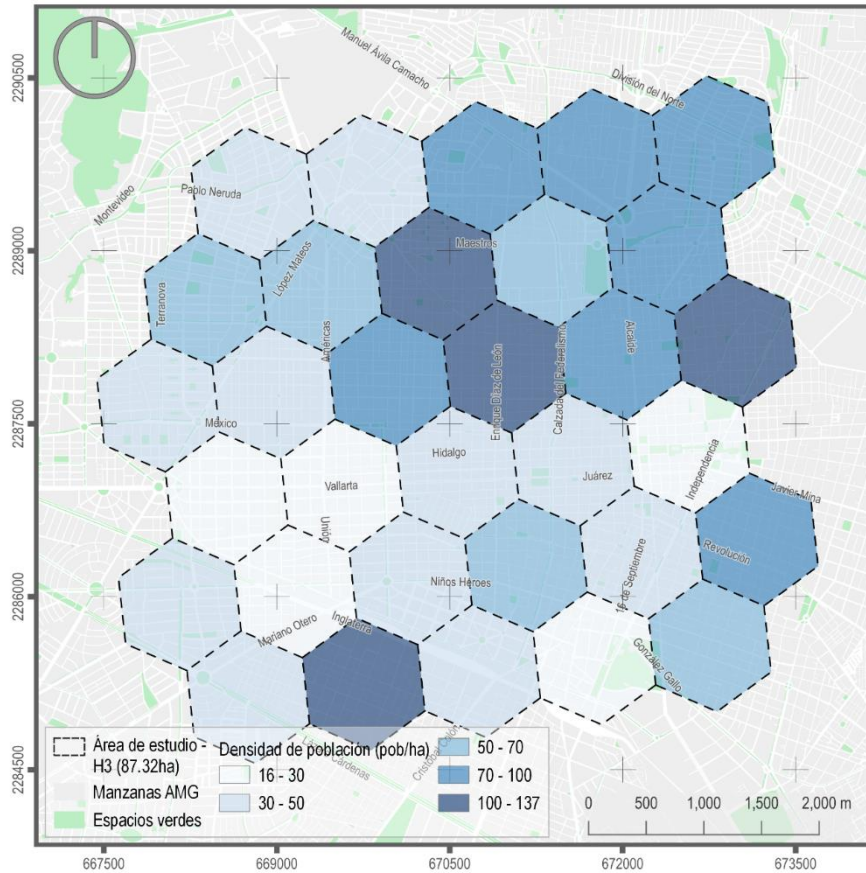


Figura 56. Densidad de población en el polígono de estudio.

Otro aspecto que se puede resaltar de las tres variables es que el orden de magnitud obtenido es similar entre ellas. Aunque no representen lo mismo, el hecho de que sus valores se encuentren en un rango similar facilita su comparación. Es importante recordar que lo que se busca es identificar la población que puede estar expuesta a la contaminación atmosférica en un día promedio, sin hacer distinciones entre las características de dicha población.

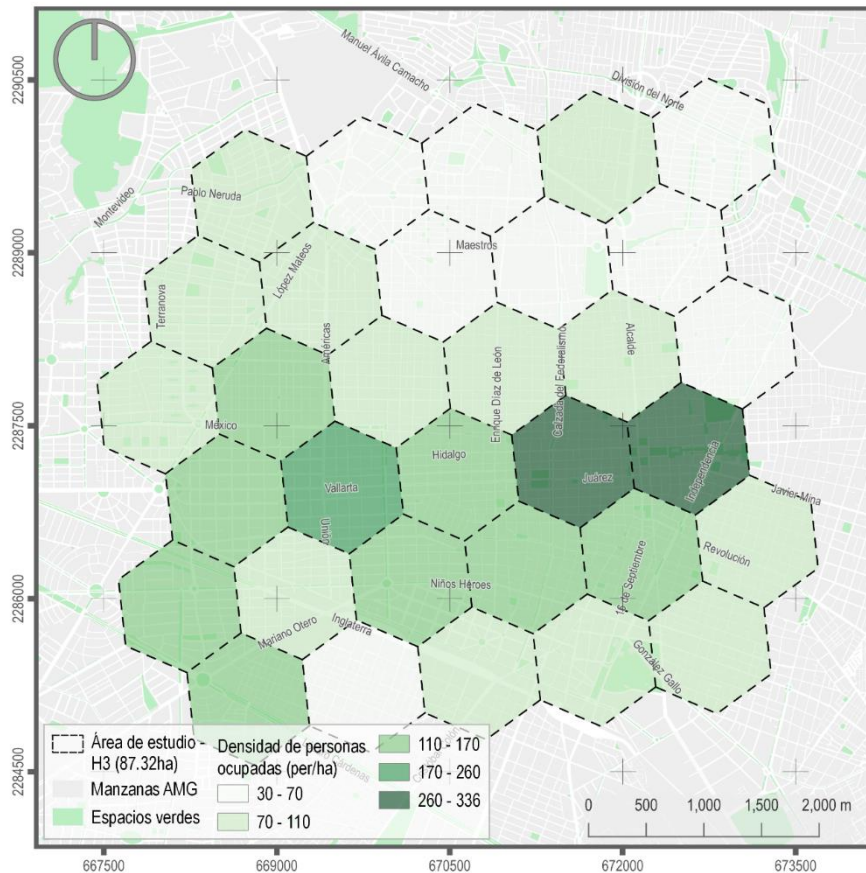


Figura 57. Densidad de personas ocupadas en el polígono de estudio.

A la vez, al analizar la densidad de viajes en la Figura 58 se logra observar que los hexágonos con mayores densidades también siguen una tendencia, relacionada con las vialidades principales, que es de esperarse. En los sitios con estaciones de transporte público masivo (Tren Eléctrico y Macrobús) se cuenta con el volumen más alto de viajes. De nuevo, al realizar el tratamiento de los datos el grupo de investigación esperaba encontrar estas tendencias en el territorio. A su vez, se logra observar que, aunque avenida Vallarta no tenga paradas de transporte público masivo, esta cuenta con un volumen elevado de viajes, debido a que se trata de una vialidad principal desde una perspectiva metropolitana.

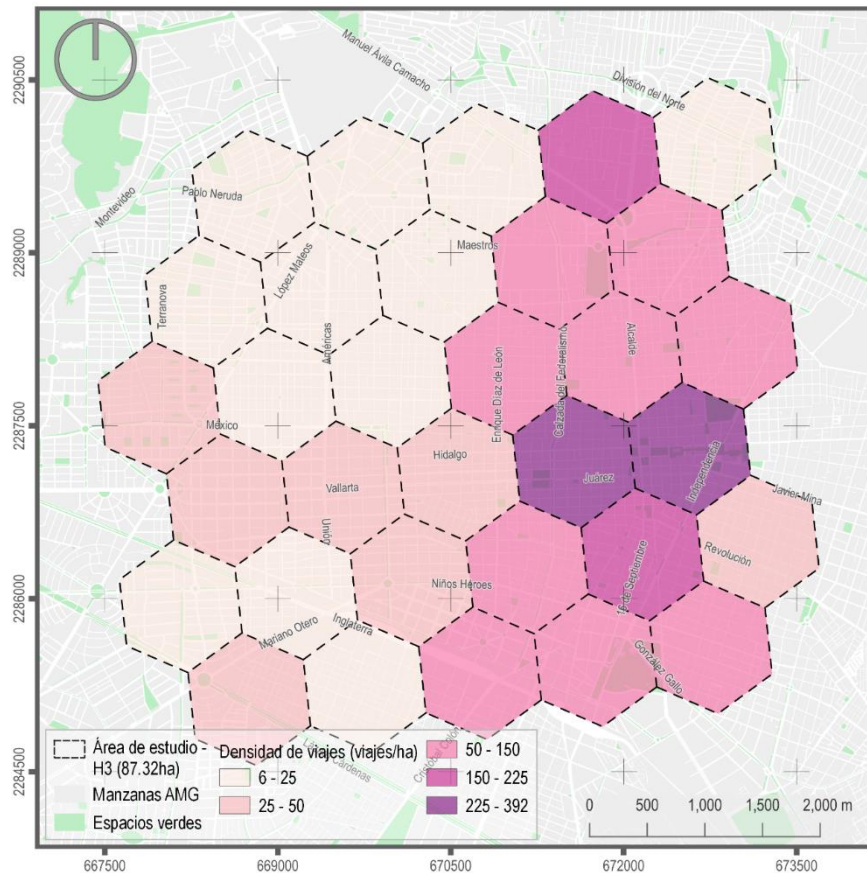


Figura 58. Densidad de viajes en el polígono de estudio.

A su vez, se logra resaltar que tanto para la densidad de personas ocupadas, como para la densidad de viajes los puntos de mayor concentración corresponden a la zona cercana a San Juan de Dios, un espacio con un alto volumen de comercios y en el que convergen diversas rutas de transporte público y transporte masivo. El conocimiento sobre el territorio y las dinámicas existentes se utilizó para validar los resultados obtenidos en el mapa y buscar posibles inconsistencias, más aún, durante el proceso de estimación de densidad de viajes que involucró un mayor tratamiento de datos que las otras variables.

Como se describió en la metodología, las tres variables se estandarizaron restando su media y dividiendo entre su desviación estándar. Esto generó un rango de datos positivos y negativos, que se interpreta como el nivel de exposición esperado. El resultado de esta suma

se graficó (Figura 59) para observar sus tendencias e identificar las agrupaciones que se generaron en los datos. En búsqueda de que los grupos fueran de tamaño similar, se crearon 3 niveles de exposición.

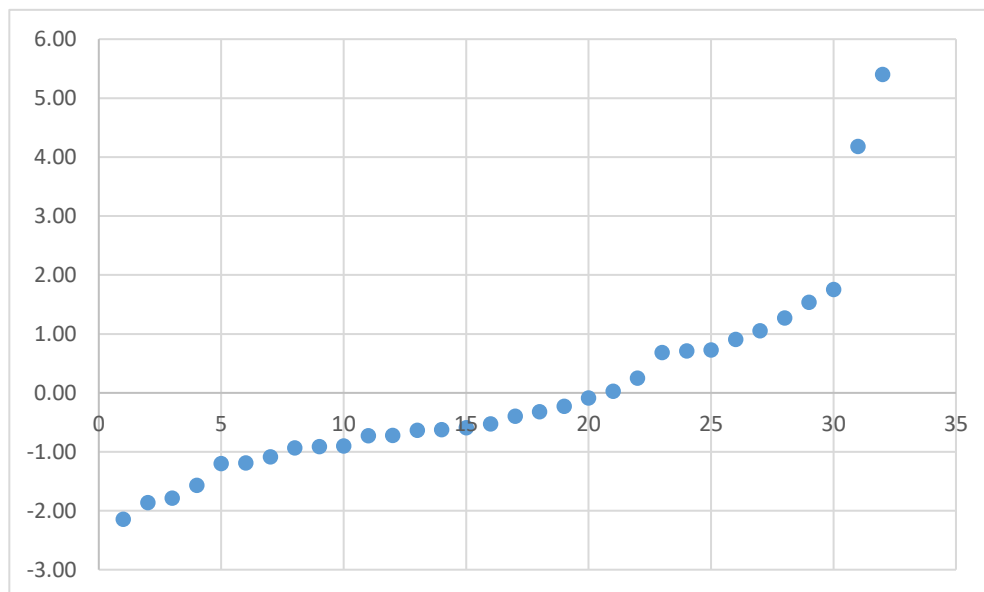


Figura 59. Distribución de la suma de las variables de exposición.

La gráfica (Figura 59) muestra un contador para los hexágonos en el eje de las x, y el valor del indicador en el eje de las y. En la Tabla 18 se muestran los resultados de la agrupación propuesta. Como ya se había descrito, por el tipo de estandarización se generan valores negativos. Para la propuesta se tienen 10 hexágonos en nivel bajo, 12 en nivel medio y 10 en nivel Alto. En el nivel medio se pasa de los valores negativos a los positivos, por el método de la suma esta sección representa hexágonos que tienen valores altos de una sola variable o con valores cercanos a la media de sus variables específicas.

Tabla 18. Clasificación del indicador de exposición por valor de suma.

Nivel de exposición: Alto	Nivel de exposición: Medio	Nivel de exposición: Bajo
0.68	-0.73	-2.15
0.71	-0.72	-1.86
0.73	-0.64	-1.79
0.90	-0.62	-1.57
1.05	-0.59	-1.20
1.27	-0.53	-1.19
1.53	-0.40	-1.09
1.75	-0.32	-0.94
4.18	-0.23	-0.92
5.40	-0.09	-0.90
	0.03	
	0.25	

Por otro lado, en los valores altos se deben de tener dos variables con resultados elevados, esto es importante por la dinámica que se describió previamente entre la densidad de población y densidad de personas ocupadas. Se espera que un valor elevado de alguna de estas se encuentre acompañado de un dato negativo de la otra. Por lo tanto, si esto se complementa con altos valores de densidad de viajes se coloca en el nivel de exposición alto.

Todo lo que se mostró y describió en la Figura 59 y Tabla 18 se representa de forma territorializada en la Figura 60. Los sitios con altas densidad de población y viajes se encuentran en la categoría Alta y lo mismo sucede con la densidad de personas ocupadas y viajes. A la vez, se identificaron polígonos con densidades de población elevadas, pero con valores bajos de densidad de personas ocupadas y densidad de viajes que se encuentran en un nivel Medio de exposición.

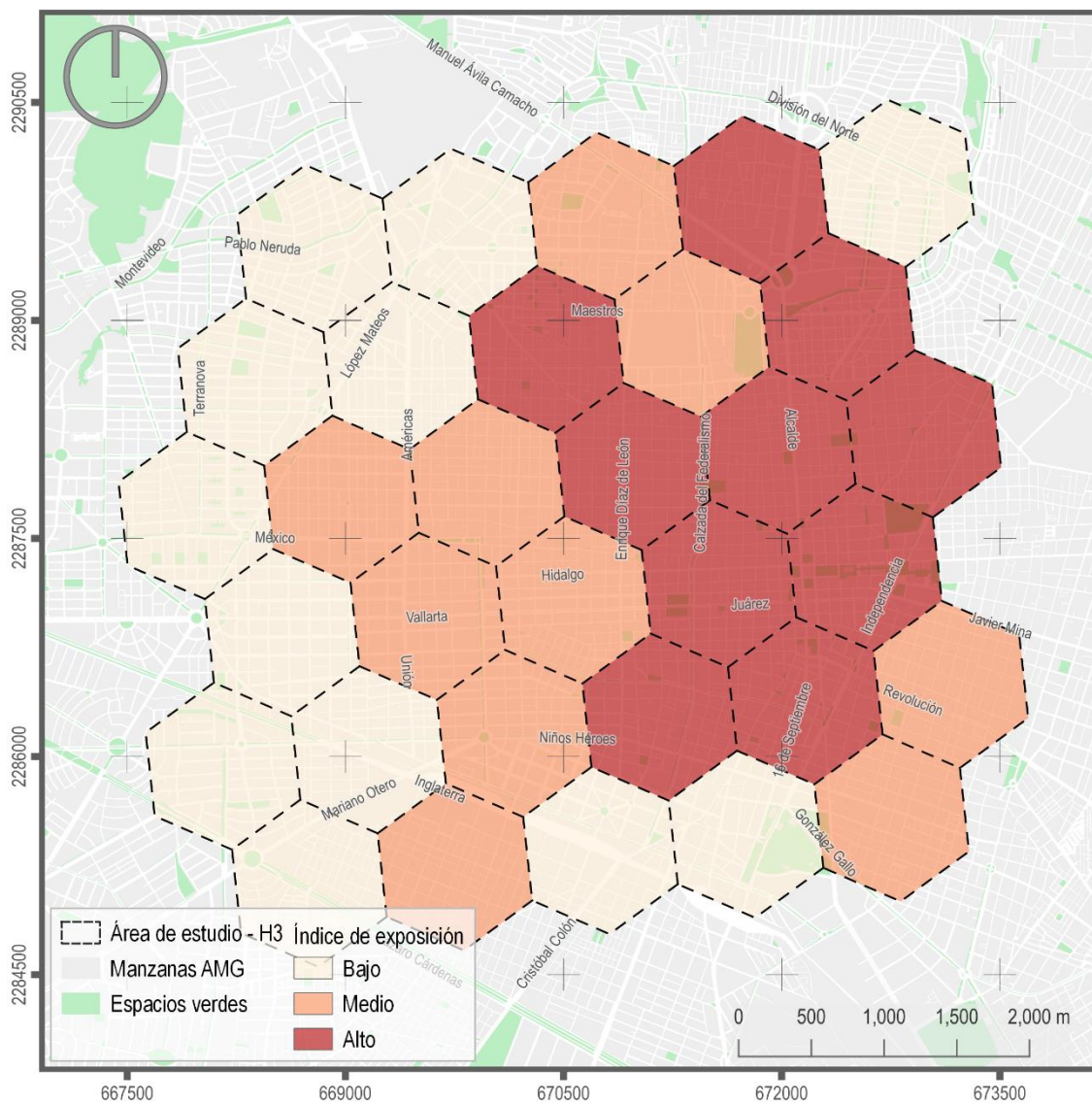


Figura 60. Indicador de exposición.

5.4.4. Indicador de concentración

Para construir el modelo de dispersión de PM_{10} , la estudiante de la Maestría en Ingeniería de Procesos estimó el promedio de las concentraciones máximas mensuales utilizando el software AERMOD, las condiciones meteorológicas para las fechas de análisis y las estimaciones del volumen de transporte motorizado en las vialidades. Estas estimaciones se hicieron para los centroides de los hexágonos de H3 de Uber de resolución 9. En la Figura

61 se muestran los resultados de la simulación clasificados por el nivel del indicador de concentración.

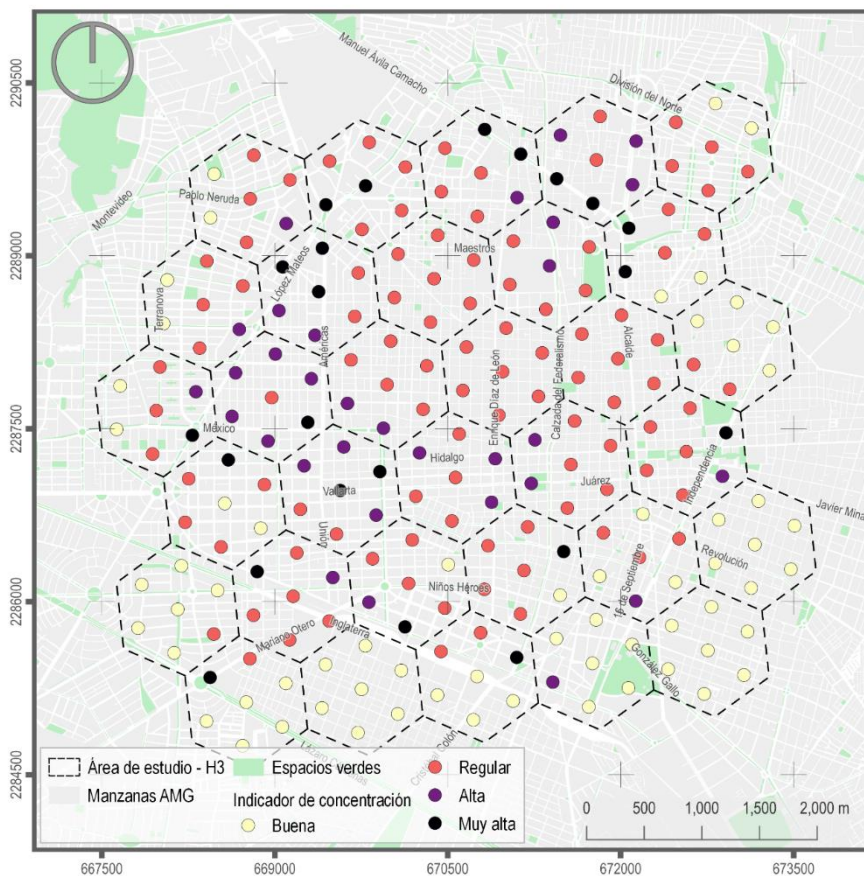


Figura 61. Indicador de concentración por centroide – enero 2015.

En la Tabla 19 se muestran los quiebres de las categorías de acuerdo con la concentración normalizada. Los nombres de las categorías se eligieron de acuerdo con las categorías del IMECA. Para los valores normalizados se hizo el quiebre en 0.3, la categoría Regular representa concentraciones entre 25 y $40\mu\text{g}/\text{m}^3$. Aunque este valor es menor que el de la categoría de regular para el IMECA ($40\mu\text{g}/\text{m}^3$) se consideró apropiada su división ya que se tratan de concentraciones máximas promedios mensuales, por lo que no es la exposición en una temporalidad corta ni se trata de un promedio de ventana móvil de 24 horas, como marca la NOM. El hecho de que se trate de periodos de exposición mensuales

resulta relevante para la reducción de las concentraciones que se pueden considerar dañinas, ya que la exposición prolongada puede producir mayores problemas a largo plazo que exposiciones agudas.

Código de colores	Indicador de concentración	Categoría
	0.0 – 0.3	Buena
	0.3 – 0.6	Regular
	0.6 – 1.0	Alta
	1.0 >	Muy Alta

Por último, las concentraciones de 40 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ corresponden a la categoría Alta y los valores mayores a 1, que de acuerdo con el método de cálculo son datos que superan la norma, se colocan en la categoría Muy alta.

Aunque los valores extraídos de AERMOD tenían una mayor resolución, se realizaron agrupaciones espaciales calculando el promedio por hexágono de tal forma que se pudiera relacionar de forma sencilla el indicador de concentración con el indicador de exposición. En la Figura 62, se muestra en resultado de esta agrupación en el territorio. Con el equipo de investigación se analizaron los resultados puntuales de las concentraciones en la Figura 61 y se compararon con los valores agrupados en la Figura 62 para tratar de identificar comportamientos no esperados.

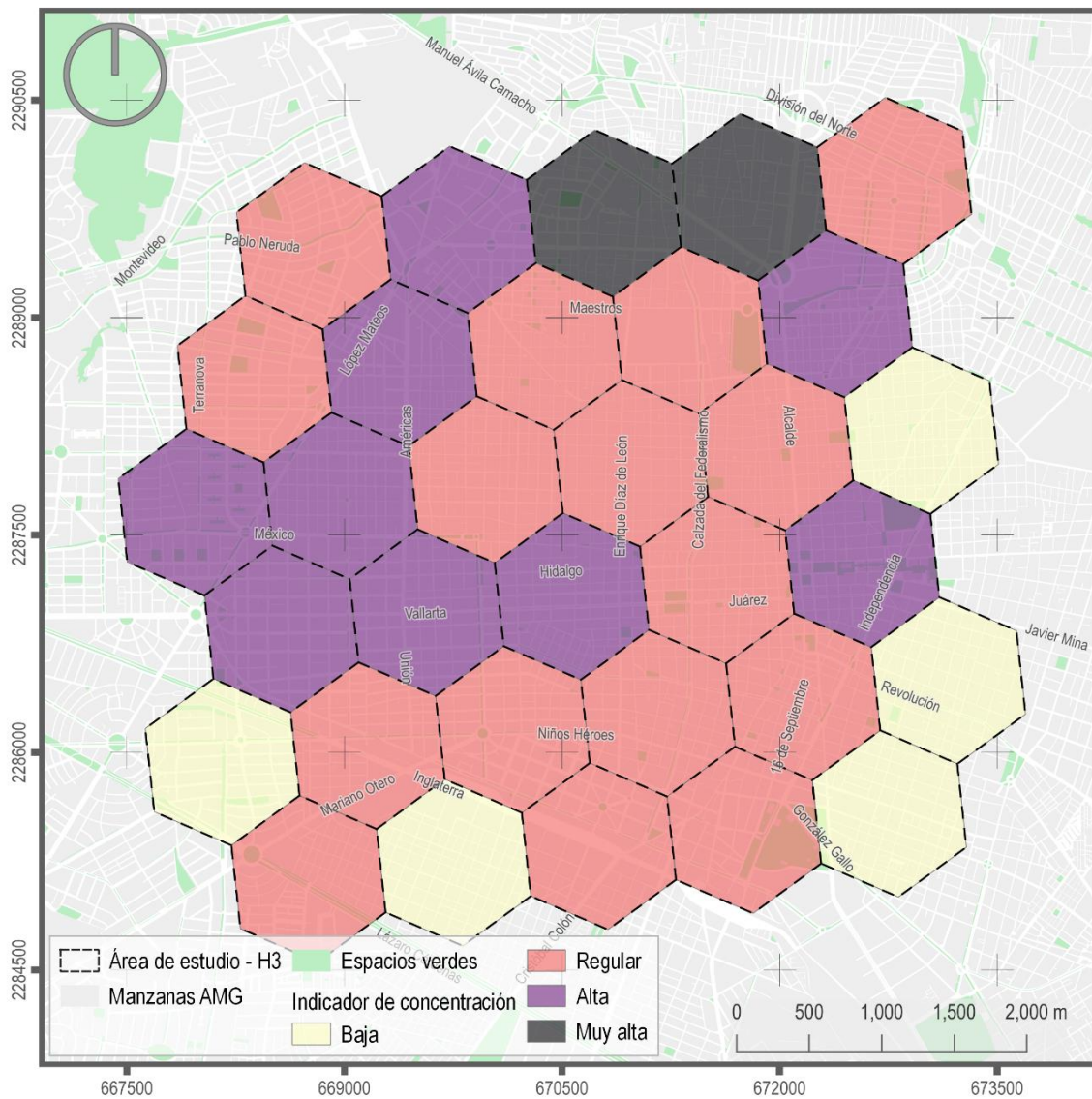


Figura 62. Indicador de concentración agrupados – enero 2015.

Tanto en los valores de concentración puntuales como en los agrupados por hexágonos se observa que los valores más altos se encuentran cercanos a vialidades principales. A su vez, al realizar la comparación entre los resultados de enero y mayo (Anexo H) se identifica el cambio estacional y la reducción de concentración que también se registra en las estaciones de monitoreo (Figura 53 y Figura 54).

Tras calcular los promedios por hexágonos de resolución 8 se observó que estos reflejaban la dinámica de los puntos de concentración que caían dentro y se consideraron adecuados para realizar el cruce con el indicador de exposición y para calcular el indicador de impacto. Aunque en esta sección solo se haya mostrado un ejemplo, este proceso se repitió para las temporalidades enero y mayo 2015 y enero y mayo 2019, con el objetivo de realizar comparaciones territorializadas.

5.4.5. Indicador de impacto

A partir de los resultados de la agrupación de concentraciones normalizadas de PM₁₀ por hexágonos y de los resultados del indicador de exposición se calculó el indicador de impacto. Como se mencionó previamente, este indicador no puede ser evaluado por sí solo para determinar el impacto, sino que tiene que ser en la comparación de dos escenarios, en este caso, con y sin la aplicación de una estrategia. Además, este periodo de comparación tiene que corresponder a la misma época del año, ya que se debe de considerar el comportamiento de la concentración de los contaminantes atmosféricos en distintos periodos.

Para la prueba de la metodología desarrollada por el grupo de investigación se elaboraron 4 escenarios. El primero es en enero 2015 sin la estrategia del impulso a MiBici dentro del polígono, el siguiente es enero 2019 con la estrategia aplicada y con una estimación de reducción en tráfico de 17%. Para el tercer y cuarto escenario se utilizaron las mismas condiciones, pero en los meses de mayo 2015 y 2019.

Lo que se busca identificar son las variaciones en las categorías del indicador de impacto en el territorio, tanto espacialmente como en resultados estadísticos totales. Como se describió en la metodología, a todos los valores del indicador de exposición se les agregó

un valor de 3.5. Esto hizo que el valor mínimo del indicador fuera 1.35 y el valor máximo 9.00. Aunque se desplazaron los datos, las categorías se siguen manteniendo de acuerdo con lo que se describió en la sección 5.4.3.

Se graficó la distribución de los resultados del indicador de impacto (Figura 63) para todos los escenarios estudiados. Con este se buscó representar la tendencia global de los datos debido a que se trata de un indicador que varía con la concentración, a diferencia del indicador de exposición. Al observar la dispersión de los valores en la Figura 63 se logra identificar que la gráfica cuenta con una tendencia exponencial, lo que es de esperarse de acuerdo con la construcción del indicador.

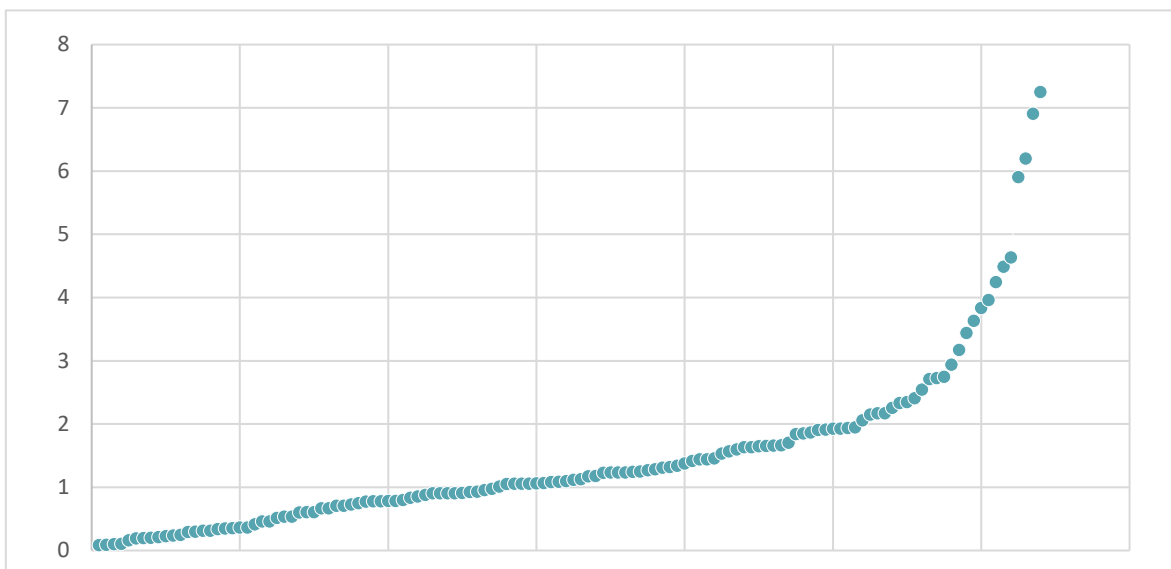


Figura 63. Distribución del indicador de impacto para todos los hexágonos y todos los escenarios evaluados.

Por este motivo, se definieron las categorías para el indicador logrando representar esta tendencia de los resultados. Esto quiere decir que no se elaboraron agrupaciones con intervalos iguales o con cuantiles. Más bien, se definieron grupos con divisiones menores al inicio y posteriormente divisiones con mayor amplitud (Tabla 19).

Tabla 19. Categorías del indicador de impacto

Código de colores	Indicador de impacto	Categoría
	0.0 – 1.0	Bajo
	1.0 – 2.0	Regular
	2.0 – 4.0	Alto
	4.0 – 8.0	Muy Alta
	8.0 >	Extremadamente alto

En la Figura 64 se muestra la representación espacial del indicador de impacto para enero, con los resultados de la evaluación previo al impulso del programa en enero 2015 (izquierda) y la reducción en el flujo vehicular después de su implementación (derecha) en enero 2019. Tras observar ambos gráficos se pueden identificar reducciones en el indicador de impacto territorializado. Sin embargo, estos cambios parecen encontrarse muy localizados y no representar una tendencia de cambio general en el territorio.

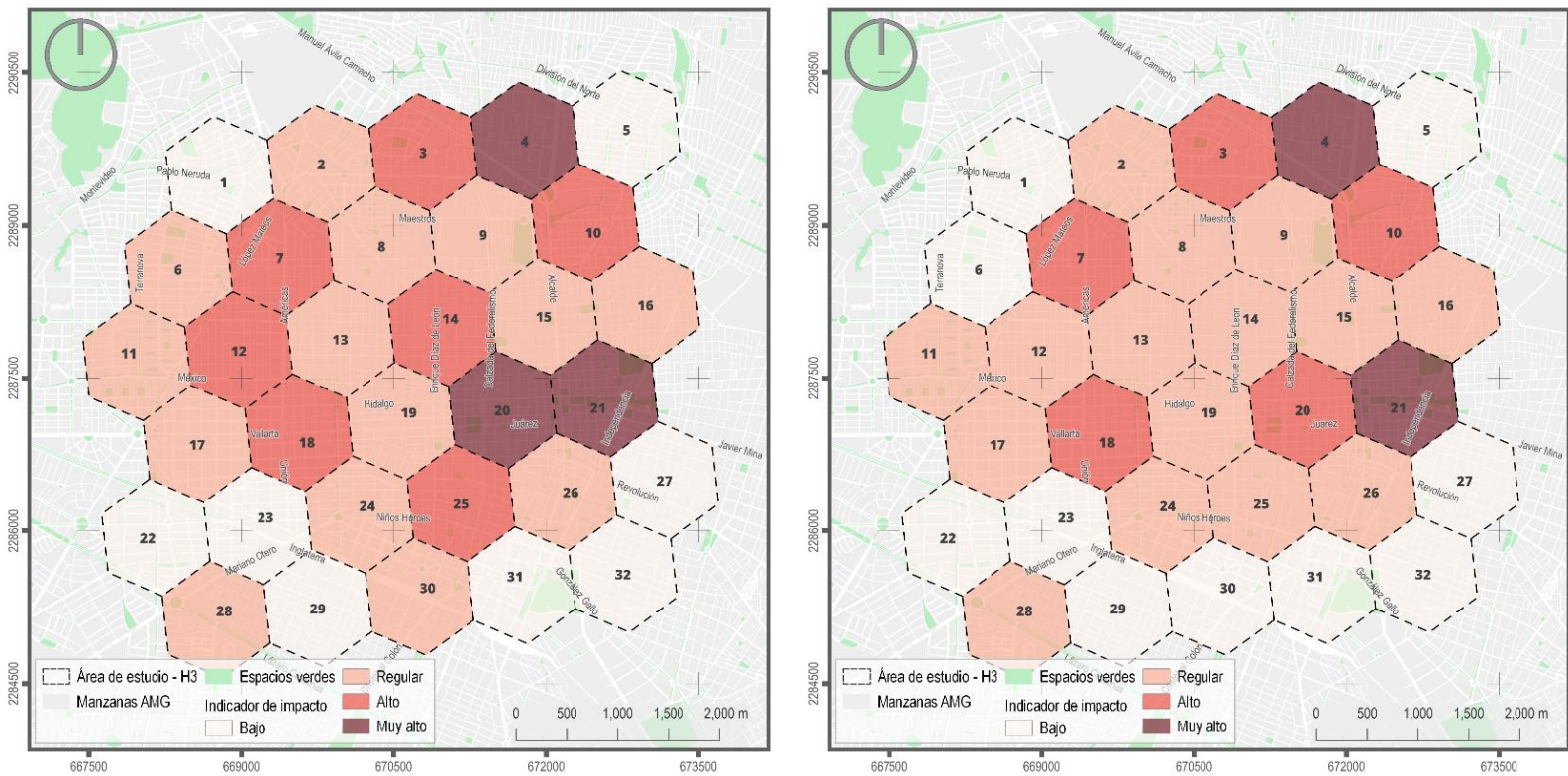


Figura 64. Indicador de impacto para enero 2015 (izquierda) sin la estrategia MiBici y enero 2019 (derecha) con la estrategia MiBici.

Otro aspecto para resaltar es que la mayoría de los hexágonos se encuentran en una categoría de impacto Regular, mientras que aquellos que tienen datos de impacto Bajo se ubican en sitios sin avenidas principales y con poca densidad de población, de personas ocupadas y de viajes. Dicho de otra manera, se logra identificar que el indicador está representando la dinámica territorial de cada sitio de forma adecuada, ya que, en los espacios en los que no hay vialidades con el volumen vehicular necesario para generar concentraciones elevadas de contaminantes y en los hexágonos que no se esperan conglomeraciones de población, el indicador de impacto es Bajo.

La información representada en la Figura 64 se puede analizar de forma más detallada en la Tabla 20. En los rangos más elevados de exposición a contaminantes atmosféricos se reducen un total de 3 hexágonos, tomando en cuenta ambas categorías. Sin embargo, esto provoca un aumento de 1 en el grupo de impacto Regular. Aun así, es de resaltar que se reduce la categoría del hexágono 20 (Figura 64), que cuenta con uno de los valores más altos del índice de exposición a una categoría de impacto Alta.

Tabla 20. Cambios en la categoría de impacto sin la estrategia MiBici (enero 2015) y con la estrategia (enero 2019)

Categoría	Enero 2015	Enero 2019
Bajo	8	10
Regular	14	15
Alto	7	5
Muy alto	3	2

Por otro lado, al observar los datos de mayo (Figura 65) se puede establecer que hay un impacto más claro de esta estrategia. Aunque los valores del indicador de impacto son más bajos en este periodo de tiempo, se eliminan los hexágonos con un impacto muy alto y se reducen otros de niveles Regulares a Bajos.

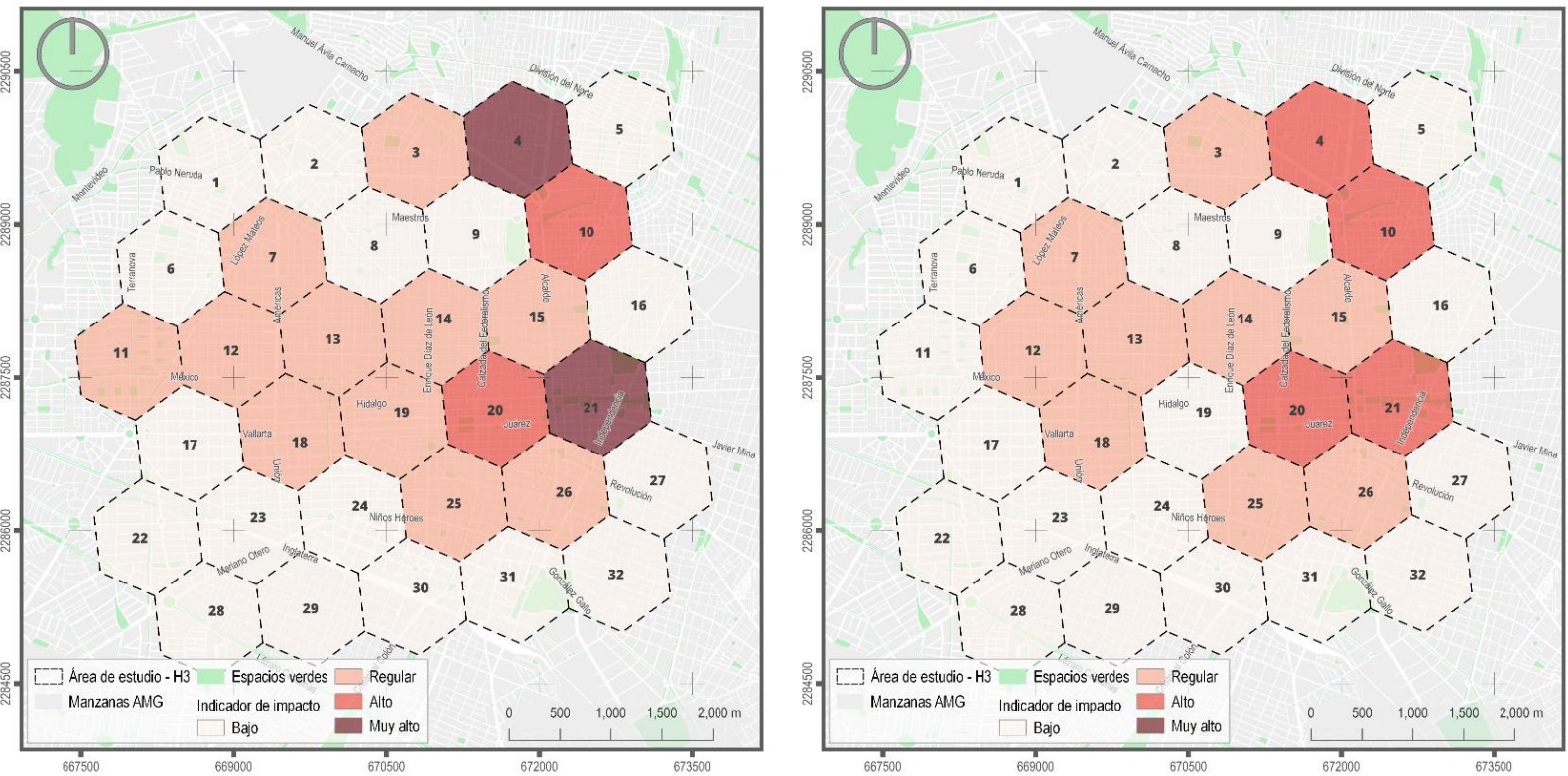


Figura 65. Indicador de impacto para mayo 2015 (izquierda) sin la estrategia MiBici y mayo 2019 (derecha) con la estrategia MiBici.

De nuevo, en la Tabla 21 podemos ver el dato del cambio entre categorías para estos periodos. Es de resaltar que aquellos sitios con un nivel de impacto alto no bajan a regular, estos espacios coinciden con hexágonos con indicadores de exposición altos. A su vez, también se encuentran en avenidas principales, en las que, aunque se reduzca la exposición en el polígono en general, se mantiene una emisión de contaminantes elevada.

Tabla 21. Cambios en la categoría de impacto sin la estrategia MiBici (mayo 2015) y con la estrategia (mayo 2019)

Categoría	Mayo 2015	Mayo 2019
Bajo	17	19
Regular	11	9
Alto	2	4
Muy alto	2	0

Esta dinámica destaca la importancia de la mezcla de estrategias para generar impactos sustanciales en el territorio. Debido a que, aun con el dato de reducción de 17% del

parque vehicular a lo largo de 4 años se mantienen niveles de impacto elevados para la población, tanto en enero como en mayo.

De acuerdo con los datos observados en los escenarios simulados se puede decir que si bien, se asume que el impulso al programa MiBici sí genera un impacto este no es considerable en el territorio y no logra modificar las dinámicas de exposición de la población de forma sustancial. Aun así, esto no quiere decir que no se deben de impulsar este tipo de estrategias, ya que el estudio no contempla el impacto positivo que tiene este tipo de actividades a la salud de las personas ni el impacto a largo plazo de colocar esta infraestructura.

Sin embargo, y de acuerdo con lo que se observó en la literatura (Public Health England, 2019) respecto al impulso de métodos de movilidad como la bicicleta, los impactos en la calidad del aire no son considerables. Se llega a esta conclusión debido a que el método desarrollado está asumiendo una reducción global del 17% del parque vehicular en el polígono, el estudio no contempla posibles aglomeraciones provocadas por la reducción de carriles en las vialidades, no se considera el incremento del parque vehicular ni incrementos en las variables sociodemográficas de exposición. Todo esto se traduce en una sobreestimación del impacto del programa y, aun con estos elementos, el cambio en las categorías no representa una modificación sustancial en las dinámicas de exposición para la población en el polígono.

Al observar este tipo de resultados se resalta la importancia de complementar las estrategias propuestas y realizar simulaciones multidimensionales con mayor detalle en las dinámicas territoriales. Siguiendo la metodología desarrollada en la investigación, se logran

estimar las emisiones en el territorio, las cuales pueden verse complementadas con aproximaciones de reducción en las emisiones por afinación de vehículos con el programa de verificación vehicular, retiro de vehículos visiblemente contaminantes, creación de zonas de baja emisión, estimación del incremento en el parque vehicular, etc.

Estos escenarios de emisión más complejos se pueden integrar con estimaciones en el cambio de unidades económicas, de población y estimaciones de viajes de transporte público y transporte masivo. Para las primeras dos variables se propone la realización de regresiones espaciales sencillas por hexágono y, para la variable de viajes, se puede aplicar la metodología presentada con las actualizaciones en el reporte de viajes realizado por el IIEG (IIEG, 2019).

Además de lo descrito previamente, aspectos de relación espacial como la introducción de una variable de estimación de tráfico, proporcionaría información adicional sobre el territorio estudiado y sobre las dinámicas que tienen impacto en la calidad del aire. Como parte de la investigación para el modelo de dispersión, la capa de tráfico se tomó como insumo para los factores de emisión, sin embargo, se utilizó de forma estática. Si se desarrollan modelos de estimación de unidades económicas, población y viajes en transporte público y transporte masivo sería relevante también agregar variación al tráfico, con aumentos o disminuciones dependiendo de las estrategias implementadas y de las dinámicas sociodemográficas propuestas.

Otro aspecto con la capacidad de robustecer el modelo de emisión es el uso de la información de los sensores de bajo costo colocados en el área de estudio. Actualmente no se cuenta con estos equipos en el territorio, pero se espera que en los próximos años se

encuentren en el sitio y estén generando información horaria sobre las concentraciones de contaminantes. Estos datos incrementan la resolución espacial sobre la contaminación atmosférica y permite generar ajustes a los factores de emisión para aumentar la precisión del modelo. No obstante, previo a su uso, estos sensores electrónicos deben de ser evaluados con la metodología propuesta en la presente investigación u otra similar, se deben de realizar los ajustes necesarios en los métodos de estimación de concentraciones con respecto a las variables meteorológicas y se debe de definir un rango de confianza de las mediciones.

Si los aspectos propuestos se incluyen en el modelo de dispersión y en el método de evaluación de impacto es relevante que se dé una revisión previa a las categorías discretas de los indicadores que se proponen en la presente investigación. Sería de esperar que la integración de los elementos descritos, u otros que no se contemplen, revelen dinámicas que no se observan actualmente y que hagan obsoletas las categorías propuestas.

Por su parte, la inclusión de dinamismo en el modelo robustece la evaluación de las políticas y permite generar una mayor cantidad de escenarios, estableciendo de forma clara qué es lo que se asume para llegar a un escenario esperado. El hacer explícitas estos requerimientos tiene el efecto positivo de visualizar cuáles son los objetivos que se tendrían que cumplir y permite determinar cuáles son más reales o factibles.

Se debe recordar que, de acuerdo con los lineamientos de la gestión de la calidad, se debe de partir del escenario real para planear, no de un escenario ideal. Por lo tanto, si se busca generar un escenario donde se asume un 100% de vehiculos verificados, pero en la actualidad se estima un total de 25%, se debe de definir la manera en que se espera subir el 75% de verificaciones dentro de las dinámicas de gestión que se tienen actualmente.

A pesar de las suposiciones que se hicieron para probar la metodología y de las posibles mejoras que se presentan en este reporte, el estado actual logra el objetivo del desarrollo del método para evaluar escenarios de las políticas y su implementación a través de estrategias específicas. Durante la investigación se buscó crear una ruta de desarrollo clara reduciendo la complejidad de su elaboración para facilitar su réplica y su implementación.

Este método comprende desde la selección de los factores de emisión, la propuesta de análisis a partir de máximos promedios para evitar trabajar con máximos globales, la normalización de las variables de concentración, el tratamiento de las variables de exposición, cruce de datos y clasificación de los niveles de impacto. Como se mencionó anteriormente, siguiendo esta ruta se pueden evaluar distintos escenarios y estimar el impacto al impulsar distintas estrategias complementarias.

5.5. Impacto de la investigación

Durante la presente investigación se propuso un acercamiento que, de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, puede ser considerado como innovador. La evaluación de una política pública con una perspectiva de gestión de la calidad y, a partir de este marco, buscar el desarrollo de una metodología orientada a mejorar los esquemas de evaluación e incrementar el impacto producido.

La revisión del Programa ProAire 2014-2020 utilizando metodologías aplicadas en la gestión de la calidad industrial dotó al equipo de investigación de una base con la que se logró un acercamiento metódico y sustentado sobre los aspectos relevantes del programa a estudiar y las posibles áreas de mejora que tenía este. Con esta visión, y de acuerdo con las necesidades que surgieron durante la investigación, se fue acotando y ajustando la ruta de trabajo.

Por estos motivos, se puede decir que más allá de las herramientas estadísticas utilizadas en la gestión de la calidad que fueron integradas en la presente investigación, el eje rector del presente documento fue el marco de la gestión de la calidad, en el que resaltamos la importancia de contar con un método de evaluación del escenario actual, después, establecer de forma clara cómo se van a medir los cambios en el sistema y, con esta información, definir rutas de trabajo para llegar a los objetivos propuestos.

De acuerdo con los aspectos descritos en el párrafo previo es relevante recordar que los objetivos específicos de la presente investigación fueron establecer una base cero, desarrollar una metodología de evaluación de sensores electrónicos y desarrollar un método para evaluar el impacto de las estrategias. Para el primer objetivo específico se realizó una revisión bibliográfica extensiva sobre distintos métodos para determinar la línea base en temas de calidad del aire. Utilizando diversos aspectos de estos métodos, pero con el eje rector del objetivo general que es generar una metodología replicable, se buscó desarrollar un método que diera información valiosa sobre el estado actual a la vez que sea fácil de aplicar.

Este acercamiento nos llevó a un análisis de los huecos en las mediciones de las concentraciones y a estudiar métodos de llenado de huecos. Se considera que en este último punto se obtuvieron resultados relevantes, aunque no determinantes. Sin embargo, debido a que el objetivo no era desarrollar el modelo de llenado de huecos, sino el método de definición del estado cero, se continuó con el desarrollo del método de agrupación y se llegó a una propuesta de promedios mensuales, con distinción por día de la semana, y representación de la desviación en los valores. Este nivel de resolución espacial captura de forma clara el dinamismo en la calidad del aire y permite extraer conclusiones sobre las

tendencias en la concentración, identificar cambios y evaluar el estado actual con respecto al histórico.

Desde una perspectiva de calidad, otro aspecto relevante es evaluar el equipo que se pretende utilizar en campo para determinar si hay un impacto o no, es en este punto donde se integra el segundo objetivo específico. De nuevo, siguiendo las directrices de la gestión de la calidad, si no se tiene certeza en los equipos de medición no se puede usar su información para tomar decisiones. Para este método se integraron herramientas estadísticas, se propuso el uso de la metodología de Gage R&R y se utilizó una base sobre el diseño de experimentos.

Siguiendo la propuesta de la presente investigación se consideró relevante la evaluación de los sensores utilizando diversos equipos de las mismas marcas, para identificar la variación entre equipos, y también la colocación en distintas ubicaciones, para identificar posibles diferencias por la localización. Sin embargo, estos aspectos no se lograron cumplir por limitaciones en los equipos disponibles para las pruebas. Aun así, se evaluaron los sensores utilizando métodos estadísticos comúnmente usados en la industria.

La evaluación de los sensores resaltó la importancia del proceso de calibración con las condiciones meteorológicas esperadas en el sitio, ya que se observó que era una variable con alto impacto, principalmente en los sensores de gases. Por otro lado, también resultó relevante buscar el ajuste de los parámetros de estimación de la concentración, ya que valores altamente rigurosos pueden capturar la oscilación en la concentración, pero no los valores de concentración reales. Este aspecto también es relevante en el sentido contrario, con parámetros amplios la dispersión en las concentraciones es alta y no es posible concluir sobre el estado actual utilizando los valores registrados.

Cabe resaltar que, como se describió previamente, el trabajo de evaluación se hizo en conjunto con la SEMADET y, tras realizar la evaluación de los sensores se preparó un reporte que se entregó a la Secretaría (Anexo I). La metodología elaborada y puesta a prueba puede ser aplicada por la SEMADET para continuar con la evaluación del desempeño de otros sensores de bajo costo que puedan llegar en el futuro. Esto resalta un aspecto importante del trabajo realizado, aunque se trata de una investigación se buscó que tuviera un impacto real y aplicable.

Por su parte, para la evaluación de impacto se integró el desarrollo del modelo de dispersión, desarrollado por la estudiante en la Maestría en Ingeniería de Procesos, con el indicador de exposición desarrollado en la presente investigación y, con el equipo de trabajo, se determinó el método óptimo para realizar el cruce de variables. A partir de este análisis se estableció que la estrategia evaluada de MiBici sí genera un impacto en la calidad del aire, aunque este no es determinante dentro del polígono de estudio.

La metodología propuesta logra relacionar los sitios en los que la población se encuentra expuesta (los cuales coinciden con las zonas que se esperaban fueran relevantes por el conocimiento del sitio previo) con las dinámicas de emisión de PM_{10} . El resultado muestra de forma clara y territorializada los espacios en los que se esperaría un impacto positivo con y sin la implementación de la estrategia y, aunque se identificaron diversas posibles mejoras a la metodología, se considera que cumple de forma satisfactoria con el objetivo planteado.

Aunado al trabajo que se desarrolló durante la investigación, se resalta un aspecto importante de las políticas públicas y las estrategias que incluyen; estas deben de encontrarse orientadas al impacto y deben de considerar los escenarios reales. Algo común es que estos

documentos queden como textos que incluyen buenas prácticas y sean un marco de deseos, pero no funcionan como una guía para llegar a un objetivo. Con el acercamiento propuesto se busca cambiar esta dinámica aplicando un marco de gestión de la calidad y herramientas estadísticas, comúnmente usadas en la industria, para contar con un método de evaluación orientado al impacto que sirva como insumo para la toma de decisiones sobre el impulso a estrategias y la colocación de recursos.

Hay diversas circunstancias dentro de la administración pública que dificultan el seguimiento a los programas y la obtención de resultados, por ejemplo, las complicaciones que genera planear en un marco de incertidumbre por la falta de continuidad. A pesar de que el presente documento no dota, ni busca dotar, una respuesta a estos paradigmas, sí se considera que la implementación de objetivos tangibles y medibles de forma clara puede apoyar a la trascendencia en los programas entre administraciones.

De acuerdo con las propuestas de mejoras del modelo planteadas y con las limitaciones descritas en el párrafo anterior, se entiende que es difícil que las modificaciones a la metodología sean elaboradas por la SEMADET. Sin embargo, se considera que con los elementos planteados se da pie para que la Secretaría busque alianzas con la academia, utilizando objetivos claros que funjan como ruta de desarrollo.

A su vez, la integración de prácticas de mejora continua dentro de la Dirección de Calidad del Aire podría facilitar la revisión de los objetivos y dar estructura a los momentos de análisis y de ajuste en las propuestas planteadas. Este tipo de prácticas se utilizan en la industria ya que es fácil perderse en las actividades diarias, por lo que es importante contar con espacios de reflexión y evaluación sobre el trabajo para determinar si es necesario modificar algún aspecto u acercamiento.

Por otro lado, la internalización de proceso de mejora continua en la Dirección de Calidad del aire también resulta relevante para el desarrollo de la metodología propuesta desde una perspectiva de gestión de la calidad. Sin este elemento, es fácil que el proyecto se convierta en una herramienta de medición, pero sin un control del proceso. Es necesario que se integre este elemento ya que es el que permite generar un sistema que derive en un desarrollo cíclico y no una implementación acotada a un momento.

Los resultados obtenidos se van a presentar tanto a la SEMADET como a el Imeplan en un momento coyuntural, ya que actualmente no se ha publicado el nuevo programa ProAire y hay elementos que podrían ser incorporados. Bajo este escenario, se recomienda que el nuevo programa integre elementos de evaluación orientada al impacto y que este acercamiento sirva como el insumo para dimensionar lo que implica cumplir los objetivos planteados desde el contexto real de la SEMADET. A su vez, y siguiendo las conclusiones tras el análisis del ProAire, sería deseable que en su nueva iteración cuente con estrategias más aterrizadas y menos ambiciosas. Aunque parezca contradictorio, se considera que contar con objetivos más claros y alcanzables puede traducirse en un mejor desarrollo y seguimiento de la política y en un mayor impacto a la calidad del aire del AMG.

Aun si la propuesta metodológica nos e integra al pie de la letra, el simple hecho de tener un momento de revisión con estas instancias públicas es importante. Con la presentación no solo se busca demostrar los resultados sino recordar y colocar en la mesa que la problemática de calidad del aire es un problema ambiental con impactos en la salud pública y que, por lo tanto, el impacto debe de ser evaluado con respecto a la población y buscando generar un beneficio a la comunidad.

Al final, se buscó que la investigación tuviera resultados tangibles y claros, con una metodología simplificada para facilitar su implementación y en una problemática relevante desde una perspectiva ambiental y social. Con este acercamiento, se intentaron colocar los conocimientos adquiridos durante la maestría al servicio de las instancias públicas y de esta manera, generar impactos positivos para la comunidad.

6. Discusión final

6.1. Relevancia y trascendencia disciplinaria de la investigación

La presente investigación integra elementos de trabajos previos en materia de gestión de la calidad, de calidad del aire y evaluación de impacto de políticas públicas, con el objetivo de elaborar propuestas innovadoras que complementan los hallazgos de otros proyectos y aportan nuevo conocimiento.

La aplicación de herramientas y una visión de gestión de la calidad para estudiar y proponer mejoras en una política pública refuerza la versatilidad de este tipo de acercamientos y la universalidad de los conceptos que la componen. La revisión bibliográfica demostró la diversidad de aplicaciones en distintas ramas del conocimiento, ya que el entendimiento sistémico de los procesos es un aspecto replicable y adaptable a distintas circunstancias. Pero, para su uso, es necesario comprender cuáles son las características propias del contexto que se está estudiando y sobre el cual se pretende proponer una mejora.

Durante la investigación, se logró extender el universo de aplicación de la gestión de la calidad a través de la adaptación de metodologías y conceptos en política pública y se presentó una ruta de trabajo que va desde el acercamiento inicial y la definición del problema, hasta las propuestas para la evaluación del impacto obtenido.

Como parte de la evaluación sistémica de la calidad del aire y de la definición del escenario actual, la metodología para la construcción de una línea base que se presenta en la investigación integra elementos de distintos trabajos para formular una propuesta que se adapta a las necesidades del entorno y su contexto. Su desarrollo permitió establecer una resolución temporal óptima que sirve para estudiar el comportamiento de la calidad del aire

de forma histórica e identificar cambios en las tendencias por la implementación de medidas de reducción de la contaminación.

Como aspecto complementario a la elaboración de la línea base, la construcción de redes neuronales de relación espacial para el llenado de huecos presenta un acercamiento innovador a una metodología que previamente se ha aplicado por horizonte temporal. Los resultados obtenidos en la estación Centro destacan la capacidad que tiene el método desarrollado para llegar a una predicción adecuada, aun cuando se alimentan datos sin pretratamiento al sistema.

A su vez, la evaluación de los instrumentos de medición es un aspecto altamente relevante desde una perspectiva de gestión de la calidad. Sin embargo, esto no es algo se tuviera considerado para los sensores electrónicos en la administración pública, ya sea porque se asume como una variable de incertidumbre del sistema o se desconoce el estado del arte en la materia. Bajo este escenario es que se desarrolló la metodología en conjunto con la SEMADET, y se mostró la relevancia de estudiar los equipos de medición. Ya que, como elementos de evaluación y como generadores de insumos para la toma de decisiones, es necesario conocer qué tanto se puede confiar en los datos recabados.

Para la evaluación de los sensores de medición se integraron aspectos que se destacan en reportes (como el de la Comisión Europea, 2019) o en investigaciones previas. En estos trabajos se marca qué parámetros estadísticos es relevante conocer respecto a la desviación de las mediciones y qué elementos del entorno se deben de contemplar. Estos planteamientos dirigieron la ruta para la elaboración de la propuesta metodológica y dieron pistas sobre las

condiciones a evaluar, desde los estadísticos utilizados y su interpretación, hasta el análisis del impacto de las condiciones meteorológicas.

Dentro de los hallazgos esta investigación se constató la importancia que tiene realizar validaciones de los sensores en sitio para ajustar el procesamiento digital de los datos y que se generen mediciones que reflejen las condiciones reales. Si bien, el alcance de este proyecto se limitó a observar su impacto y no sus causas, el estudio de este comportamiento se considera como un área de oportunidad para trabajos futuros.

La integración de los elementos descritos previamente y el conocimiento generado durante en proyecto culmina en el desarrollo de la metodología para evaluar el impacto de las estrategias. La propuesta comprende el contexto local de acceso a la información y, con estas limitantes, se propone un método simplificado, pero cuenta con gran valor para la interpretación del territorio.

Como elemento de planeación y de optimización en la locación de recursos y esfuerzos, se destaca el valor de la metodología como un primer paso hacia la toma de decisiones basadas en información cuantificable en la política pública local en materia de calidad del aire. Aunado a esto, la estrategia de evaluación coloca objetivos sobre las dinámicas que se esperan observar en el entorno y permite observar su comportamiento a lo largo del tiempo para realizar los ajustes necesarios. La inclusión de mejoras a este método utilizando las recomendaciones propuestas en el presente documento permitirían robustecer las técnicas de evaluación orientadas al impacto.

Una visión sistémica, como es la gestión de la calidad, marcó la pauta para el análisis de una política pública y el desarrollo de metodologías para el diagnóstico del estado actual

mediante métodos estadísticos, para la evaluación de sensores y para la medición del impacto mediante formulación de escenarios. La información generada y los hallazgos obtenidos durante la investigación aportan valor a trabajos previos y marcan caminos para el desarrollo de futuros estudios en la materia.

7. Bibliografía

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (10 de Diciembre de 2019). *Fuentes de contaminación atmosférica en Europa*. Obtenido de Agencia Europea de Medio Ambiente: <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2013/infografia/fuentes-de-contaminacion-atmosferica-en-europa-2/view>
- ASQ. (2007). *WHAT IS RELIABILITY?* Obtenido de ASQ: <https://asq.org/quality-resources/reliability>
- ASQ. (2018). *GAGE REPEATABILITY AND REPRODUCIBILITY*. Obtenido de ASQ: <https://asq.org/quality-resources/gage-repeatability>
- Auluck, R. (2002). Benchmarking: a tool for facilitating organizational learning? *Public Administration and Development*, 109-122.
- Ayuntamiento de Guadalajara. (2016). *Plan de contingencias atmosféricas interno del municipio de Guadalajara*. Obtenido de Planes de Contingencia atmosféricas para el Área Metropolitana de Guadalajara: https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/pcai_munguadajara.pdf
- Barai, S., Dikshit, A., & Sharma, S. (2007). Neural Network Models for Air Quality Prediction: A Comparative Study. *Soft Computing in Industrial Applications*, 290-310.
- Campos-Vargas, M., Toscana-Aparicio, A., & Campos, J. (2015). Riesgo socionaturales: vulnerabilidad socioeconómica, justicia ambiental y justicia espacial. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 53-69.
- Castell, N., Dauge, F., & Schenider, P. (2016). *Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?* Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/311935153_Can_commercial_low-cost_sensor_platforms_contribute_to_air_quality_monitoring_and_exposure_estimates
- CCICED. (Diciembre de 2014). *Performance Evaluation on the Action Plan of Air Pollution Prevention and Control and Regional Coordination Mechanism*. Obtenido de China Council for International Cooperation on Environment and Development:

<http://www.cciced.net/cciceden/POLICY/rr/prr/2014/201411/P020160928409089848299.pdf>

CEMDA. (2013). *Recomendación de política pública para mejorar la calidad del aire en México*. Obtenido de Centro Mexicano de Derecho Ambiental A.C.: <https://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2013/02/calidadelaire.pdf>

Commission of the European Communities. (21 de Septiembre de 2005). *The Communication on Thematic Strategy on Air Pollution and The Directive on "Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe"*. Obtenido de European Union: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6d43a0e3-462e-4b6f-a81b-01bdf0c21253/language-en>

Contreras, L. (Junio de 2014). *La gestión de la calidad en el sector público*. Obtenido de Contraloría del Poder Legislativo: http://contraloriadelpoderlegislativo.gob.mx/Revista_Rc_et_Ratio/Rc_et_Ratio_8/Rc8_1-Leticia-Contreras.pdf

Costin, C. (2010). *Administração Pública*. Rio Janeiro: Elsevier.

De Ridder, K., Adamec, V., Bañuelos, A., Bruse, M., Bürger, M., Damsgaard, O., . . . Weber, C. (2004). An integrated methodology to assess the benefits of. *Science of the Total Environment*, 489-497.

deSouza, P., Anjomshoa, A., Duarte, F., Kahn, R., & Kumar, P. (Junio de 2020). *Air quality monitoring using mobile low-cost sensors mounted on trash-trucks: Methods development and lessons learned*. Obtenido de Elsevier: http://senseable.mit.edu/papers/pdf/20200601_deSouza-etal_AirQuality_SCS.pdf

Dragomir, C. (2019). QUALITY OF PUBLIC SERVICES AND PROMOTION OF QUALITY MANAGEMENT IN PUBLIC INSTITUTIONS IN EU MEMBER STATES. *Review of General Management*, 43-54.

El-Harbawi, M. (2013). Air quality modelling, simulation, and computational methods: a review. *Environmental Reviews*, 149-179. Obtenido de <https://doi.org/10.1139/er-2012-0056>

Environmental Protection Agency. (2015). *Criteria Air Pollutants*. Obtenido de EPA: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/ace3_criteria_air_pollutants.pdf

- EPA. (Abril de 2011). *The Benefits and Costs of the Clean Air Act from 1990 to 2020*. Obtenido de Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/benefits-and-costs-clean-air-act-1990-2020-report-documents-and-graphics>
- European Commission. (16 de Diciembre de 2019a). *Glossary: Transport mode*. Obtenido de Eurostat: Statistics Explained: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:Transport_mode
- European Commission. (2019b). *Review of sensors for air quality monitoring*. Obtenido de EU SCIENCE HUB: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC116534/kjna29826enn.pdf>
- Fleury, S., & Pinto, E. (2012). Custeio do direito a saúde: em busca da mesma proteção constitucional. *Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas*, 54-80.
- Freeman, B., Taylora, G., Gharabaghi, B., & Théa, J. (2018). Forecasting air quality time series using deep learning. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 866-886.
- Garnica-Monroy, R., Garibay-Bravo, V.-G. A., Martínez Salgado, H., & Hernández-Reyes, M. (2021). *Spatial Analysis of Exposure to Traffic-Related Air Pollution in Mexico: Implications for Urban Planning to Improve Public Health*. Obtenido de SpringerLink: https://link.springer.com/article/10.1007/s12061-021-09415-1?wt_mc=Internal.Event.1.SEM.ArticleAuthorOnlineFirst&utm_source=ArticleAuthorOnlineFirst&utm_medium=email&utm_content=AA_en_06082018&ArticleAuthorOnlineFirst_20210809
- Garza, R., González, C., Rodríguez, E., & Hernández, C. (2016). Aplicación de la metodología DMAIC de Seis Sigma con simulación discreta y técnicas multicriterio. *Revista de métodos cuantitativos para la economía y la empresa*, 19-35.
- Glass, D. (2014). *Experimental Design for Biologist*. Obtenido de Secretaría de salud: <http://www.iner.salud.gob.mx/descargas/comiteticainvest/experimentaldesign.pdf>
- Grabow, M., Spak, S., Holloway, T., Stone, B., Mednick, A., & Patz, J. (2012). Air Quality and Exercise-Related Health Benefits from Reduced Car Travel in the Midwestern United States. *Environmental Health Perspectives*, 68-76.

- Hagan, M., Demuth, H., Beale, M., & De Jesús, O. (2014). *Neural Network Design*. Obtenido de Oakland University: Hagan.okstate.edu/NNDesign.pdf
- Harrison, R. (2006). *An Introduction to Pollution Science*. RSC Publishing.
- Harrison, S., & Stupak, R. (1993). Total Quality Management: The Organizational Equivalent of Truth in Public Administration. Theory and Practice. *Public Administration Quarterly*, 416-429.
- HBM Prencsia. (2020). *Main Page*. Obtenido de Reliawiki: http://reliawiki.com/index.php/Main_Page
- Healy, S., & Wallace, M. (Julio de 2011). *Gage Repeatability and Reproducibility Methodologies Suitable for Complex Test Systems in Semi-Conductor Manufacturing*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/221913368_Gage_Repeatability_and_Reproducibility_Methodologies_Suitable_for_Complex_Test_Systems_in_Semi-Conductor_Manufacturing
- Heckman, A. (2012). Desperately Seeking Management: Understanding Management Quality and Its Impact on Government Performance Outcomes under the Clean Air Act. *Journal of Public Administration Research & Theory*, 473-496.
- Heckman, E. (2017). *How to Design, Analyze and Interpret the Results of an Expanded Gage R&R Study*. Obtenido de Minitab: <https://blog.minitab.com/blog/expanded-gage-rr-study-how-to-design-analyze-interpret-results>
- Hélder, A., & Relevas, P. (2018). *Integrated assessment models to improve urban air quality*. Obtenido de Universidade de Aveiro: <https://ria.ua.pt/handle/10773/25064>
- Hoffa, D., & Laux, C. (Octubre de 2007). *Gauge R&R: An Effective Methodology for Determining the Adequacy of a New Measurement System for Micron-level Metrology*. Obtenido de Iowa State University: https://lib.dr.iastate.edu/abe_eng_conf/347/
- IBM Center for the Business Government. (2007). *Improving Service Delivery in Government with Lean Six Sigma*. Obtenido de ASQ: <http://asq.org/gov/improving-service-delivery-in-in-government-with-lean-six-sigma.pdf>
- IIEG. (30 de julio de 2019). *Usuarios en el Sistema de Transporte Urbano de Pasajeros de Guadalajara*. Obtenido de Instituto de Información Estadística y Geográfica de

Jalisco: https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2019/07/Ficha_ETUP_May19.pdf

INECC. (2009a). *Manual 1. Principios de la medición de la calidad el aire*. Obtenido de SINAICA: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

INECC. (2009b). *Manual 2. Sistemas de medición de la calidad del aire*. Obtenido de SINAICA: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/2-%20Sistemas%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

INECC. (2009c). *Manual 3. Redes, estaciones y equipos de medición de la calidad del aire*. Obtenido de SINAICA: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/3-%20Redes,%20Estaciones%20y%20Equipos%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

INECC. (2009d). *Manual 4. Operación de estaciones de medición de la calidad del aire, mantenimiento y calibración de sus componentes*. Obtenido de SINAICA: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/4-%20Operaci%C3%B3n%20de%20Estaciones%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire,%20mantenimiento%20y%20calibraci%C3%B3n%20de%20sus%20Componentes.pdf>

INECC. (2009e). *Manual 5. Protocolo de manejo de datos de la calidad del aire*. Obtenido de SINAICA: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/5-%20Protocolo%20de%20Manejo%20de%20Datos%20de%20la%20Calidad%20de%20la%20Aire.pdf>

INECC. (2009f). *Manual 6. Lineamientos técnicos y administrativos para la auditoría de sistemas de medición de la calidad del aire*. Obtenido de SINAICA: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/6-%20Lineamientos%20T%C3%A9cnicos%20y%20Administrativos%20para%20la%20Auditor%C3%ADa%20de%20Sistemas%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

- INECC. (2018). *Informe nacional de la calidad del aire México*. Obtenido de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2018.pdf>
- Junger, W., & Ponce de Leon, A. (2015). Imputation of missing data in time series for air pollutants. *Atmospheric Environment*, 96-104.
- Junninen, H., Niskaa, H., Tuppurainenc, K. R., & Kolehmainen, N. (2004). Methods for imputation of missing values in air quality datasets. *Atmospheric Environment*, 2895-2907.
- Karagulian, F., Barbieri, M., Kostev, A., & Spinelle, L. (Agosto de 2019). *Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/335466076_Review_of_the_Performance_of_Low-Cost_Sensors_for_Air_Quality_Monitoring
- Khare, M., & Nagendra, S. (2007). Artificial Neural Networks in Vehicular Pollution Modelling. *Studies in computational intelligence*, 121-156.
- Kirk, R. (2005). *Experimental design*. Obtenido de Corwin: https://www.corwin.com/sites/default/files/upm-binaries/29173_Millsap___Chapter_2.pdf
- Leslie, R. (2018). *Missions and Sensors*. Obtenido de Comprehensive Remote Sensing: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489103288>
- Li, J.; Mattewal, S.; Patel, S.; Biswas, P. (01 de Julio de 2019). *Evaluation of Nine Low-cost-sensor-based Particulate Matter Monitors*. Obtenido de Aerosol and Air Quality Research: <https://aaqr.org/articles/aaqr-18-12-lcs-0485.pdf>
- Liang, S., Li, X., & Wang, J. (2012 de Julio de 2012). *A Systematic View of Remote Sensing*. Obtenido de Advanced Remote Sensing: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123859549000010>
- Louka, G., & Besseris, G. (Diciembre de 2010). *Gauge R&R for an optical micrometer industrial type machine*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/292741121_Gauge_RR_for_an_optical_micrometer_industrial_type_machine

- Matei, A., & SAVulescu, C. (2011). Convergence of the Policies for Promoting Total Quality Management in the Public Administrations of Balkan States -- European Union Member States. *Theoretical & Applied Economics*, 41-76.
- Matei, L., & Lazer, C.-G. (2011). Quality Management and the Reform of Public Administration in Several States in South-Eastern Europe. Comparative Analysis. *Theoretical & Applied Economics*, 65-98.
- Matias-Pereira, J. (2012). *Manual de gestão pública contemporânea*. Sao Paulo: Atlas. Obtenido de IESDE: www.iesde.com.br
- Mayor of London. (Octubre de 2019). *CENTRAL LONDON ULTRA LOW EMISSION ZONE – SIX MONTH REPORT*. Obtenido de Mayor of London: https://www.london.gov.uk/sites/default/files/ulez_six_month_evaluation_report_oct_19.pdf
- Mayoral, A. (2017). *Análisis Gage R&R*. Obtenido de R-Studio: <https://rpubs.com/asunmayoral/329339>
- Milosevic, D., Djuric, M., Filipovic, J., & Ristic, S. (2013). Benchmarking as a Quality Management Tool in Public Administration. *Engineering Economics*, 364-372.
- MIT. (2015). *Experimental Design*. Obtenido de Statistics for Research Projects: <http://www.mit.edu/~6.s085/notes/lecture7.pdf>
- MoreSteam. (s.f.). *Measurement System Analysis (MSA)*. Obtenido de MoreSteam: <https://www.moresteam.com/toolbox/measurement-system-analysis.cfm>
- Moyado, F. (06 de Julio de 2011). Gobernanza y calidad en la administración pública. *Estudios Gerenciales*, 205-223.
- Munir, S., Mayfield, M., Coca, D., Jubb, S., & Osammor, O. (22 de Enero de 2019). *Analysing the performance of low-cost air quality sensors, their drivers, relative benefits and calibration in cities—a case study in Sheffield*. Obtenido de Environmental Monitoring and Assessment: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6343017/>
- National Institute of Environmental Health Sciences. (11 de Febrero de 2020). *Air Pollution*. Obtenido de National Institute of Environmental Health Sciences: <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/air-pollution/index.cfm>

National Oceanic and Atmospheric Administration's. (25 de Junio de 2009). *Weather*.
Obtenido de National Weather Service:
<https://w1.weather.gov/glossary/index.php?word=weather>

ONU Habitat. (noviembre de 2019). *Guía Metodológica: Estrategia municipal de gestión integral de riesgos de desastres*. Obtenido de Publicaciones ONU Habitat:
<https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/Gu%C3%ADa-Metodol%C3%B3gica-EMGIRDE.pdf>

Organization for Economic Co-operation and Development. (31 de Octubre de 2001). *Air Pollution*. Obtenido de Glossary of Statistical Terms:
<https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=86>

Polidori, A., Papapostolou, V., & Zhang, H. (Agosto de 2016). *Laboratory Evaluation of Low-Cost Air Quality Sensors*. Obtenido de Air Quality Sensor Performance Evaluation Center: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/protocols/sensors-lab-testing-protocol6087afefc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf>

Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). *Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect*. Obtenido de Journal of the Air & Waste Management Association, 56(6), 709–742.: <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>

Pratik, D., Sandip, M., & De, P. (2004). Opencast mining impact. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 235-250.

Public Health England. (Marzo de 2019). *Review of interventions to improve outdoor air quality and public health*. Obtenido de United Kingdom Government:
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/795185/Review_of_interventions_to_improve_air_quality.pdf

Quinn, G., & Keough, M. (2002). *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. New York: Cambridge University Press.

Russo, A., Raischel, F., & Lind, P. G. (2013). Air quality prediction using optimal neural networks with stochastic variables. *Atmospheric Environment*, 822-830.

Sampaio, A., & Romero, A. (2017). Modelo y procedimiento para la calidad de la gestión en municipios pequeños de Brasil. *Ingeniería Industrial*, 93-105.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Calidad del aire: Una práctica de vida*. Obtenido de Semarnat:

<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Estrategia Nacional de Calidad del Aire*. Obtenido de SEMARNAT: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195809/Estrategia_Nacional_Calidad_del_Aire.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (1 de Marzo de 2017). *Estrategia Nacional de Calidad del Aire 2017 - 2030*. Obtenido de Gobierno de México: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195809/Estrategia_Nacional_Calidad_del_Aire.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (16 de Junio de 2018). *Fuentes de Contaminación Atmosférica*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica>

Sedighi, Z., Lu, L., Megahed, F., & Cavuoto, L. (2019). A DMAIC Perspective on Physical Fatigue Management. *Professional Safety*, 26-27.

SEMADET. (2008). *Informe de Calidad del Aire Reporte 2008*. Obtenido de SEMADET: <http://siga.jalisco.gob.mx/aire/reportes/ReporteAire2008.pdf>

SEMADET. (2009). *Informe de Calidad del Aire Reporte 2009*. Obtenido de SEMADET: <http://siga.jalisco.gob.mx/aire/reportes/ReporteAire2009.pdf>

SEMADET. (2010). *Informe de Calidad del Aire Reporte 2010*. Obtenido de SEMADET: <http://siga.jalisco.gob.mx/aire/reportes/ReporteAire2010.pdf>

SEMADET. (2011). *Informe de la Calidad del Aire Reporte 2011*. Obtenido de SEMADET: <http://siga.jalisco.gob.mx/aire/reportes/ReporteAire2011.pdf>

SEMADET. (2012). *Informe Anual de Monitoreo de Calidad del Aire 2012*. Obtenido de SEMADET: <http://siga.jalisco.gob.mx/aire/reportes/ReporteAire2012.pdf>

SEMADET. (2014a). *ProAire Jalisco 2014-2020*. Obtenido de Gobierno de México: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/418381/13_ProAire_Jalisco.pdf

SEMADET. (2014b). *Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del Estado de Jalisco 2008*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2019, de SEMADET: https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/inventario_de_emisiones_cc_jalisco_2008.pdf

- SEMADET. (2015a). *Informe de calidad del aire 2015*. Obtenido de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial: <http://siga.jalisco.gob.mx/aire/reportes/ReporteAire2015.pdf>
- SEMADET. (2015b). *Datos Históricos*. Obtenido de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial: siga.jalisco.gob.mx/aire/reportes/datos_2015.xlsx
- SEMADET. (2016). *Datos Históricos*. Obtenido de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial: siga.jalisco.gob.mx/aire/reportes/datos_2016.xlsx
- SEMADET. (2017). *Datos Históricos*. Obtenido de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial: siga.jalisco.gob.mx/aire/reportes/datos_2017.xlsx
- SEMADET. (2018). *Datos Históricos*. Obtenido de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial: siga.jalisco.gob.mx/aire/reportes/datos_2018.xlsx
- Slini, T., Karatzas, K., & Moussiopoulos, N. (2003). Correlation of air pollution and meteorological data using neural networks. *Journal of environment and pollution*, https://www.researchgate.net/publication/236132986_Correlation_of_air_pollution_and_meteorological_data_using_Neural_Networks.
- Small, C., Okujeni, A., van der Linden, S., & Waske, B. (2018). *Remote Sensing of Urban Environment*. Obtenido de Comprehensive Remote Sensing: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012409548910380X>
- Sonmezturk, B., & Karaman, A. (2019). Analysis of the Relationship between Strategic Planning and Total Quality Management. *Cag University Journal of Social Sciences*, 1-19.
- Tamas, W., C29Notton, G., Paoli, C., Voyant, C., Laure, M., & Balu, A. (2014). Urban Ozone Concentration Forecasting with Artificial Neural Network in Corsica. *Mathematical Modeling in Civil Engineering*, https://www.researchgate.net/publication/237053782_Urban_ozone_concentration_forecasting_with_artificial_neural_network_in_Corsica.
- Tol, R. (Noviembre de 2006). *INTEGRATED ASSESSMENT MODELLING*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/226158799_Integrated_Assessment_Modelling

- Tomažević, N., Seljak, J., & Aristovnik, A. (2016). TQM in public administration organisations: an application of data envelopment analysis in the police service. *Total Quality Management & Business Excellence*, 1396-1412.
- United States Environmental Protection Agency. (2 de Agosto de 2016). *Climate Change Indicators*. Obtenido de EPA: <https://www.epa.gov/climate-indicators/weather-climate>
- Vedrenne, M., Borge, R., Lumbreras, J., & Encarnación, M. (2013). Advancements in the design and validation of an air pollution integrated assessment model for Spain. *Environmental Modelling & Software*, 177-191.
- Verhoeven, G. (Octubre de 2018). *Resolving some spatial resolution issues – Part 1: Between line pairs and sampling distance*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/328353906_Resolving_some_spatial_resolution_issues_-_Part_1_Between_line_pairs_and_sampling_distance
- Vitantzakis, N. (1995). ALTERNATIVE STRATEGIES AND METHODOLOGIES FOR THE INTRODUCTION OF TQM TO PUBLIC ADMINISTRATION. *Public Productivity Through Quality & Strategic Management*, 55-60.
- Webster's New World College Dictionary. (2010). *Weather*. Obtenido de Collins: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/weather>
- Weyant, J., Davidson, O., Dowlatabadi, H., Edmonds, J., Grubb, M., Parson, E., . . . Tol, R. (1996). Integrated Assessment of Climate Change: An Overview and Comparison of Approaches and Results. *Economic and Social Dimensions of Climate Change*, 371-393.
- World Bank & The Ministry of Environmental Protection. (Junio de 2012). *Integrated Air Pollution Management in China*. Obtenido de World Bank: <http://documents1.worldbank.org/curated/en/935581468261898052/pdf/707530ESW0P1080eb00602601200PUBLIC0.pdf>
- World Health Organization. (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. Obtenido de WHO: <https://www.who.int/phe/publications/air-pollution-global-assessment/en/>
- World Health Organization. (2019). *Ten threats to global health in 2019*. Obtenido de WHO: <https://www.who.int/emergencies/ten-threats-to-global-health-in-2019>

- World Health Organization. (s.f.). *Air Pollution*. Obtenido de World Health Organization Africa: <https://www.afro.who.int/health-topics/air-pollution>
- World Meteorological Organization. (Mayo de 2018). *Low-cost sensor for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications*. Obtenido de World Meteorological Organization: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9881
- Wrzochal, M., & Adamczak, S. (Enero de 2019). *Application of a Gage R&R study in evaluation of rolling bearing measurement system accuracy*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/334778732_Application_of_a_Gage_RR_study_in_evaluation_of_rolling_bearing_measurement_system_accuracy
- Yale. (1997). *Experimentation*. Obtenido de Yale: <http://www.stat.yale.edu/Courses/1997-98/101/expdes.htm>
- Zainuri, N., Jemain, A., & Muda, N. (2015). *A Comparison of Various Imputation Methods for Missing Values in Air Quality Data*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/281211569_A_Comparison_of_Various_Imputation_Methods_for_Missing_Values_in_Air_Quality_Data
- Zheng, T., Bergin, M., Johnson, K., Tripathi, S., Shirdokar, S., Landis, M., . . . Carlson, D. (22 de Agosto de 2018). *Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments*. Obtenido de Atmospheric Measurement Techniques: <https://amt.copernicus.org/articles/11/4823/2018/>

8. Anexos

8.1. Anexo A – Glosario de términos

Contaminación atmosférica

Definición:

La contaminación atmosférica es la presencia de agentes químicos, físicos o biológicos que no se dispersan correctamente y que modifican las características naturales de la atmósfera al interior de los edificios o al aire libre, produciendo impactos a la salud, en el ambiente y la propiedad. (Elaboración propia)

Otras fuentes consultadas:

Presencia de contaminantes en la atmosfera, tales como polvo, gases o humo en cantidades y durante periodos de tiempo tales que resultan dañinos para los seres humanos, la vida silvestre y la propiedad. Estos contaminantes pueden ser de origen natural o producidos por el hombre directa o indirectamente. (Ayuntamiento de Guadalajara, 2016)

La polución del aire es la contaminación interior y exterior del ambiente por cualquier agente químico, físico o biológico que modifique las características de la atmósfera. La combustión de dispositivos en hogares, vehículos automotores, instalaciones industriales e incendios forestales son fuentes comunes de polución del aire (World Health Organization, s.f.).

La contaminación el aire es una mezcla de sustancias naturales y antropogénicas en el aire que respiramos. Comúnmente se separa en dos categorías: contaminación del aire interna y externa (National Institute of Environmental Health Sciences, 2020).

Emissiones

Definición:

Descarga de contaminantes a la atmósfera, provenientes de chimeneas y otros conductos de escape, de las áreas industriales, comerciales y residenciales, así como de los vehículos automotores, locomotoras o escapes de aeronaves y barcos. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017)

Fuentes de contaminación atmosférica

Definición:

Son todas aquellas actividades, procesos u operaciones capaces de producir contaminantes del aire. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018)

Otras fuentes consultadas:

Los diferentes contaminantes liberados a la atmósfera proceden de fuentes muy diversas, como la industria, el transporte, la agricultura, el tratamiento de residuos y las viviendas particulares. Algunos contaminantes atmosféricos también proceden de fuentes naturales (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2019).

Resolución espacial

Definición:

La resolución espacial se refiere a la distancia mínima (Δx) en la que se pueden representar objetos de forma coherente. (Elaboración propia)

Otras fuentes consultadas:

La resolución espacial es la medición del objeto más pequeño que puede ser identificado por un sensor, o el área de tierra capturada por el campo de visión instantáneo de un sensor, o la dimensión lineal de terreno representada por cada píxel (Liang, Li, & Wang, 2012).

La resolución espacial (o tamaño de celda horizontal) es el área geográfica de una medición en el suelo desde donde se origina la radiación ascendente (Leslie, 2018).

La resolución espacial de un sensor de imagen determina el tamaño del objeto más pequeño que puede capturar de forma coherente (Small, Okujeni, van der Linden, & Waske, 2018).

La resolución espacial se refiere a la distancia mínima entre dos puntos que se pueden capturar en una imagen (Verhoeven, 2018).

Condiciones meteorológicas

Definición:

Se refiere a las condiciones atmosféricas en un momento y periodo específico. (Elaboración propia)

Otras fuentes consultadas:

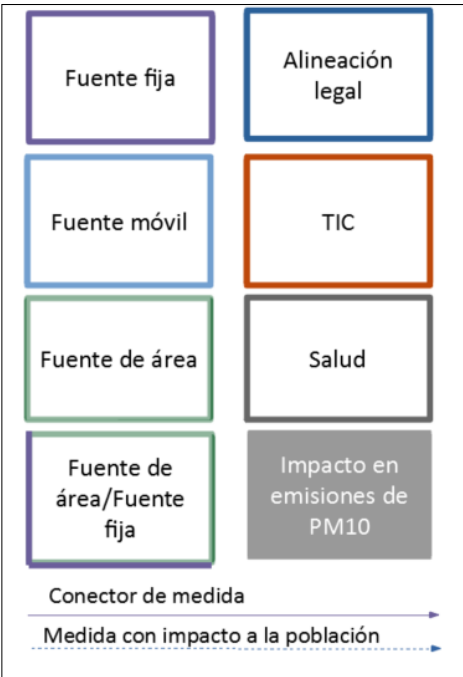
Es del estado de la atmósfera en un momento y tiempo específicos (United States Environmental Protection Agency, 2016).

Condición general de la atmósfera en un tiempo y lugar particular, en relación con la temperatura, humedad, nubosidad, etc. (Webster's New World College Dictionary, 2010).

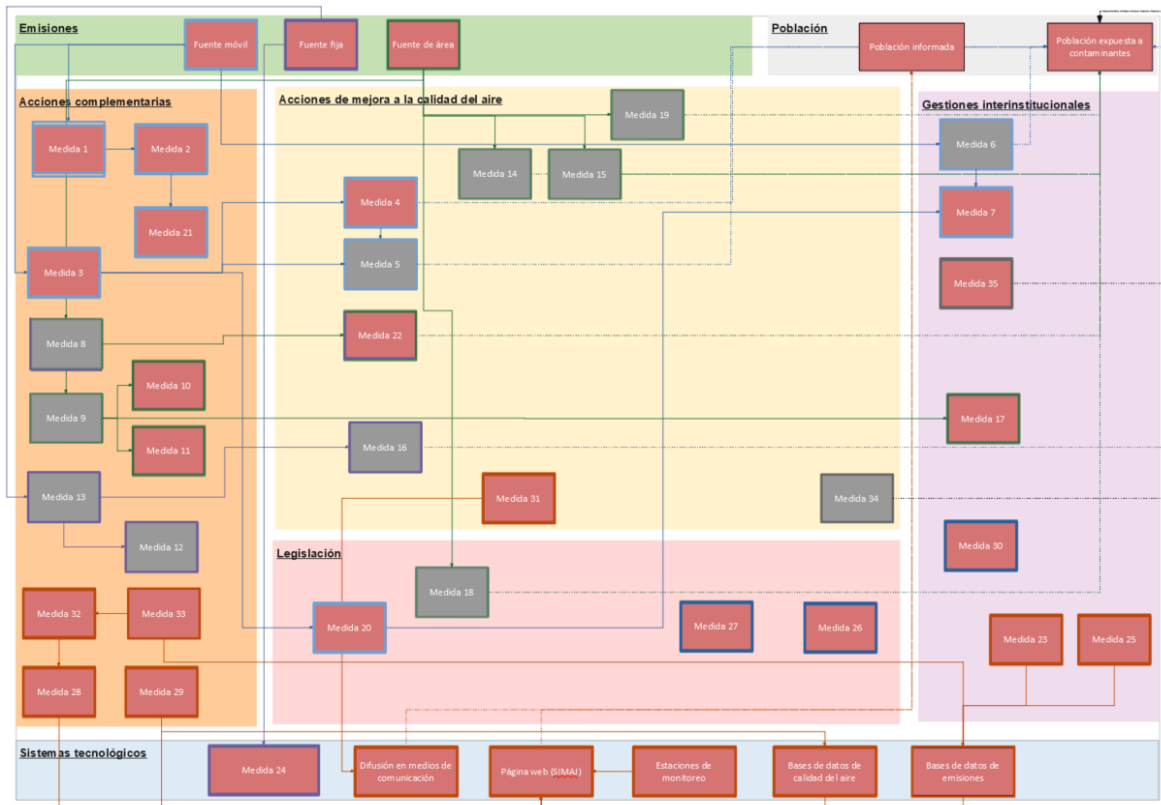
Se refiere a las condiciones en un punto y tiempo específicos (National Oceanic and Atmospheric Administration's, 2009).

8.2. Anexo B – BPM ProAire 2014 – 2020

En el BPM se muestran colores en las agrupaciones de acuerdo con la Clasificación presentada en la Tabla 6. En la siguiente Figura se muestra la simbología utilizada en el BPM. Los colores alrededor de los recuadros representan el Impacto que tiene la medida, el relleno del recuadro (gris o ladrillo claro) establece si la medida se relaciona con la emisión y control de PM₁₀ u otros contaminantes. Por último, las líneas son del color de la clasificación de la medida y son continuas cuando son conectores entre medidas o punteadas cuando la medida impacta a la población.



Representación de elementos del BPM



BMP del ProAire 2014-2020

En el BPM se estableció en la parte superior a la población como los clientes de una política pública enfocada a mejorar la calidad del aire (que genera impactos positivos en su salud). La población se dividió en población expuesta a contaminantes y población informada. En ambos casos, el cliente es el mismo (la población total) pero con facetas distintas. Una es la exposición inevitable a contaminantes (pero que se puede mitigar) y la otra es la información que tiene la ciudadanía para la toma de decisiones respecto a sus actividades y la calidad del aire.

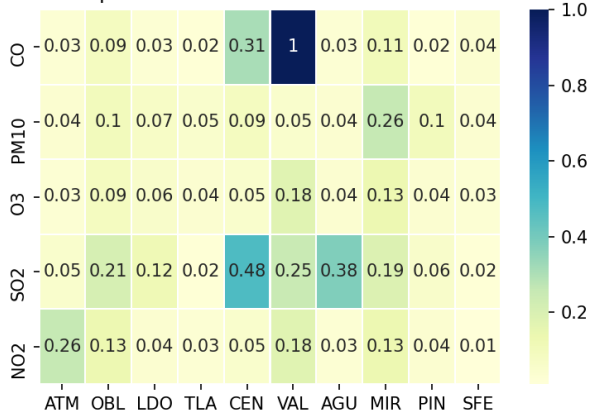
Por otro lado, en la parte superior también se colocaron las fuentes de emisión como las detonadoras de las medidas y que serán impactadas por estas. Además de las 35 medidas estipuladas en el ProAire, se identificaron algunos otros puntos relevantes que son parte implícita de las medidas planteadas (estas en los sistemas tecnológicos). Durante la

elaboración del BPM solo se identificaron 3 medidas “desarticuladas” de otras o sin un impacto directo a la población. Sin embargo, se considera que también son relevantes ya que se enfocan en la actualización de planes y programas o el establecimiento de un Comité de implementación del ProAire.

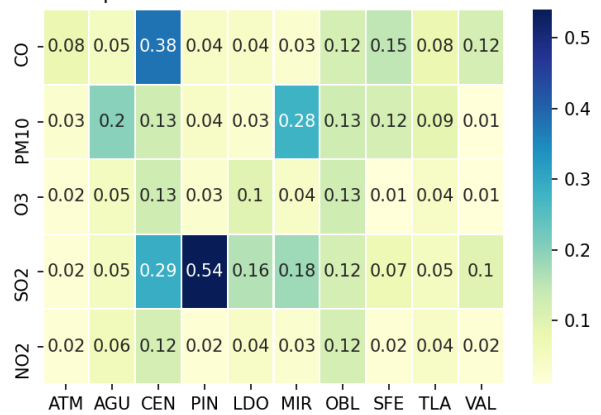
Dentro de las medidas, se identificaron 11 que impactaban a la población (informada o expuesta) y 2 de los componentes propuestos en el presente estudio, para un total de 13 impactos. A su vez, se identificaron 12 medidas relacionadas con la reducción de emisiones de material particulado, aplicable a las 3 fuentes de emisión e incluso a 1 medida de salud. De las medidas relacionadas con PM₁₀, 7 impactan directamente a la población expuesta. A partir del BPM se logra identificar un programa complejo que impacta diversas causas y que con una visión orientada al impacto de los clientes.

8.3. Anexo C – Análisis de agrupaciones inválidas para rangos de 24 horas para cada contaminante, por estación y por año.

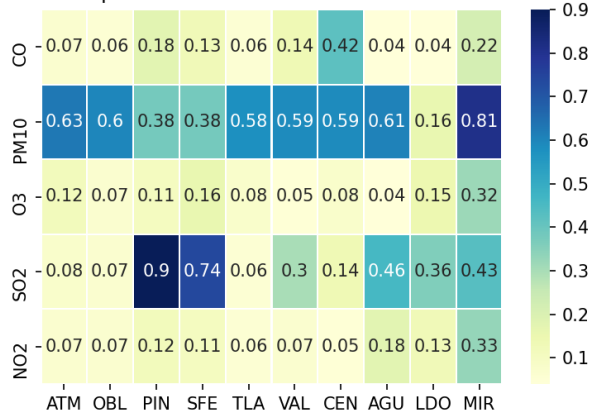
Valores no promediados por estaciones para un intervalo de 24h en 2014



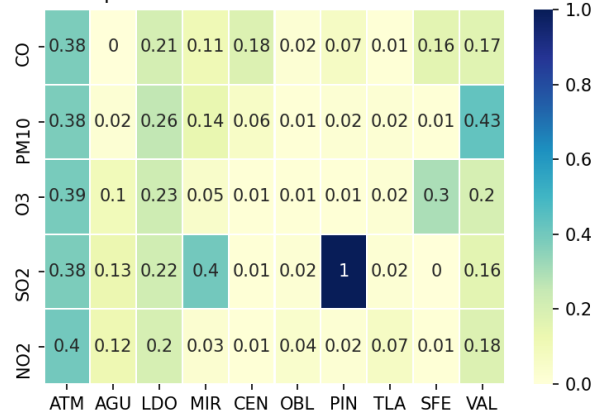
Valores no promediados por estaciones para un intervalo de 24h en 2015



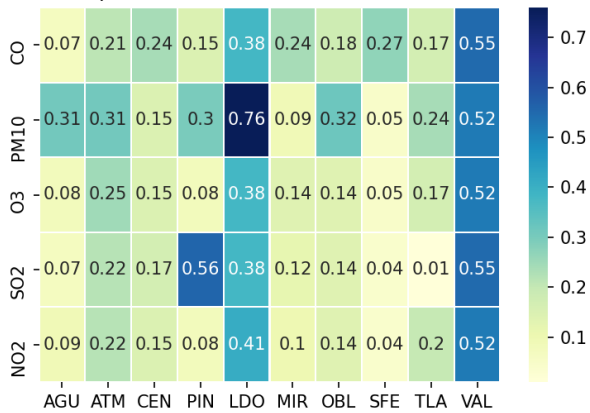
Valores no promediados por estaciones para un intervalo de 24h en 2016



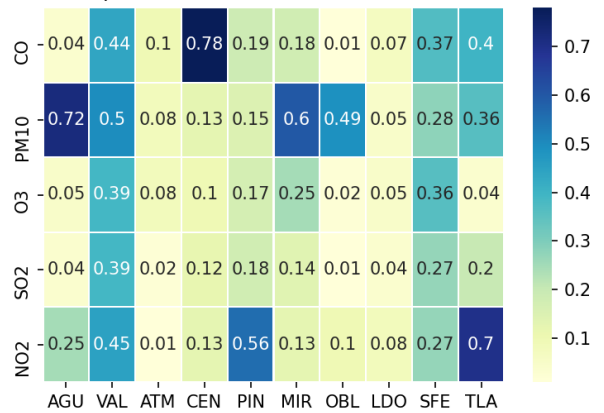
Valores no promediados por estaciones para un intervalo de 24h en 2017



Valores no promediados por estaciones para un intervalo de 24h en 2018



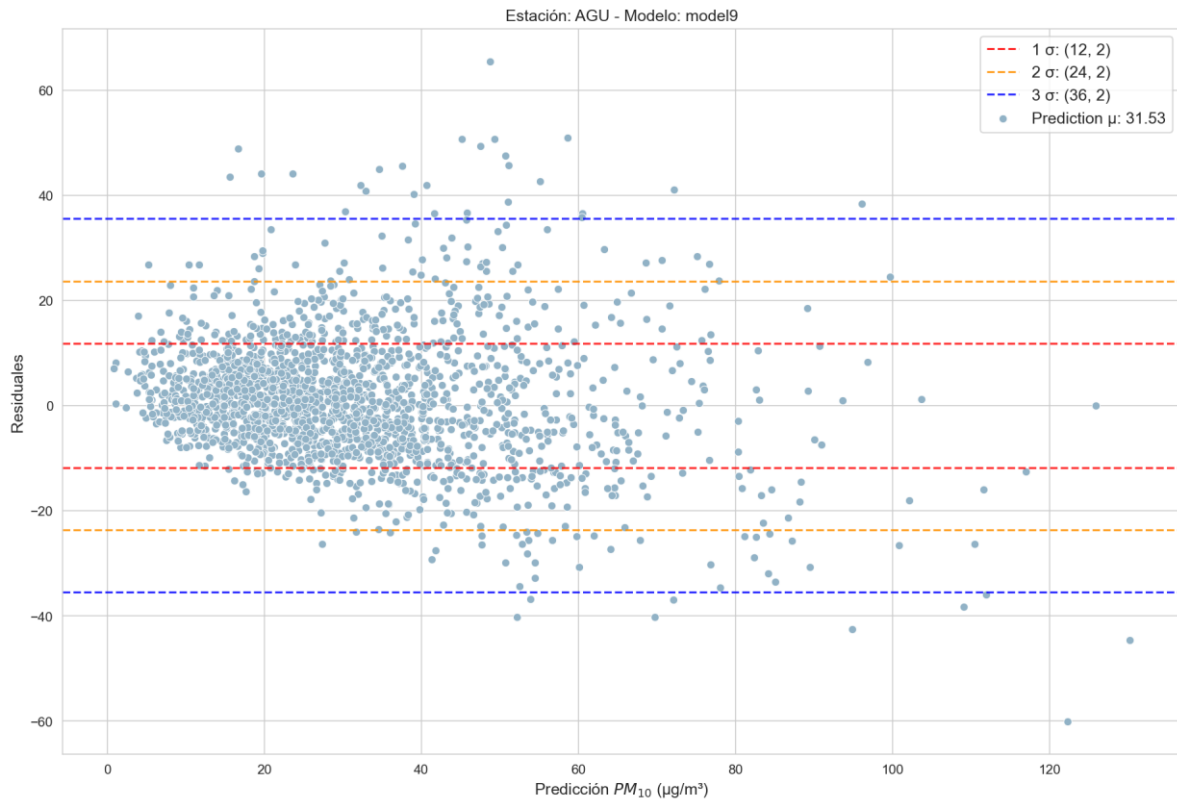
Valores no promediados por estaciones para un intervalo de 24h en 2019



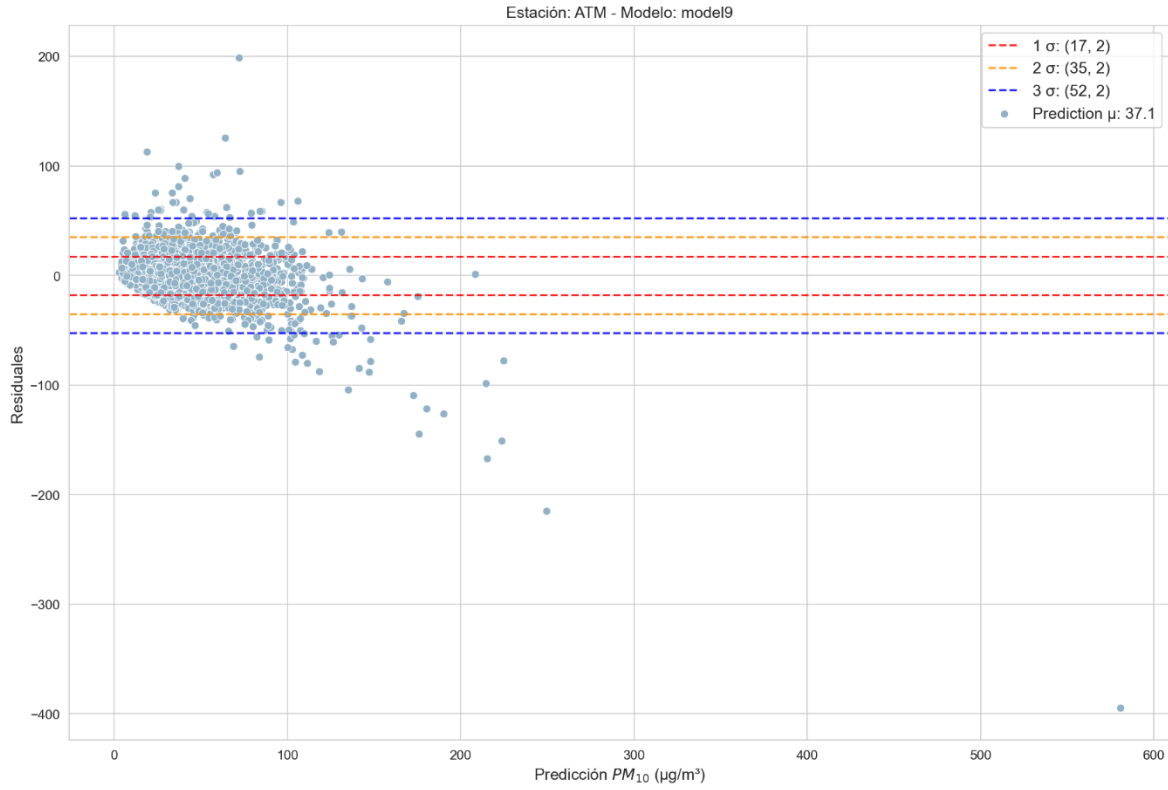
Análisis de agrupaciones inválidas por año, estación y contaminante

8.4. Anexo D - Dispersión de residuales para las redes neuronales espaciales

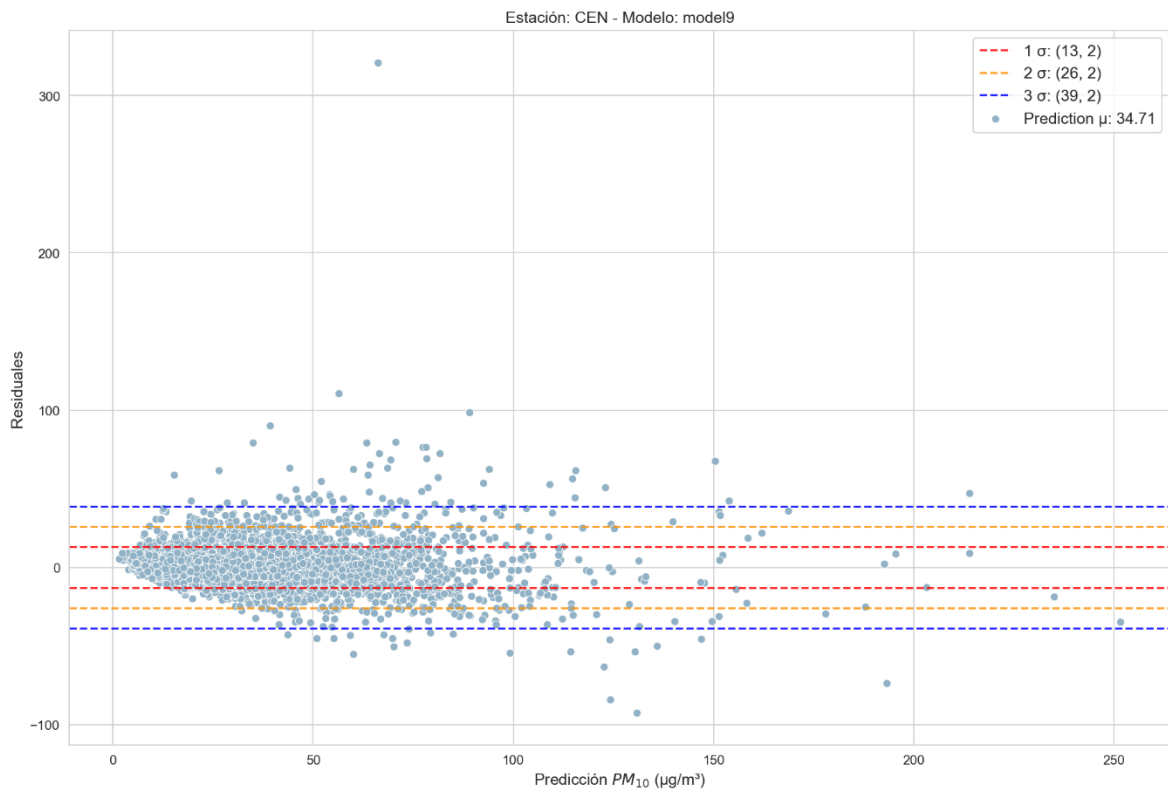
8.4.1. Modelo 1



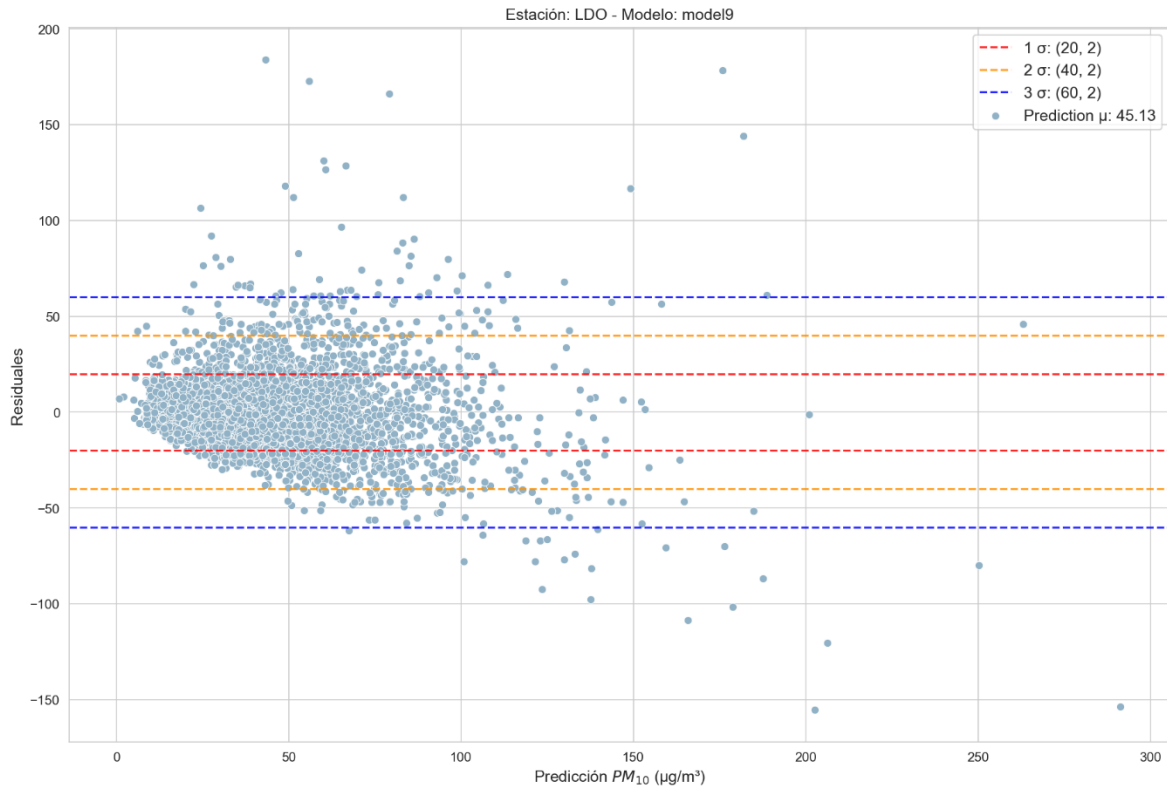
Águilas – Modelo 1



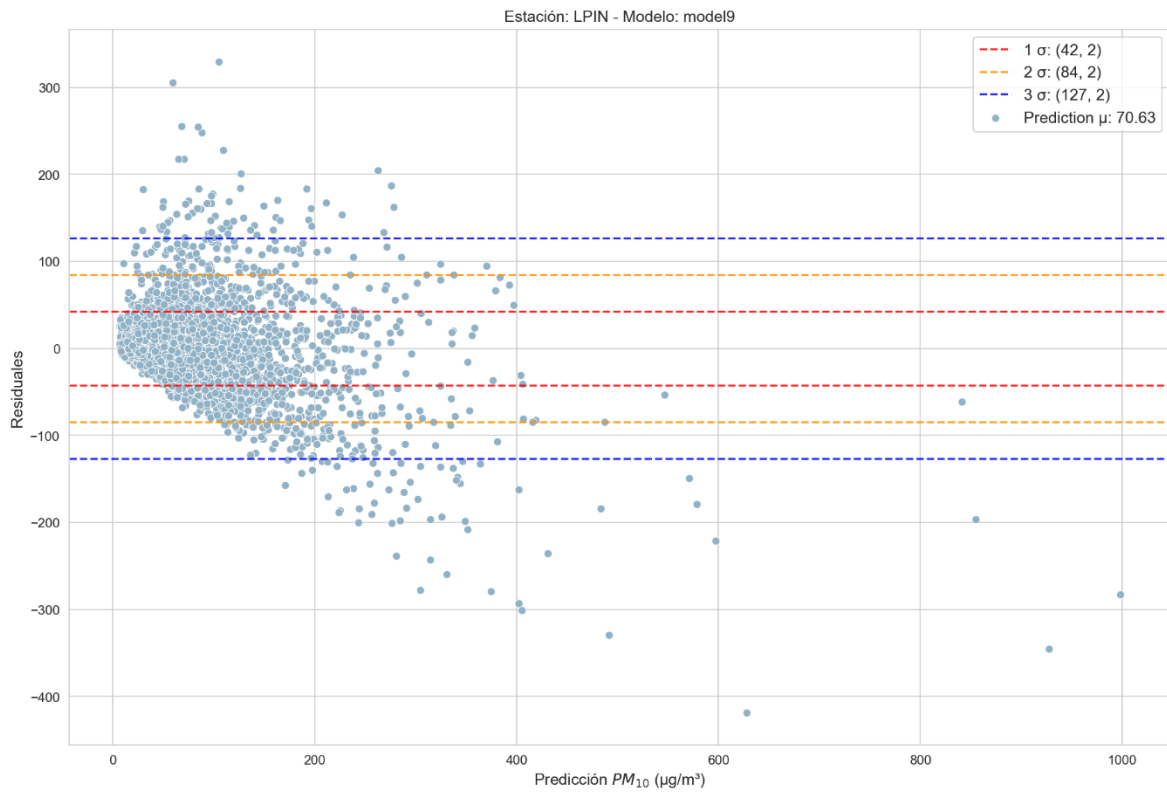
Atemajac – Modelo 1



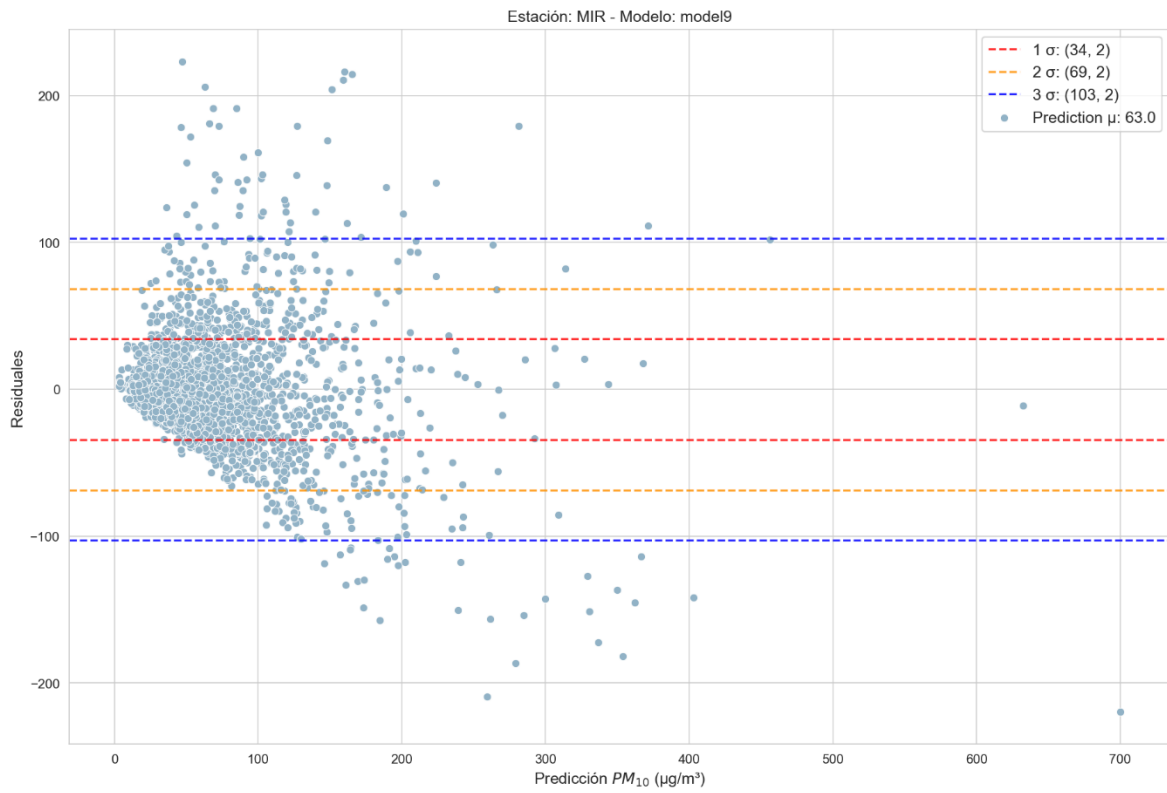
Centro – Modelo 1



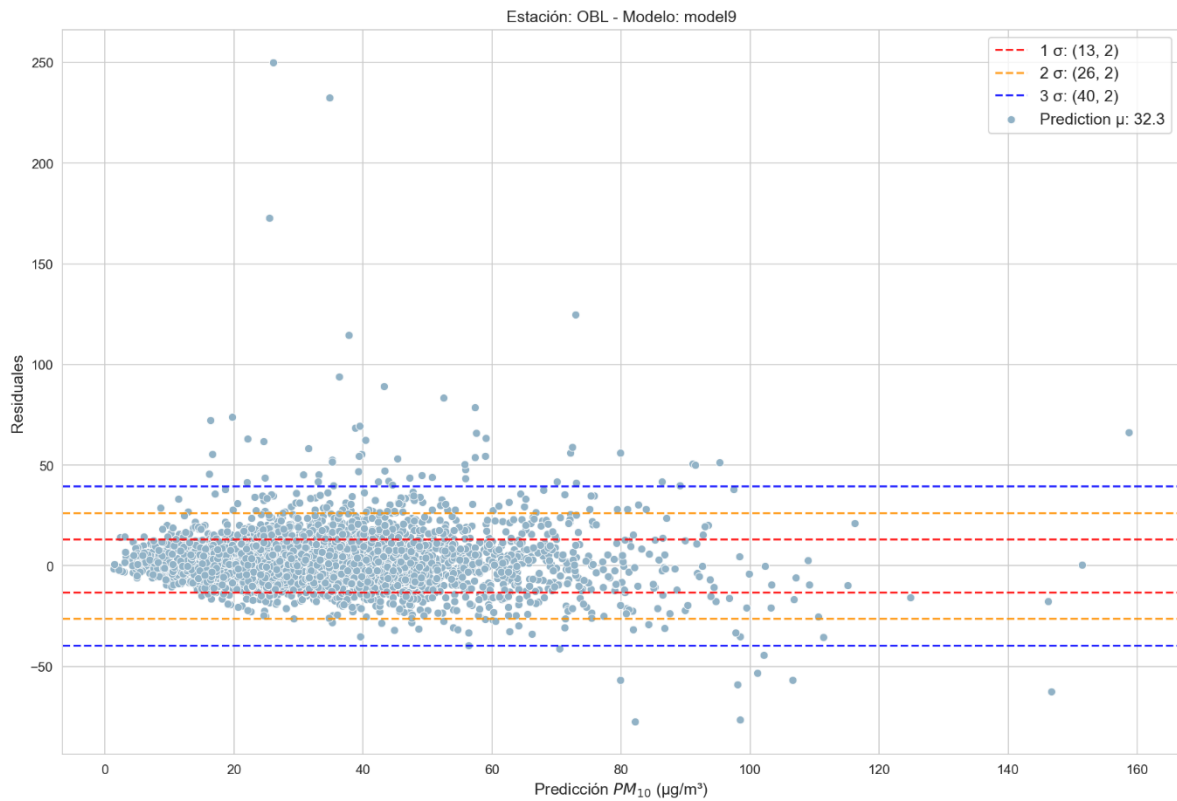
Loma Dorada – Modelo 1



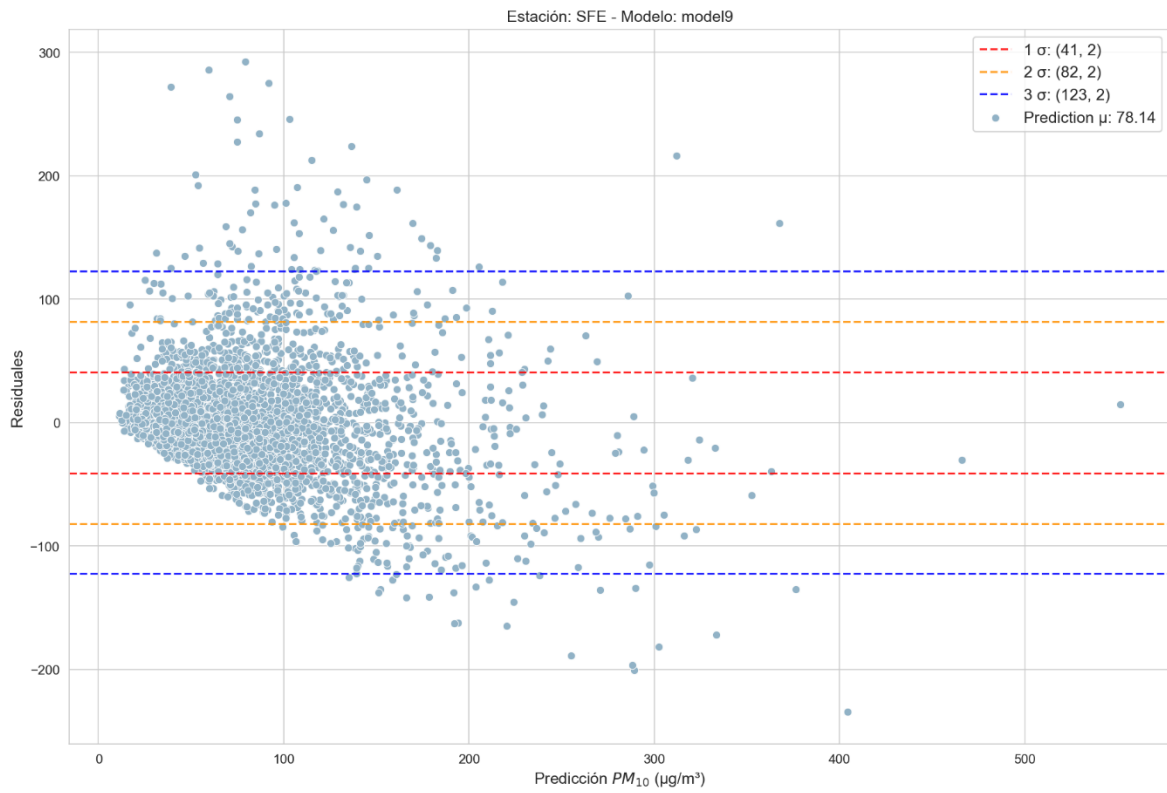
Las Pintas – Modelo 1



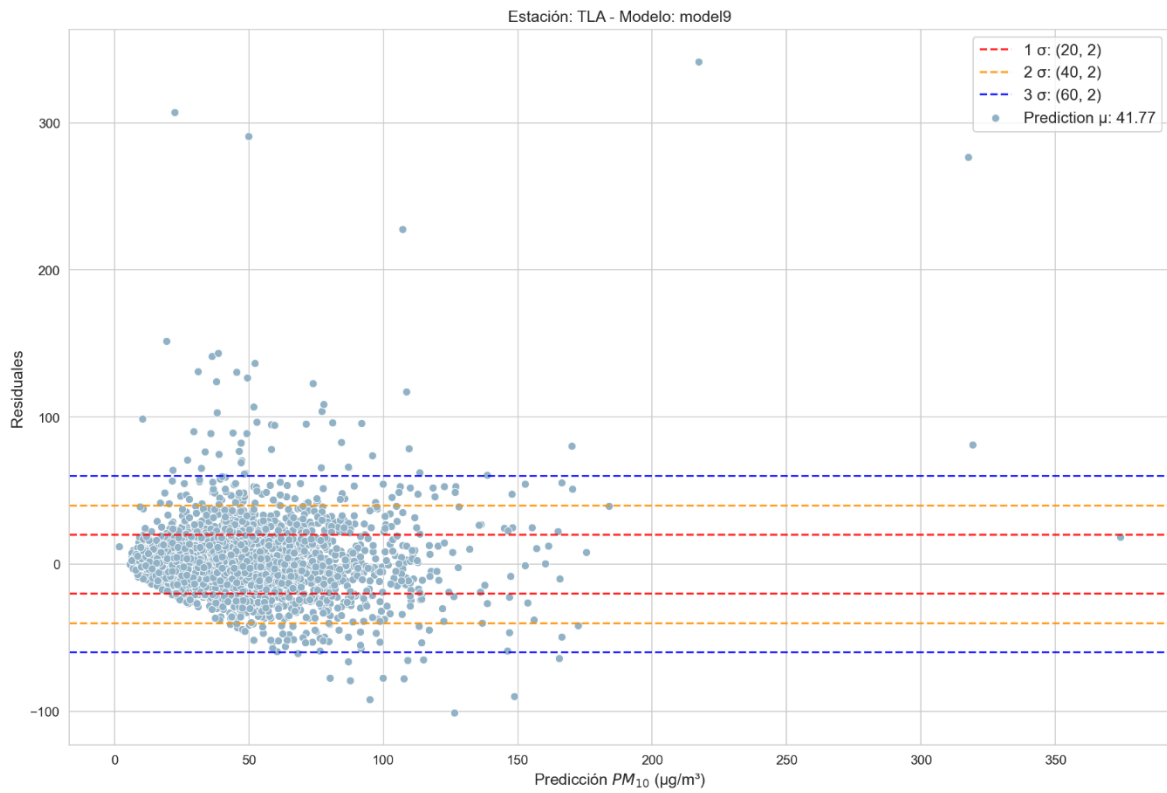
Miravalle – Modelo 1



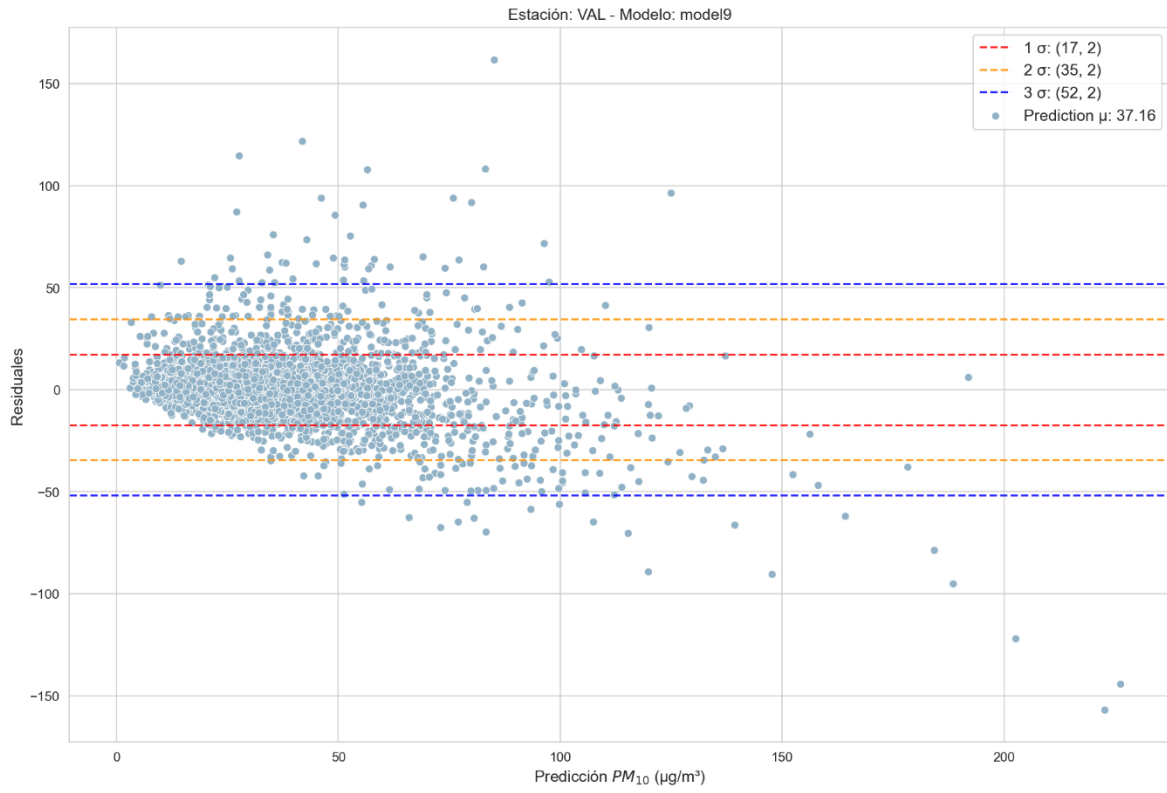
Oblatos – Modelo 1



Santa Fe – Modelo 1

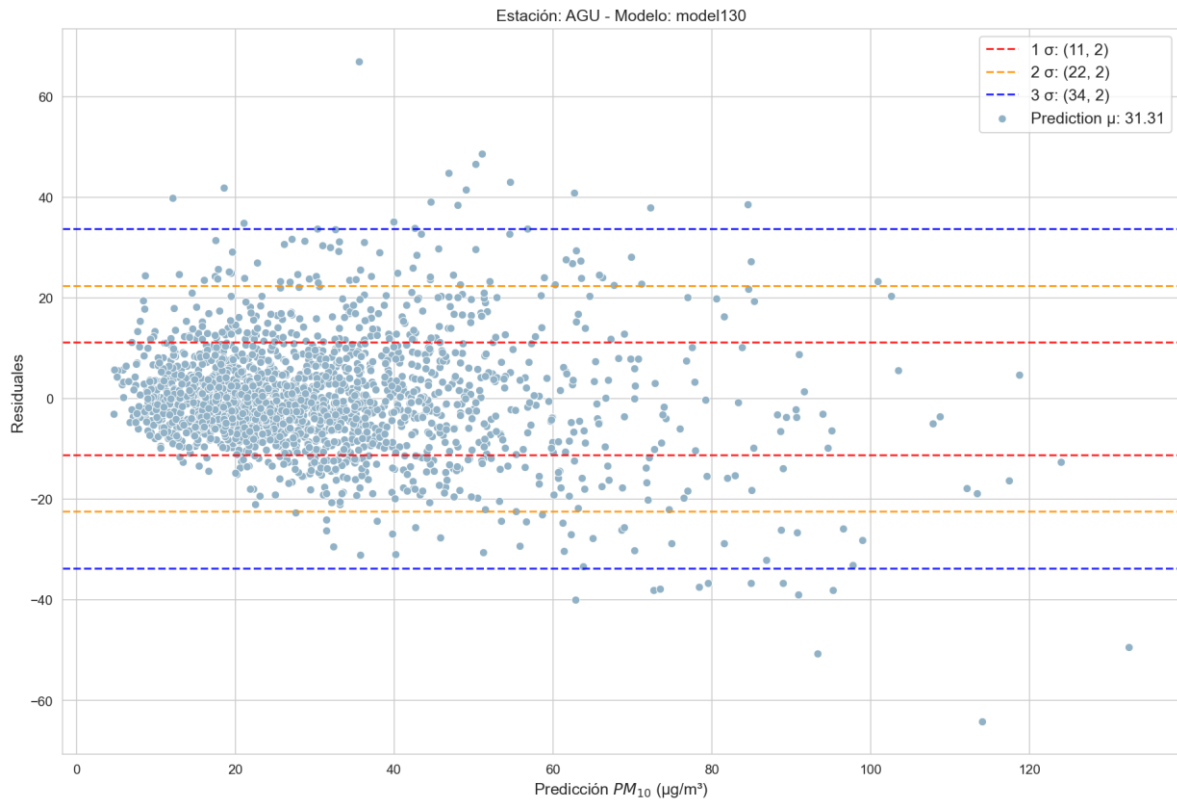


Tlaquepaque – Modelo 1

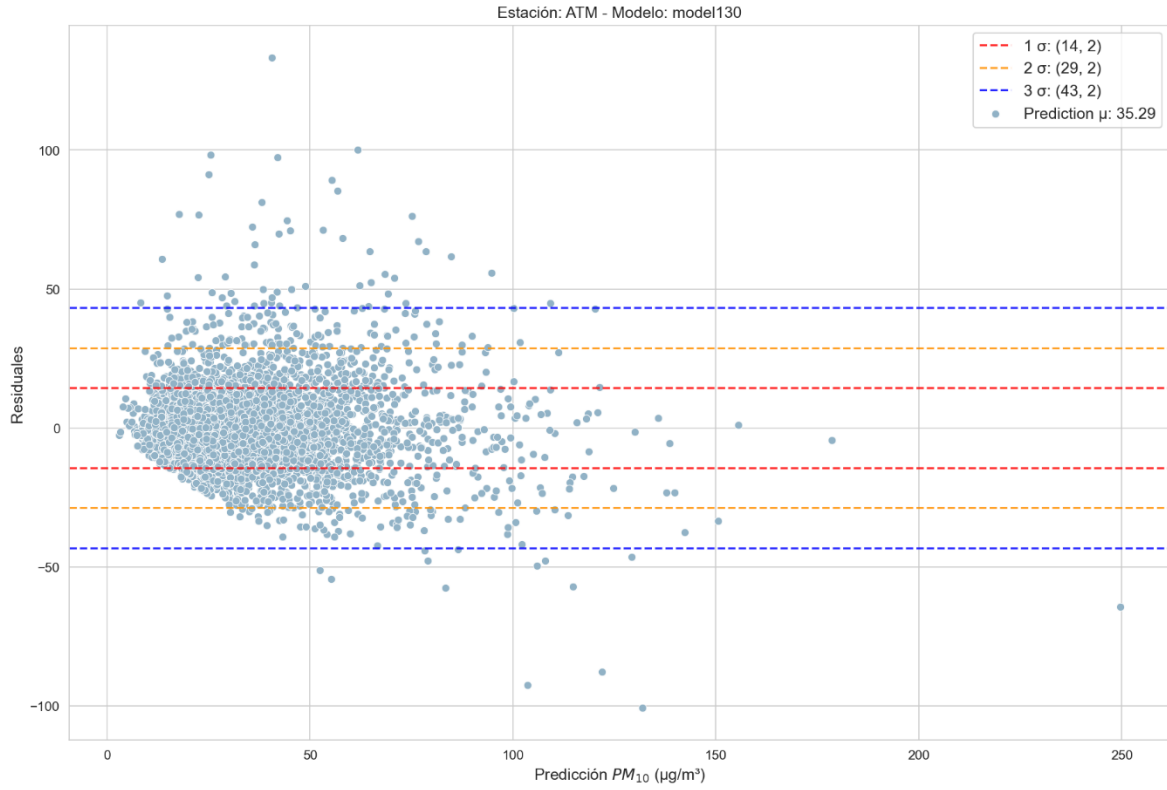


Vallarta – Modelo 1

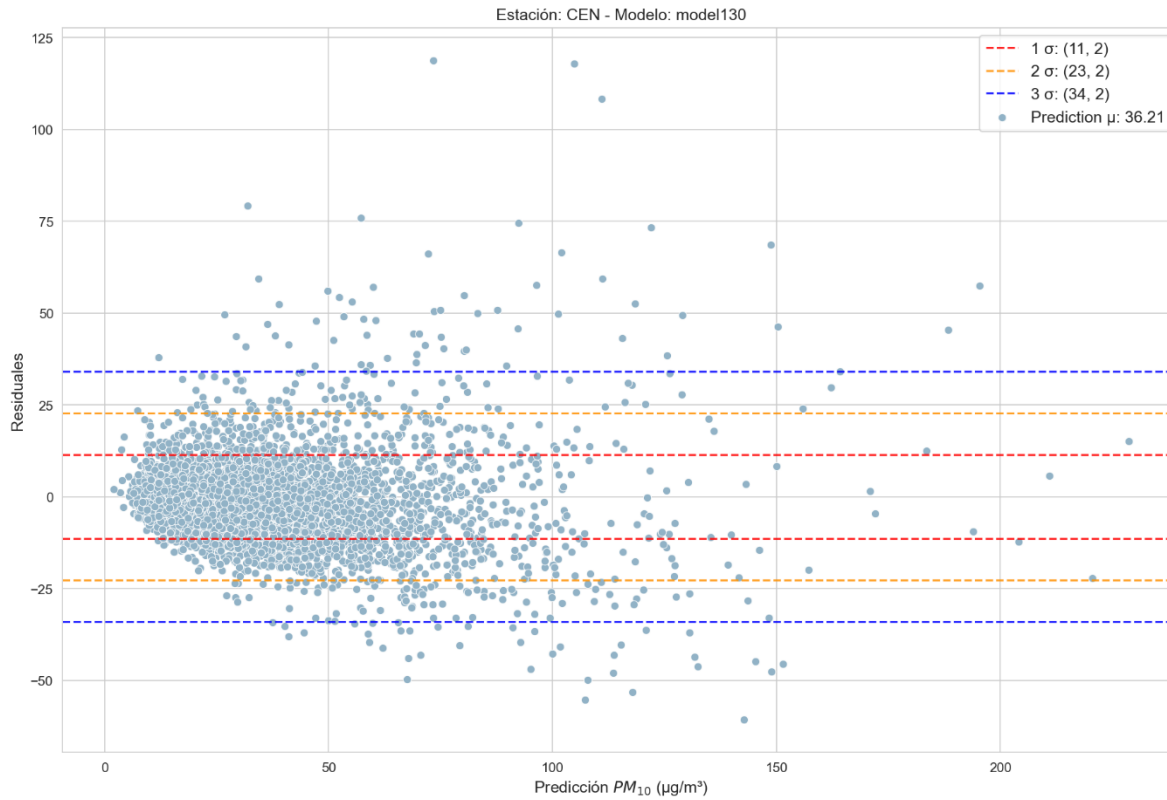
8.4.2. Modelo 2



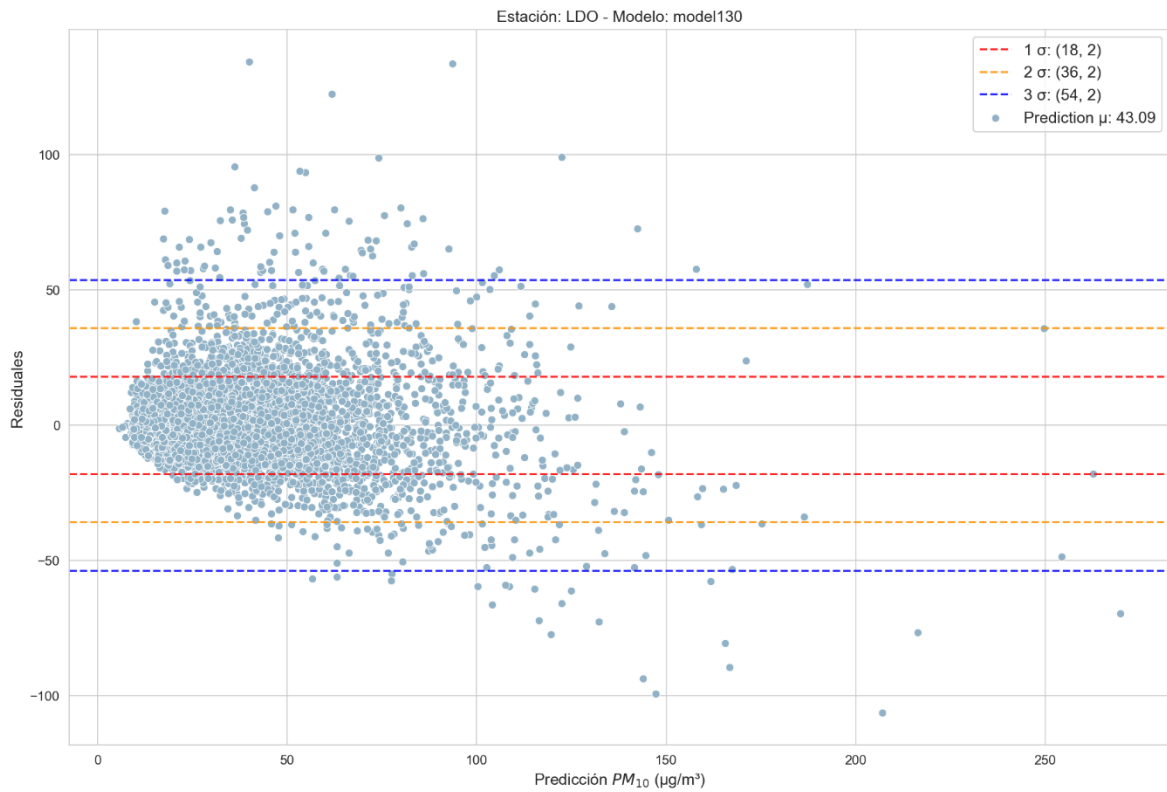
Águilas – Modelo 2



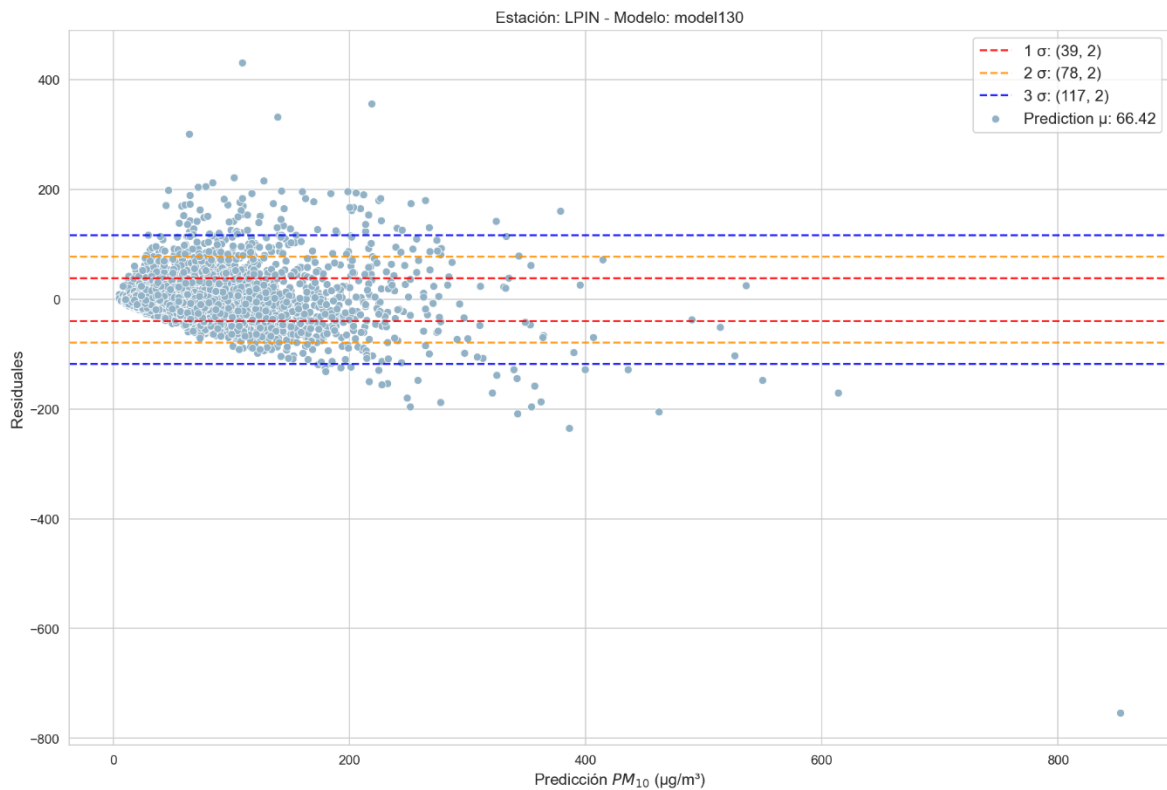
Atemajac – Modelo 2



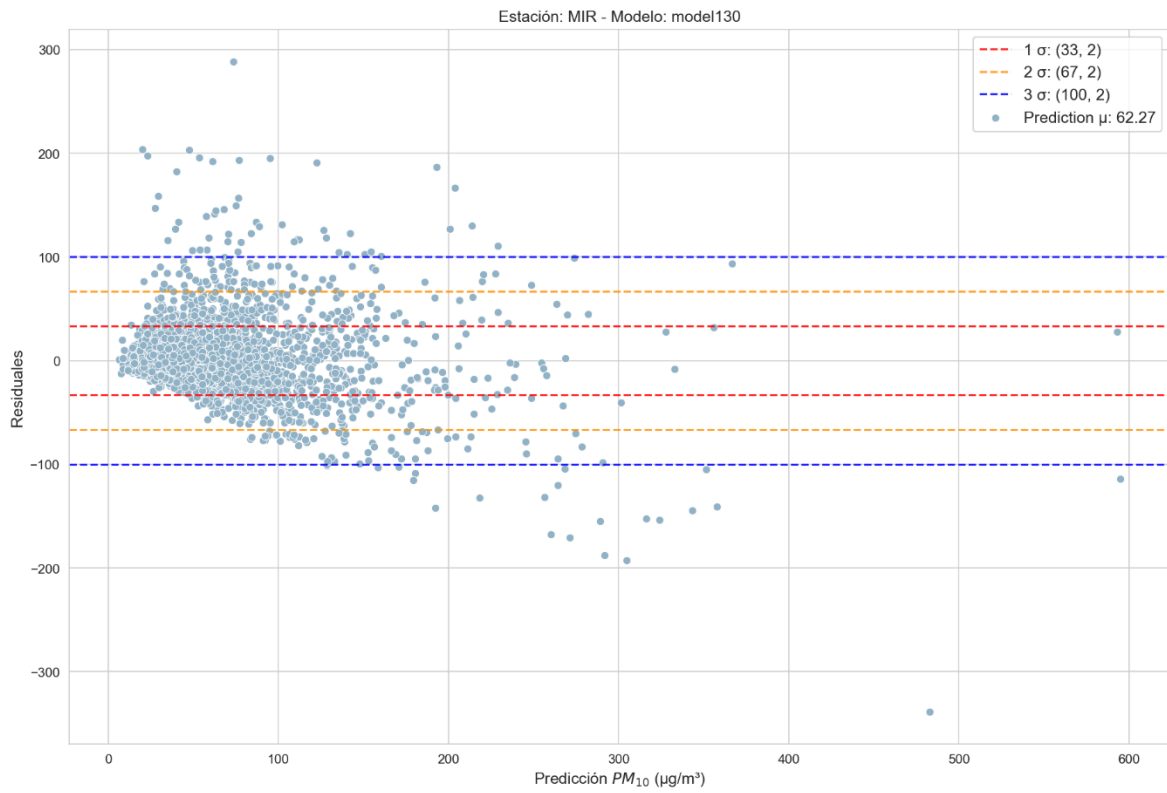
Centro – Modelo 2



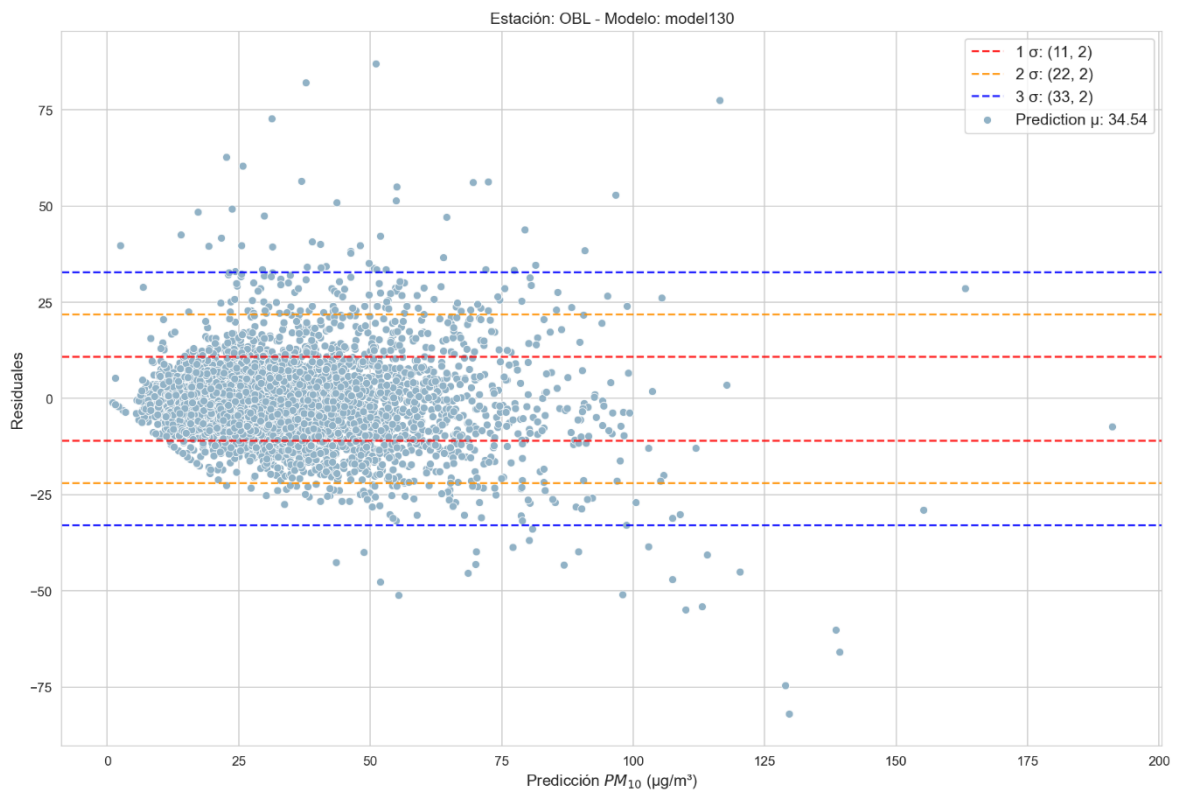
Loma Dorada – Modelo 2



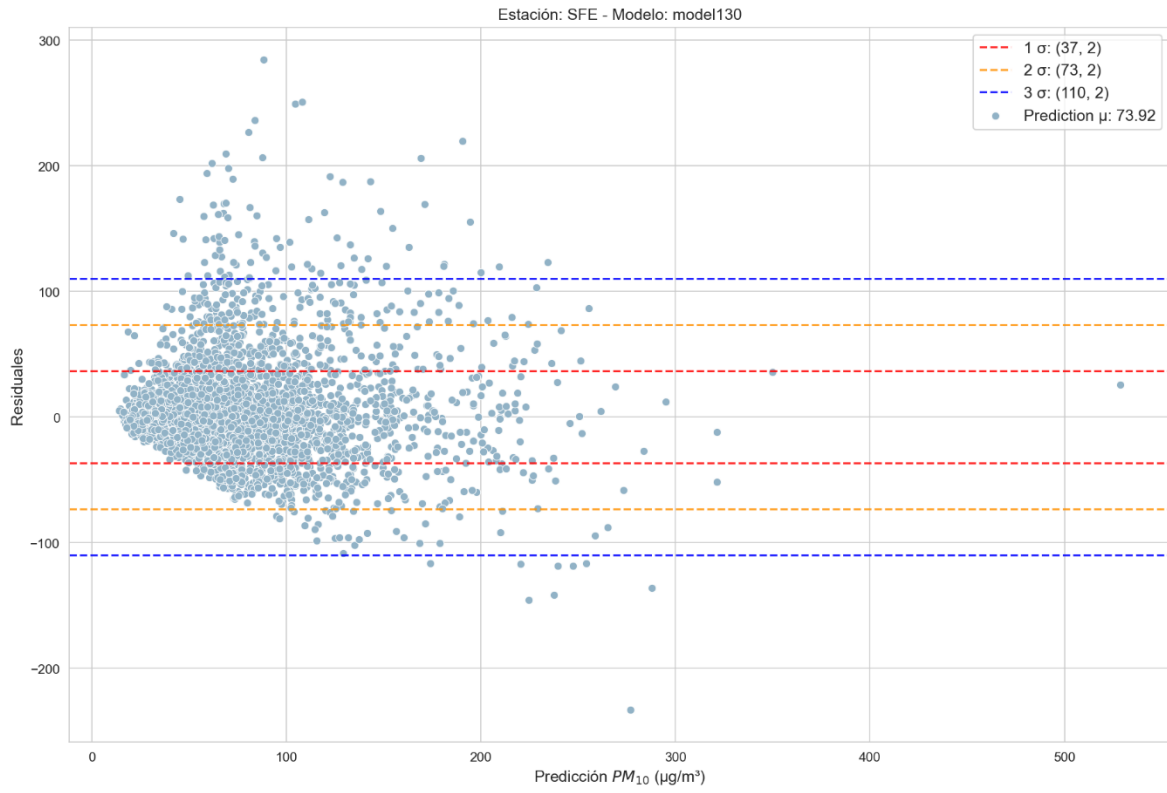
Las Pintas – Modelo 2



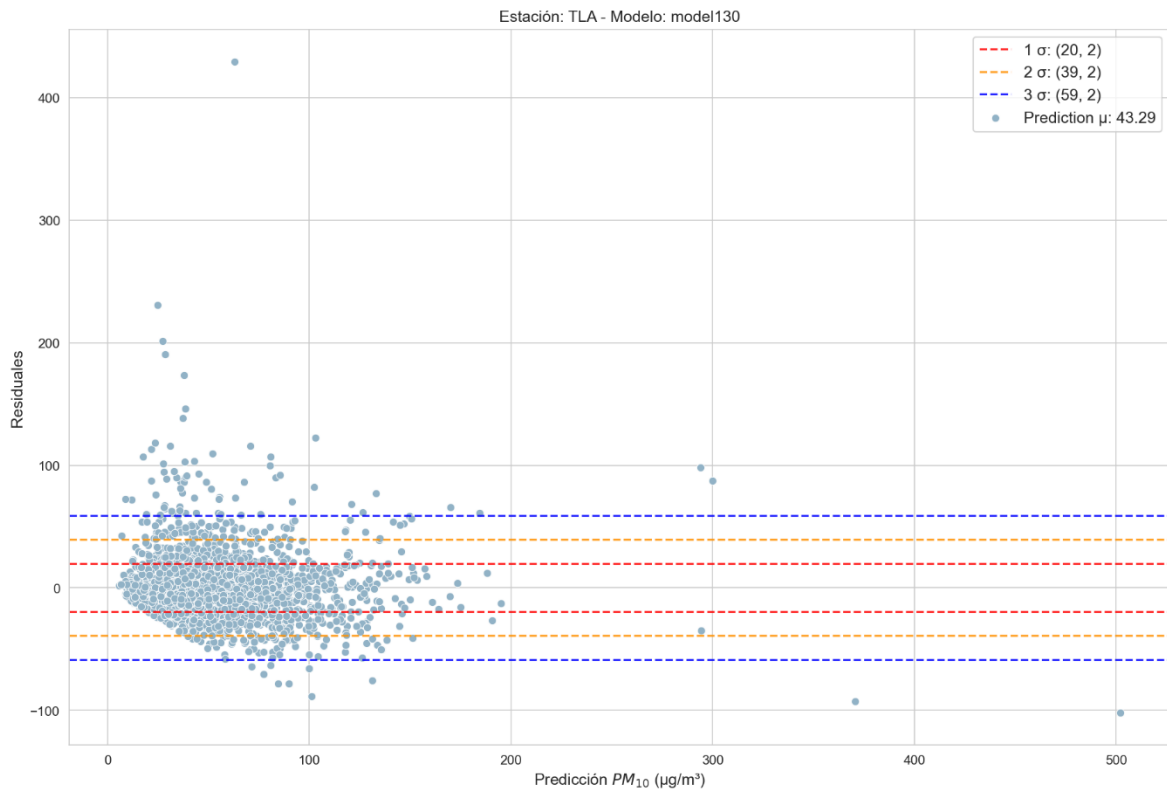
Miravalle – Modelo 2



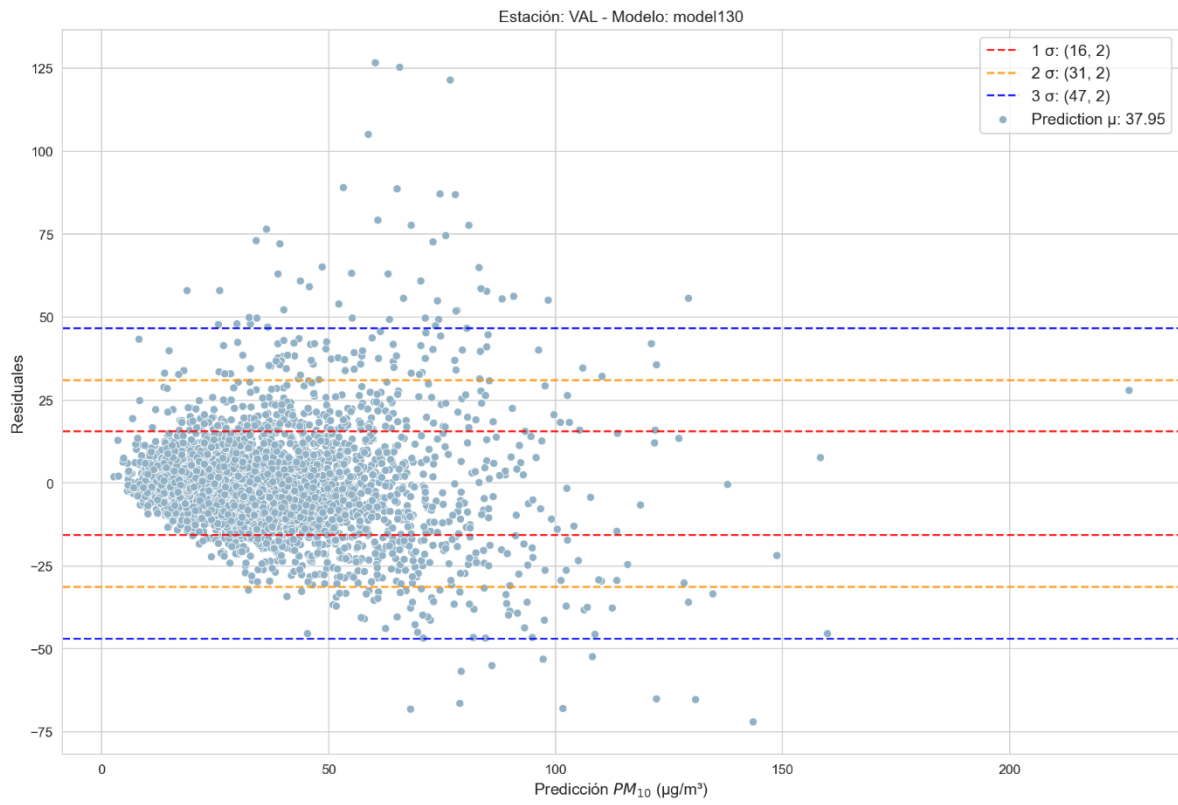
Oblatos – Modelo 2



Santa Fe – Modelo 2

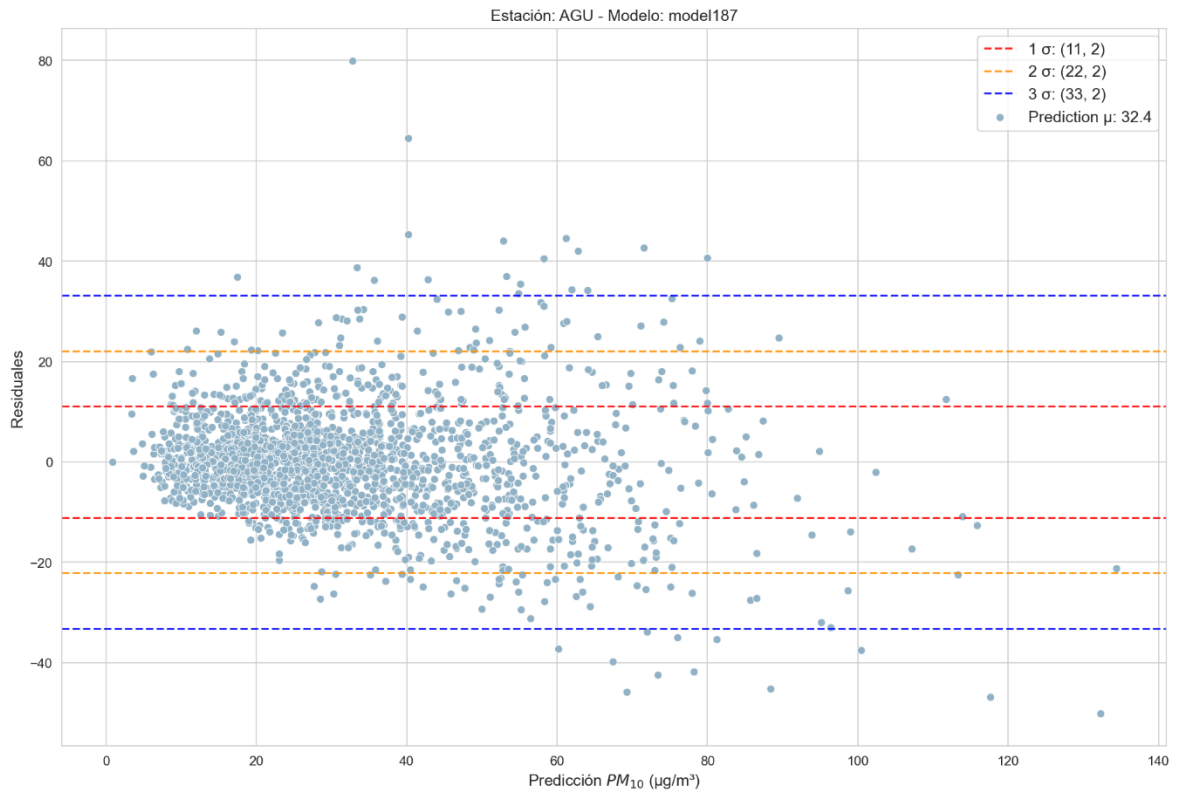


Tlaquepaque – Modelo 2

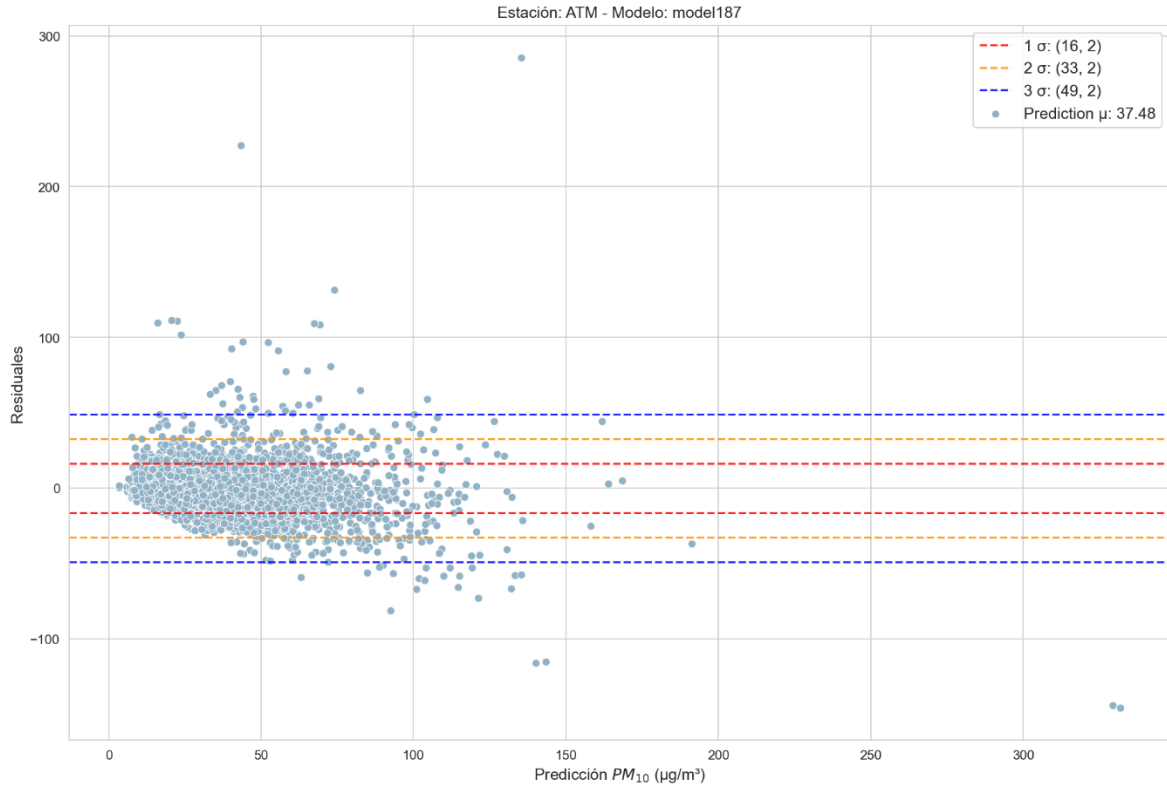


Vallarta – Modelo 2

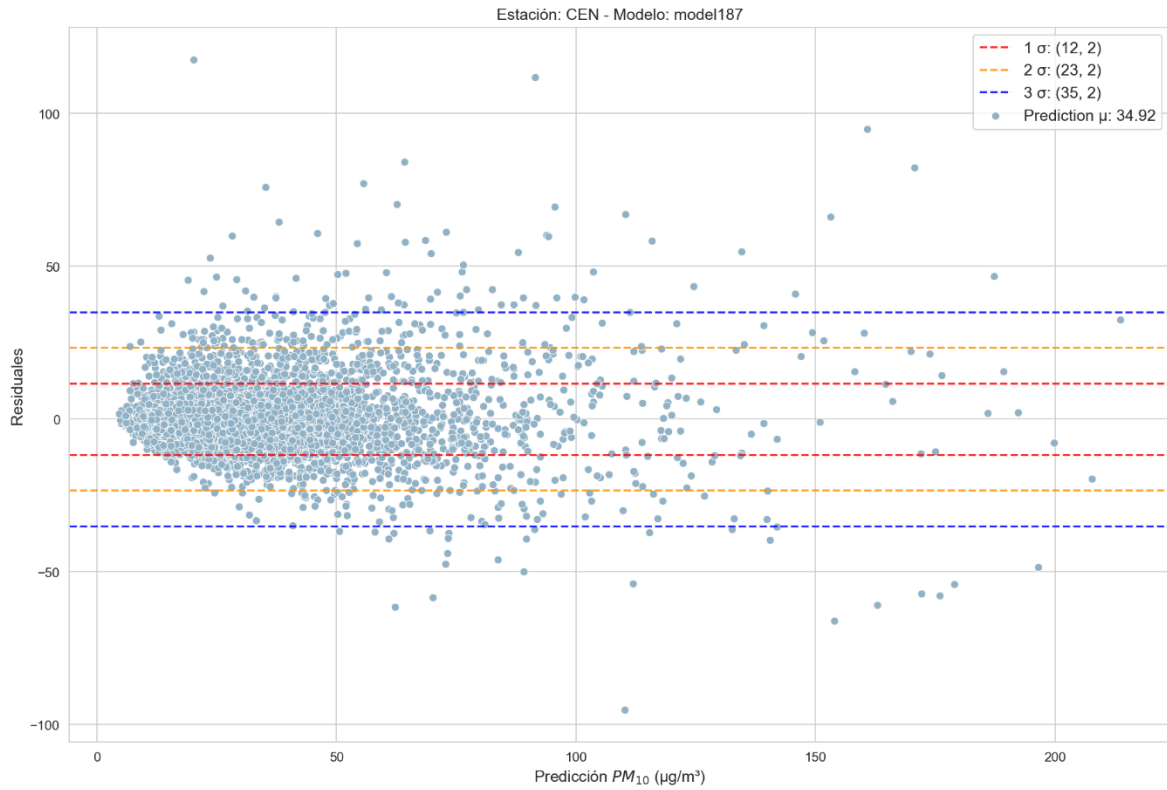
8.4.3. Modelo 3



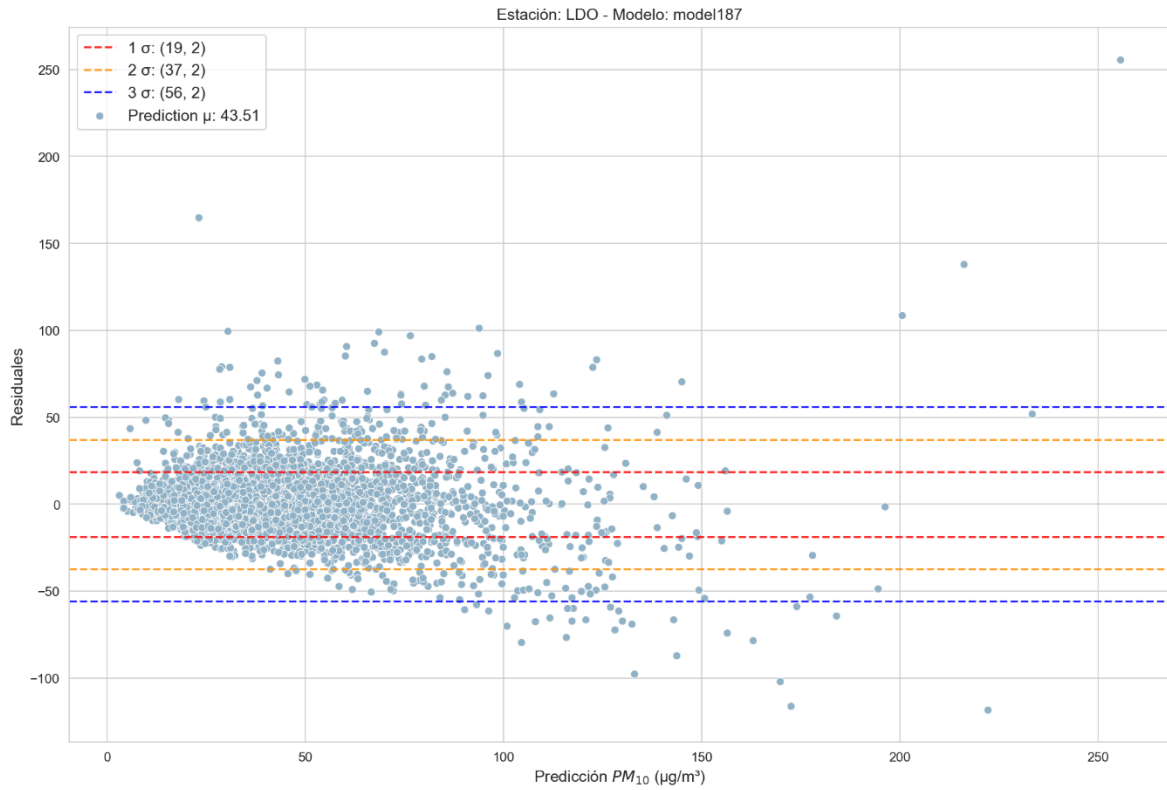
Águilas – Modelo 3



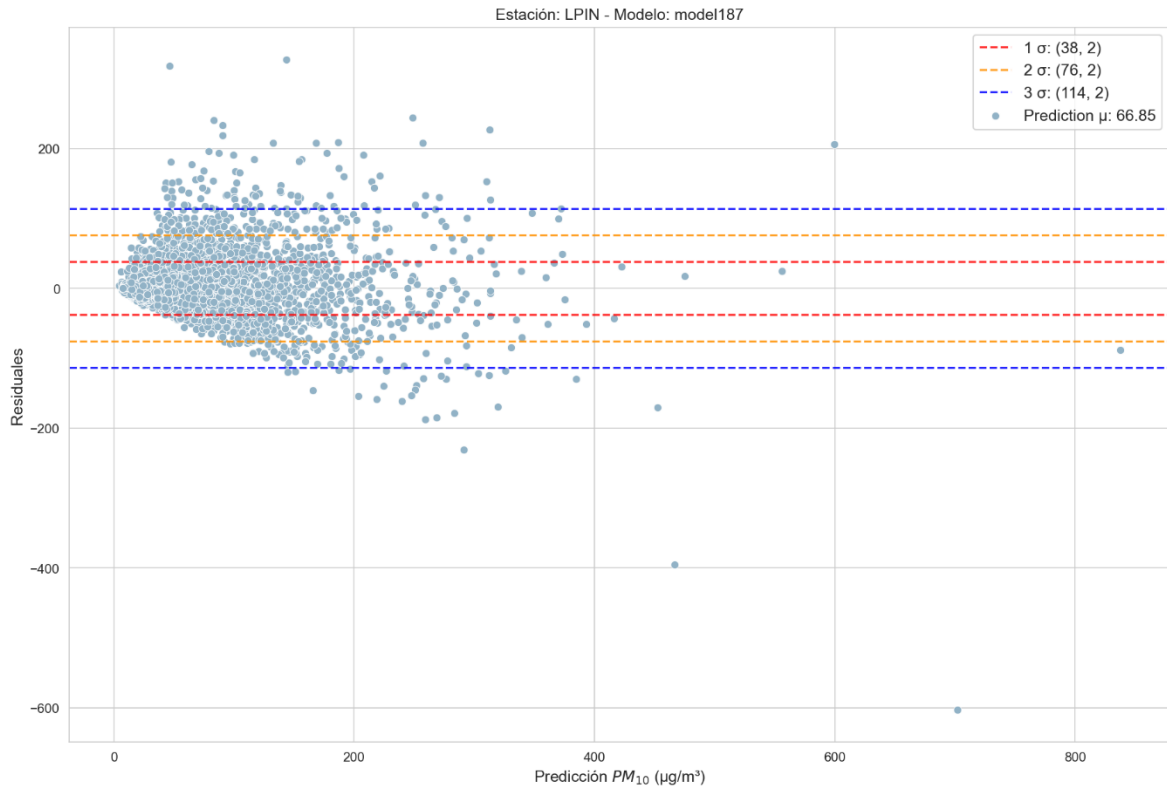
Atemajac – Modelo 3



Centro – Modelo 3



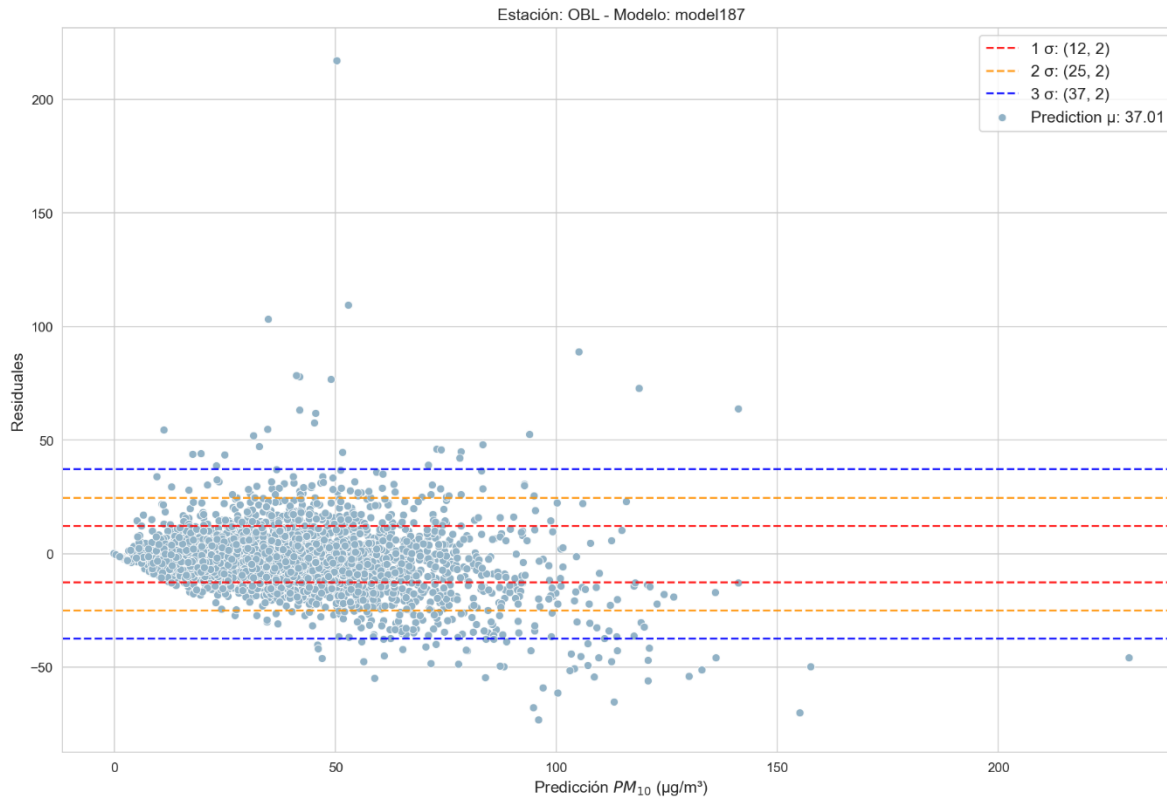
Loma Dorada – Modelo 3



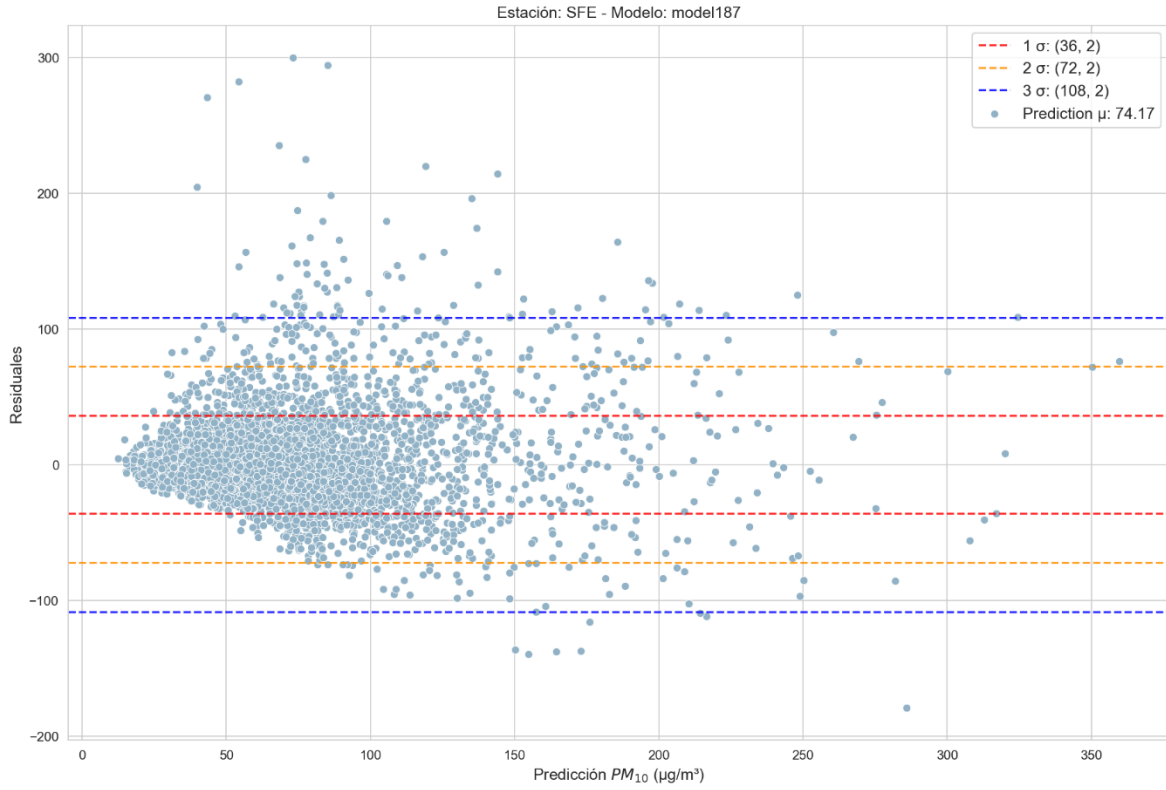
Las Pintas – Modelo 3



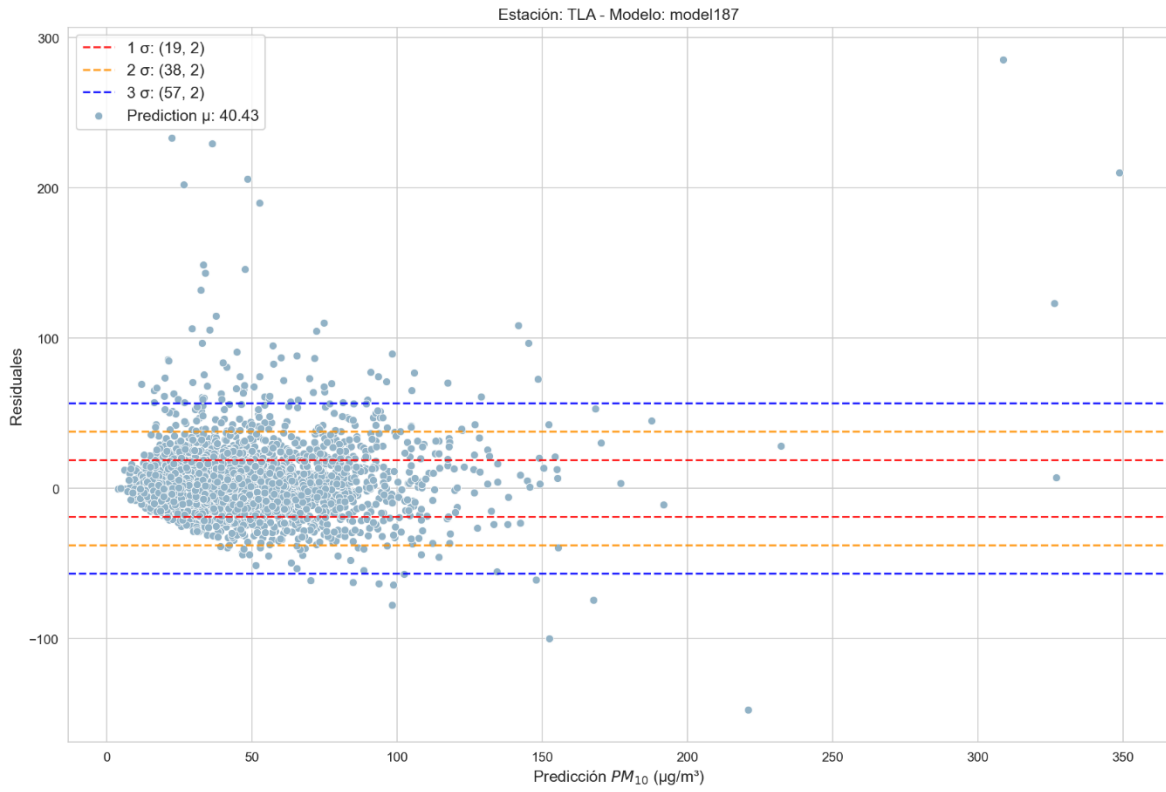
Miravalle – Modelo 3



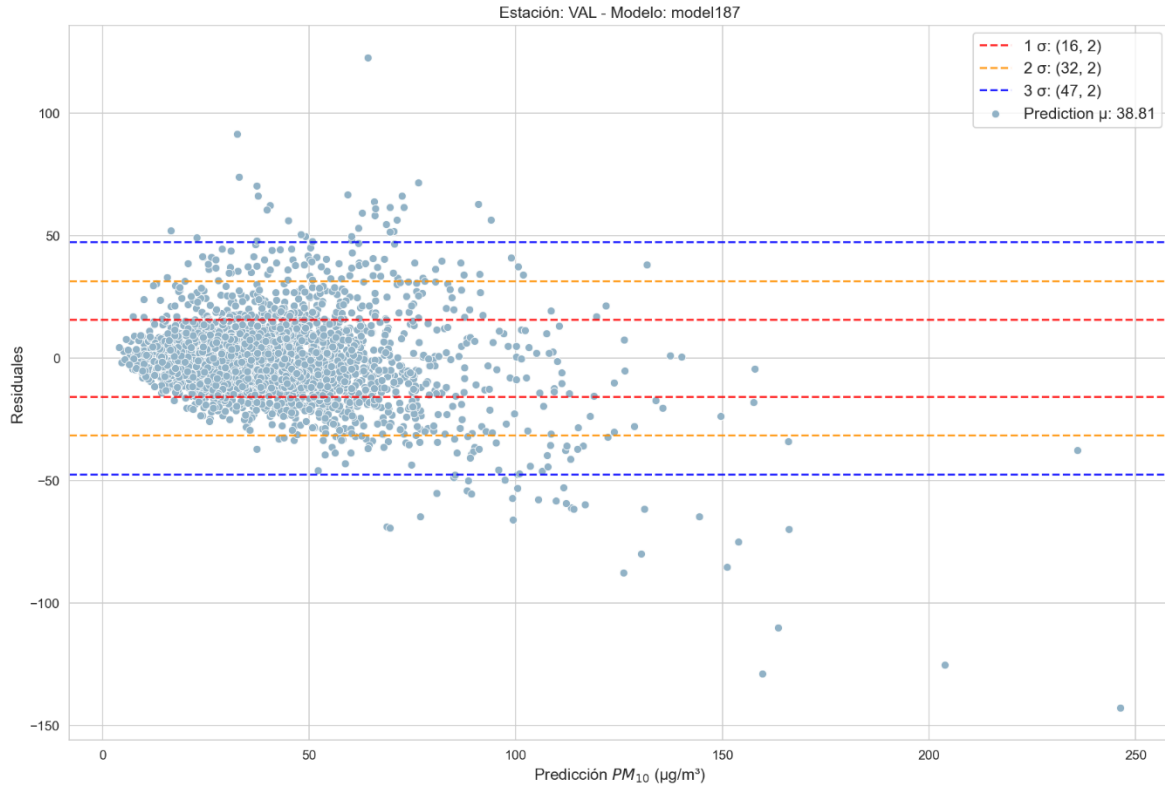
Oblatos – Modelo 3



Santa Fe – Modelo 3



Tlaquepaque – Modelo 3

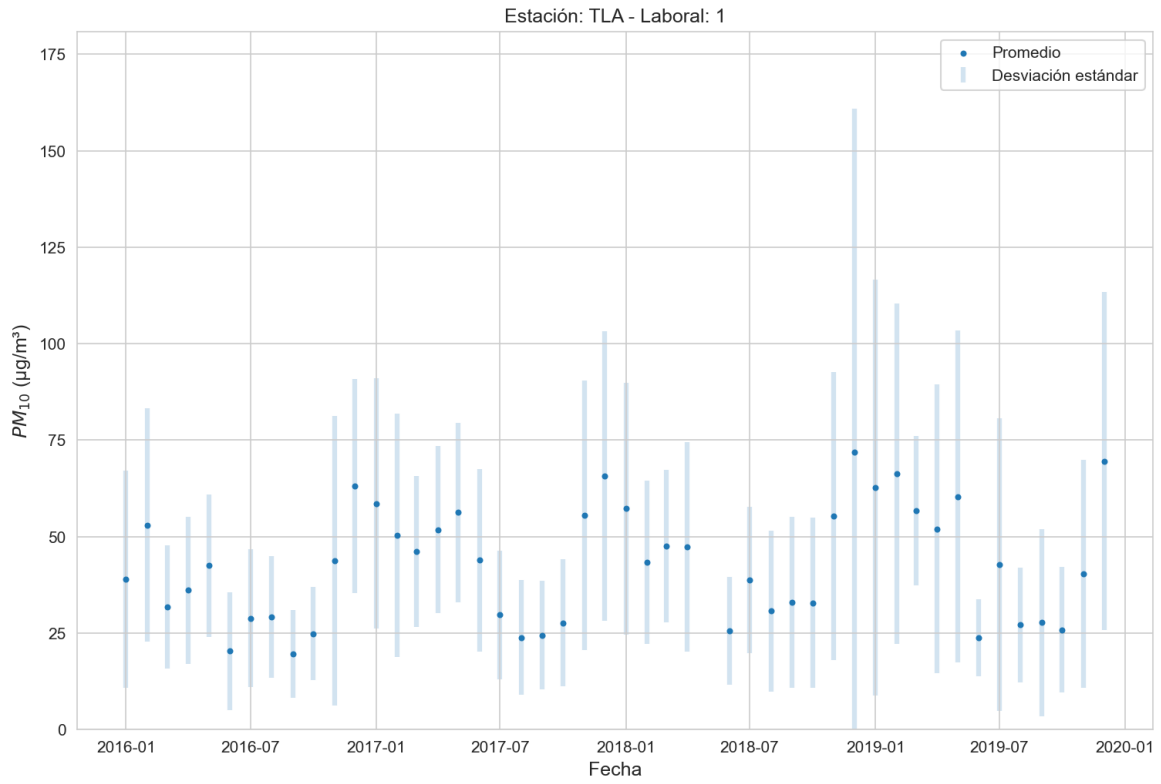


Vallarta – Modelo 3

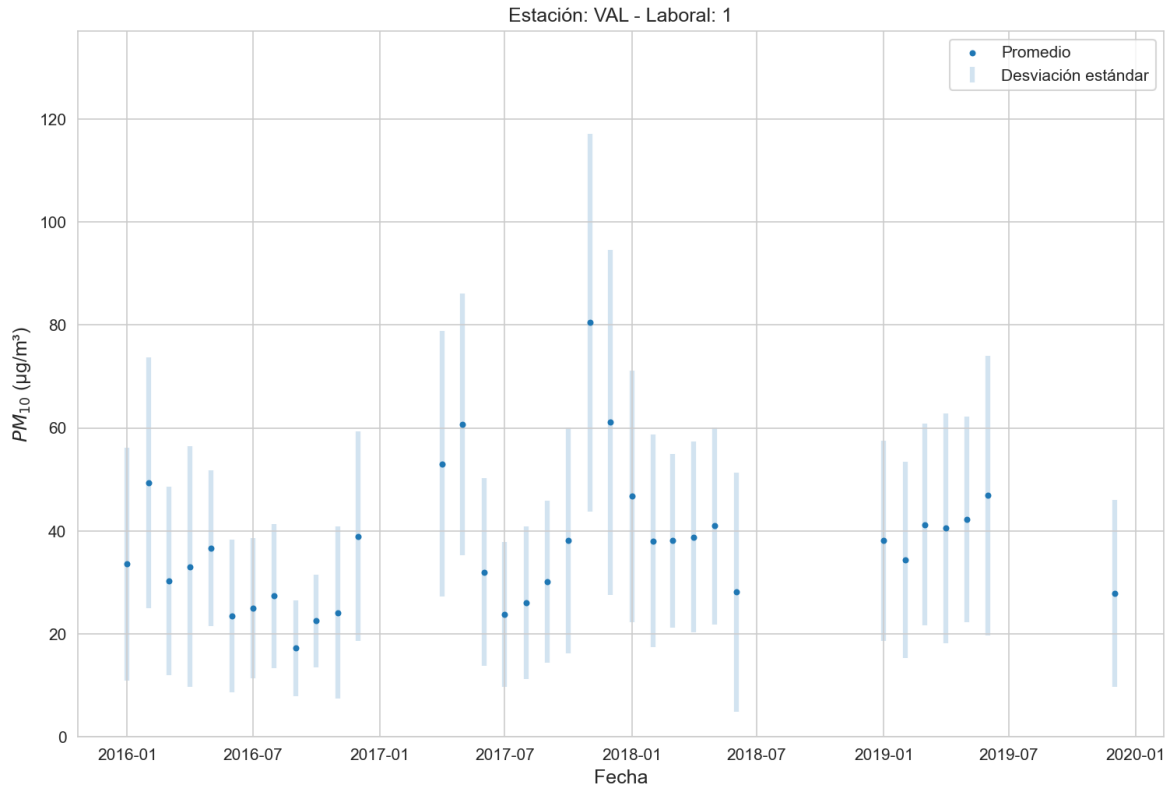
8.5. Anexo E – Gráficas de línea base por estación

8.5.1. Línea base continua

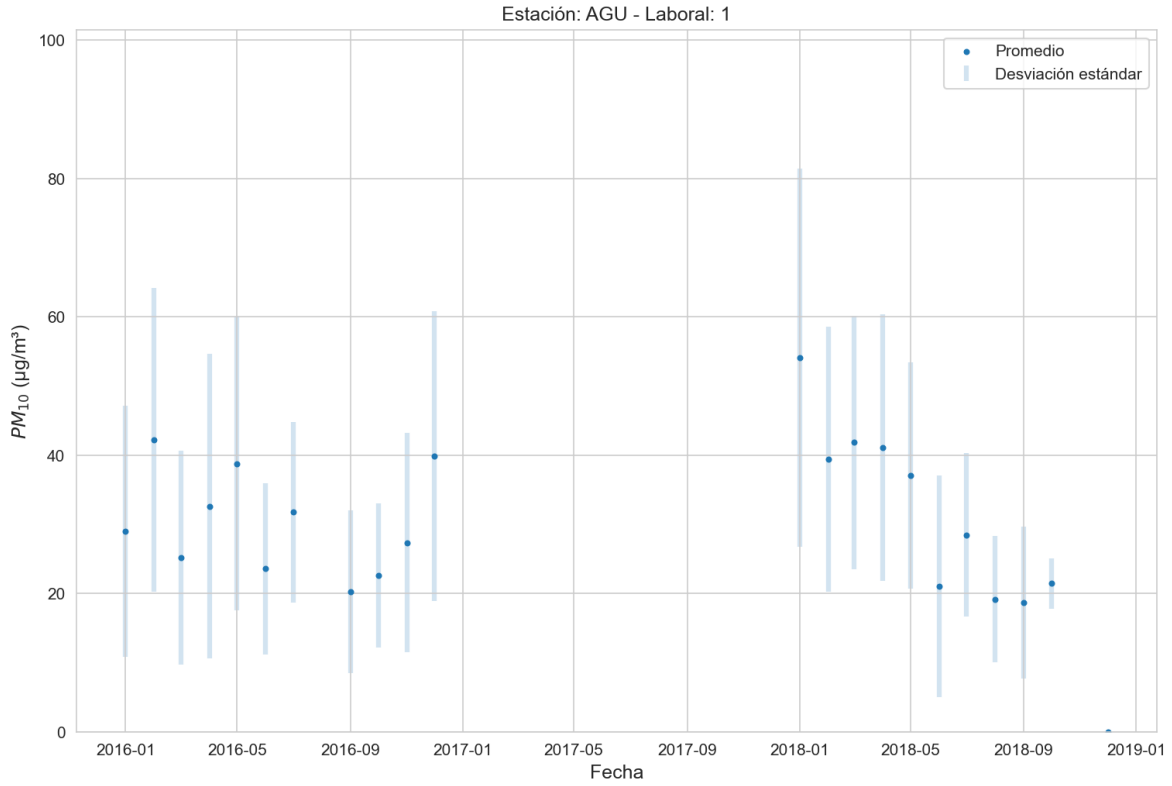
8.5.1.1. Días laborales



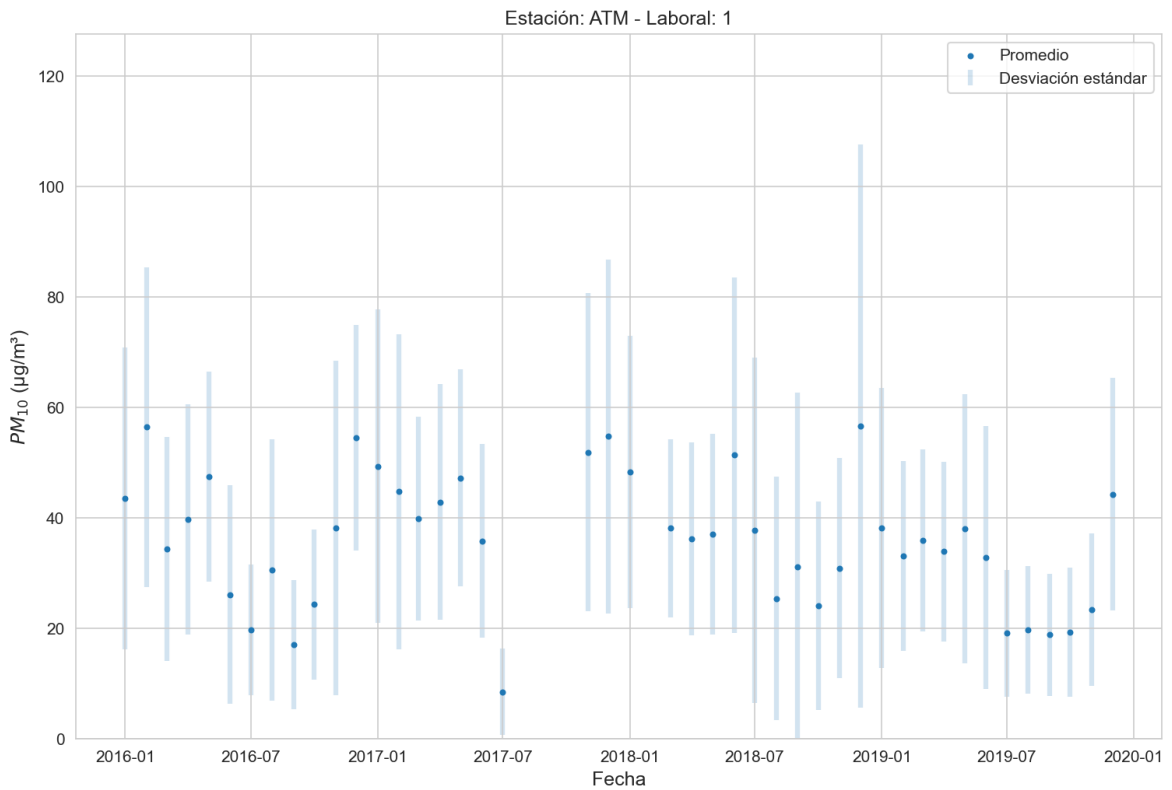
Línea base – Día laboral - Tlaquepaque



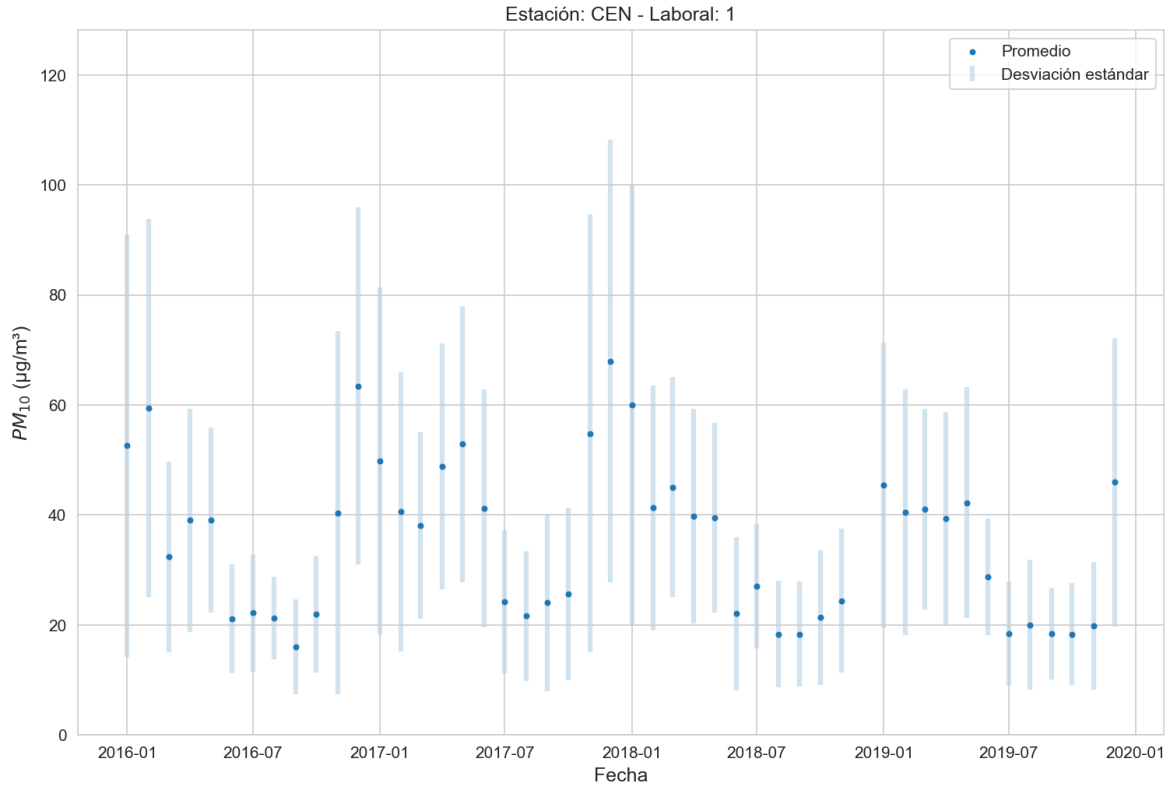
Línea base – Día laboral - Vallarta



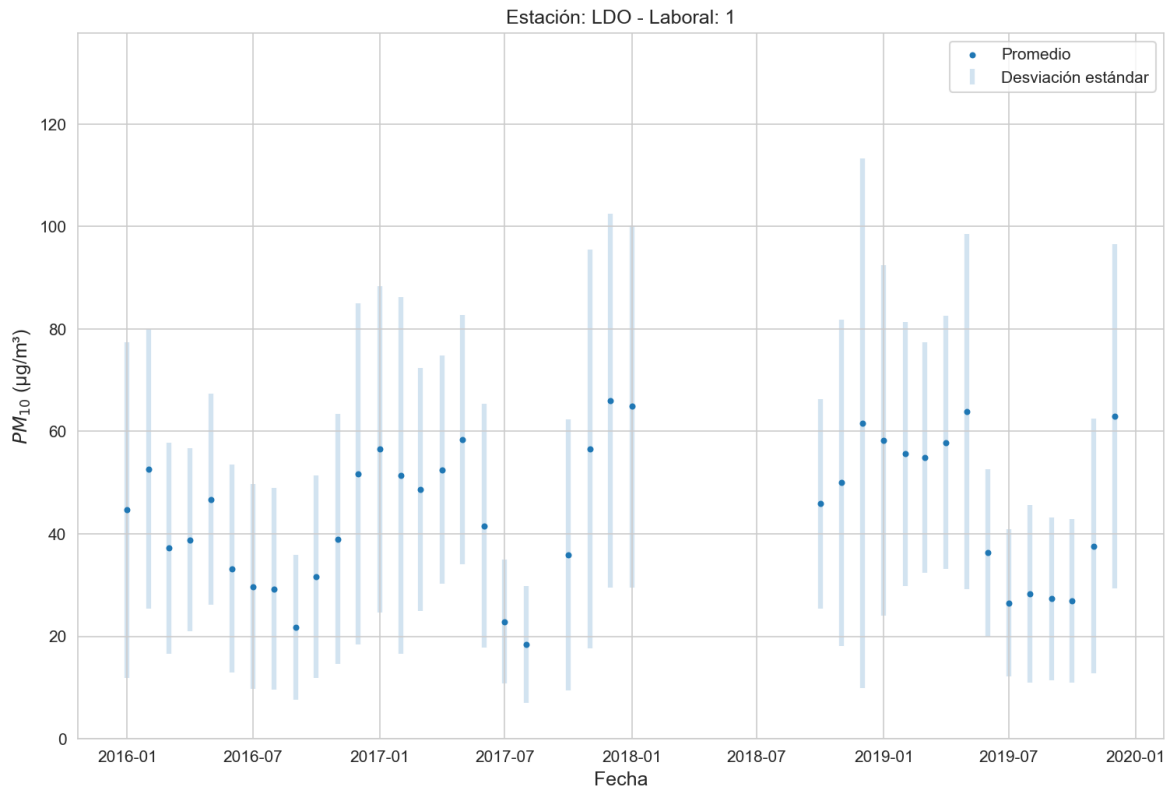
Línea base – Día laboral - Águilas



Línea base – Día laboral - Atemajac

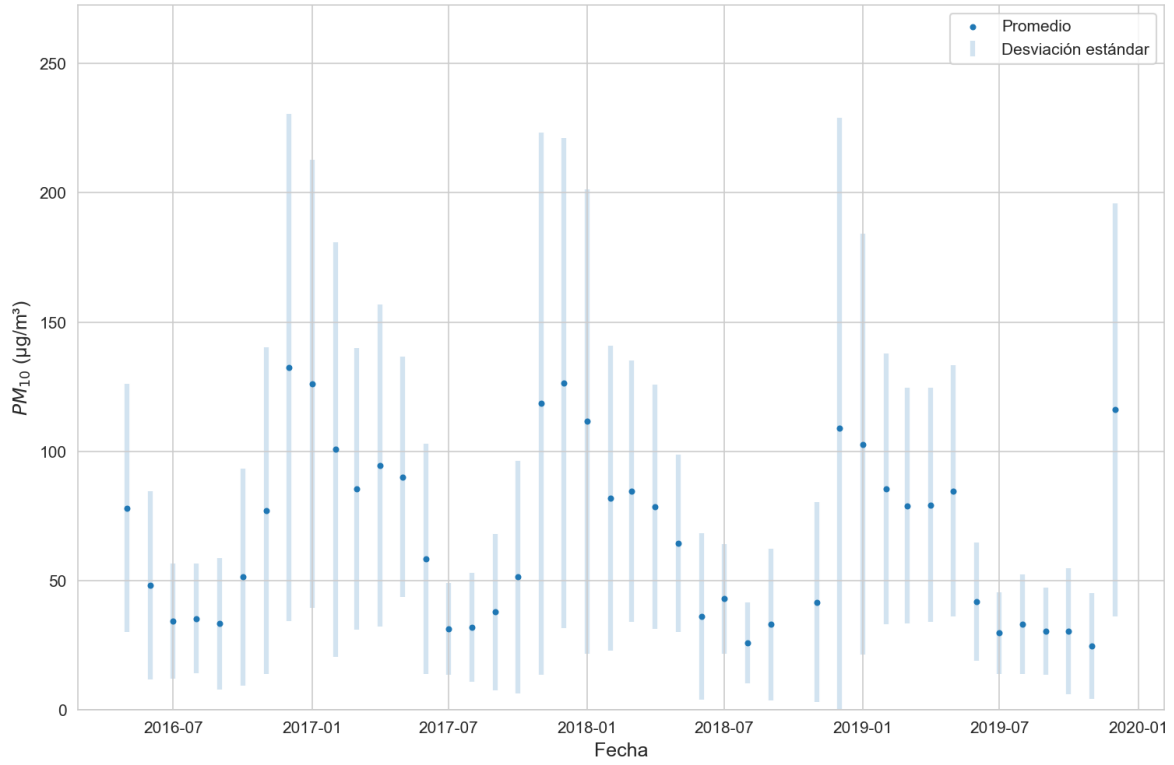


Línea base – Día laboral - Centro



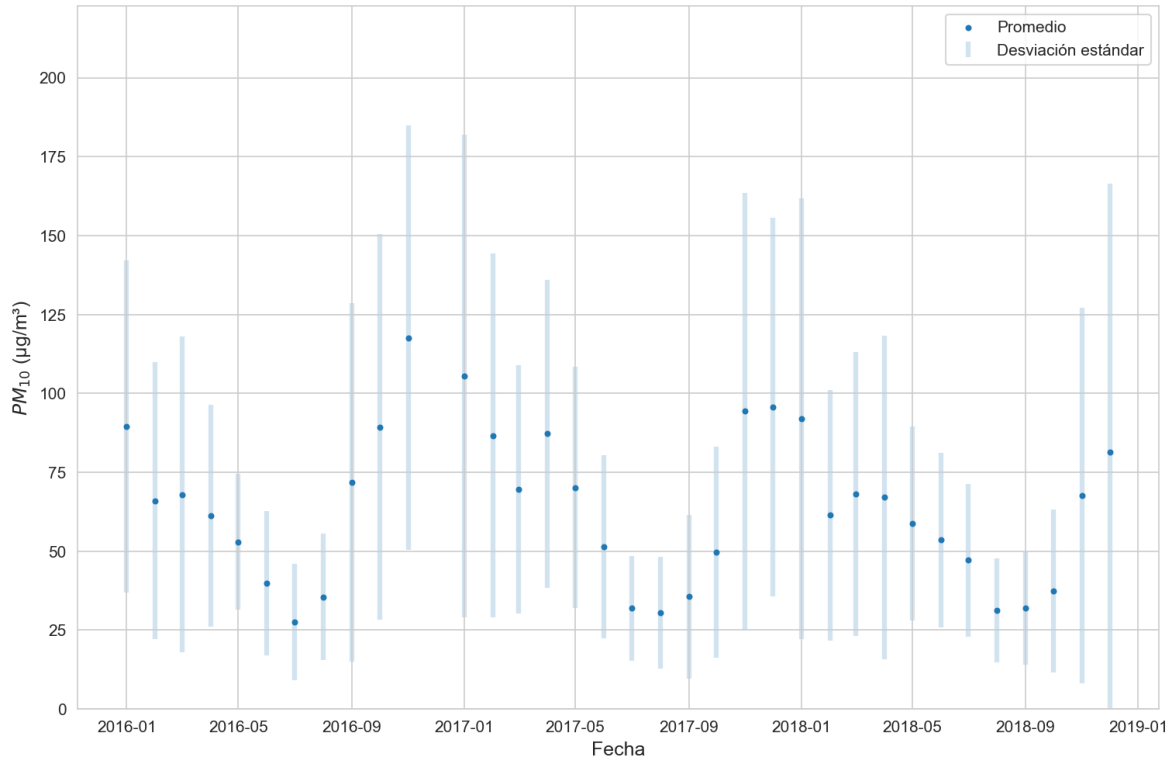
Línea base – Día laboral – Loma Dorada

Estación: LPIN - Laboral: 1

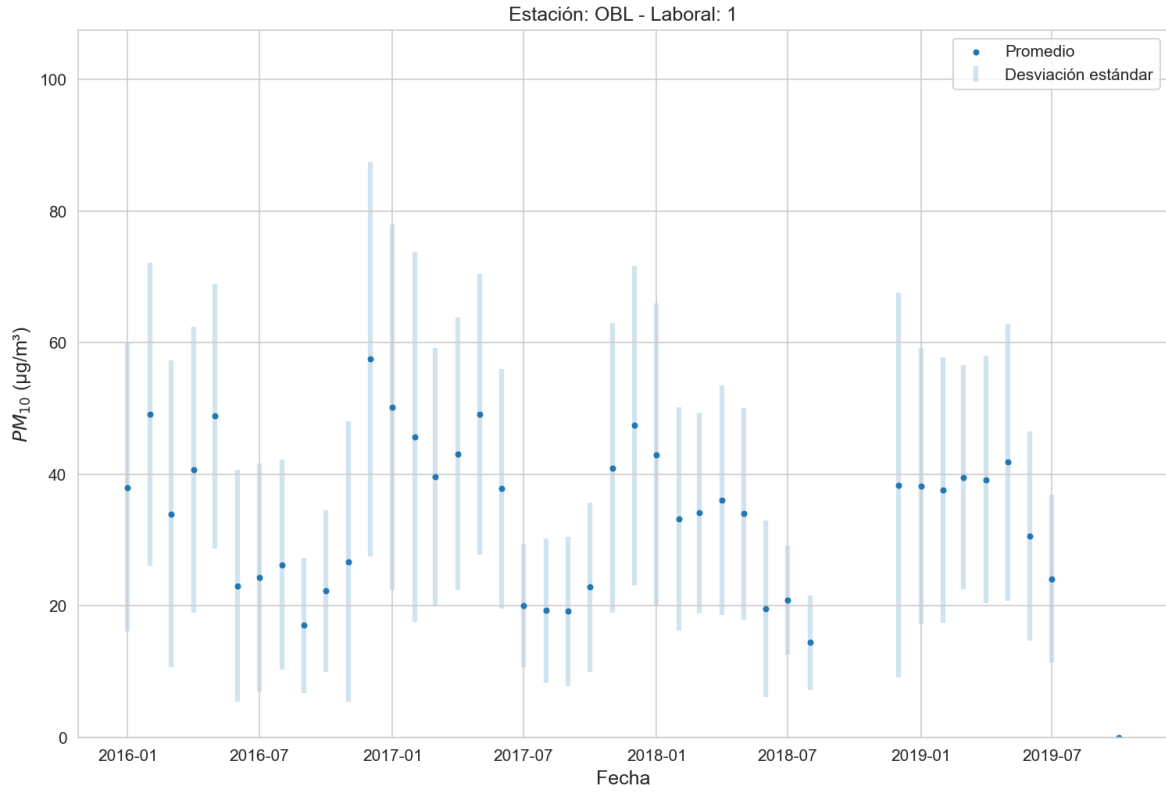


Línea base – Día laboral – Las Pintas

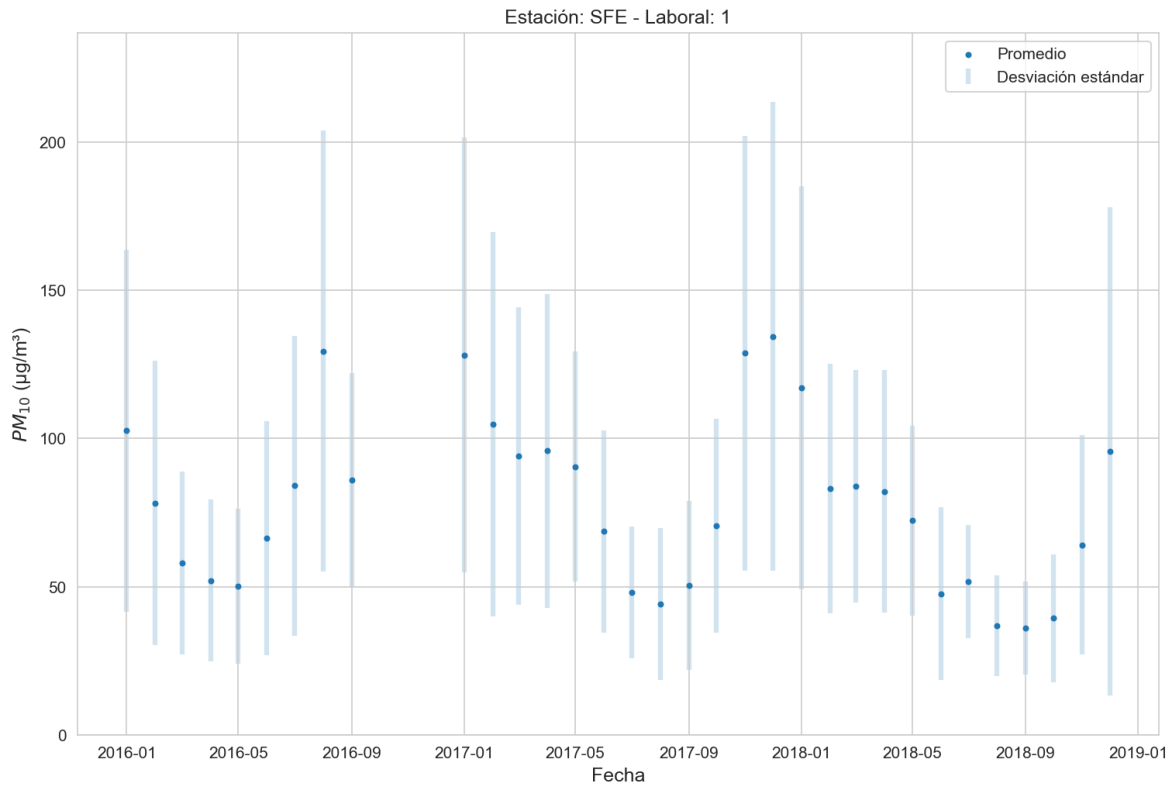
Estación: MIR - Laboral: 1



Línea base – Día laboral - Miravalle

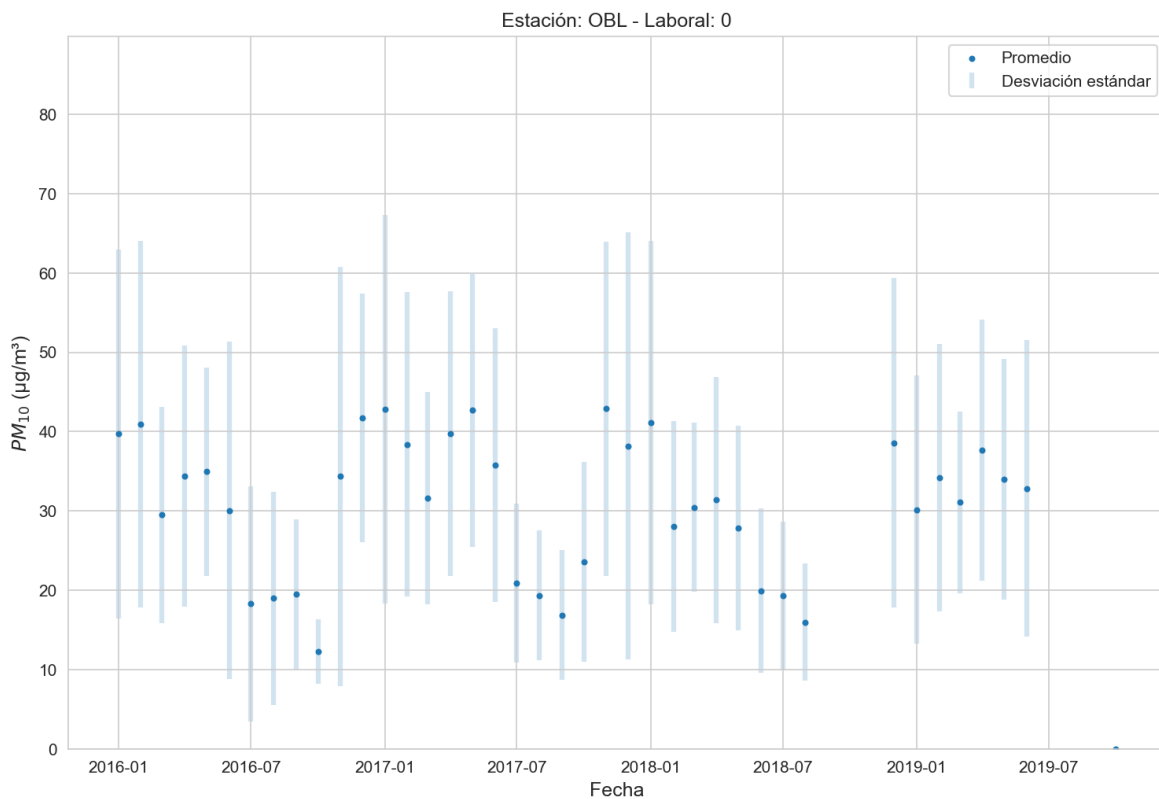


Línea base – Día laboral - Oblatos

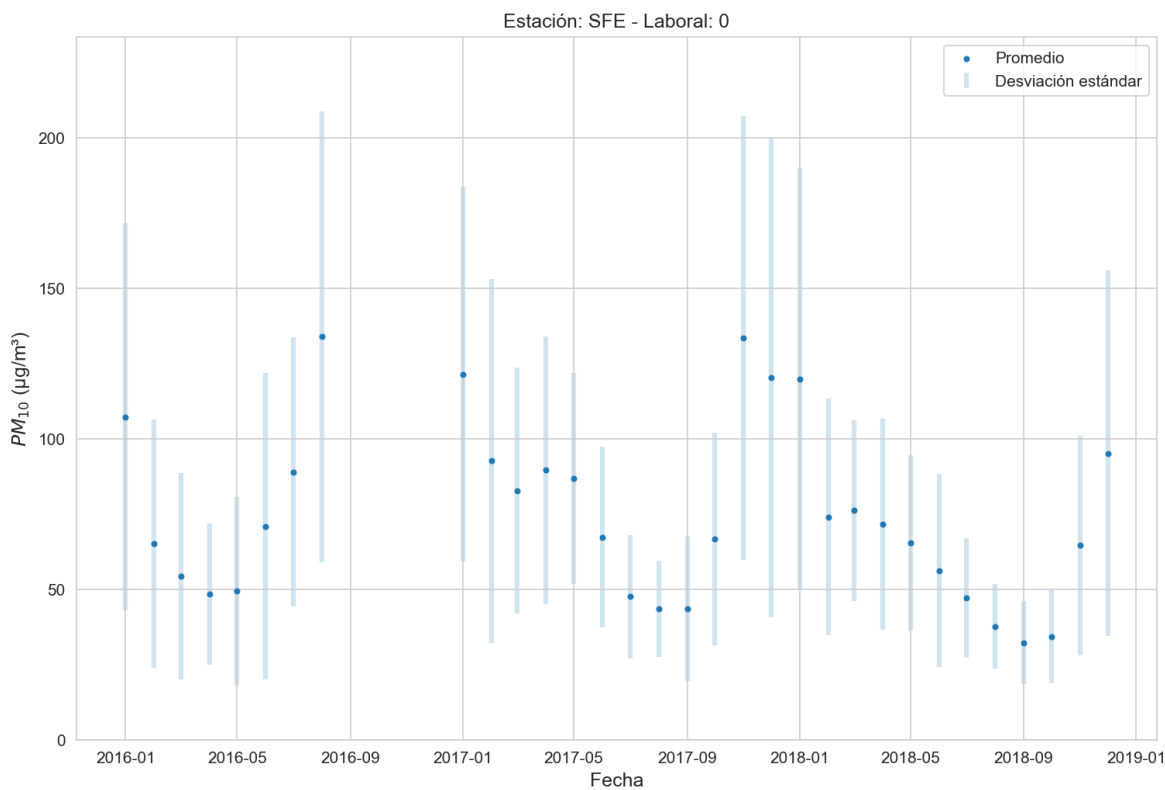


Línea base – Día laboral – Santa Fe

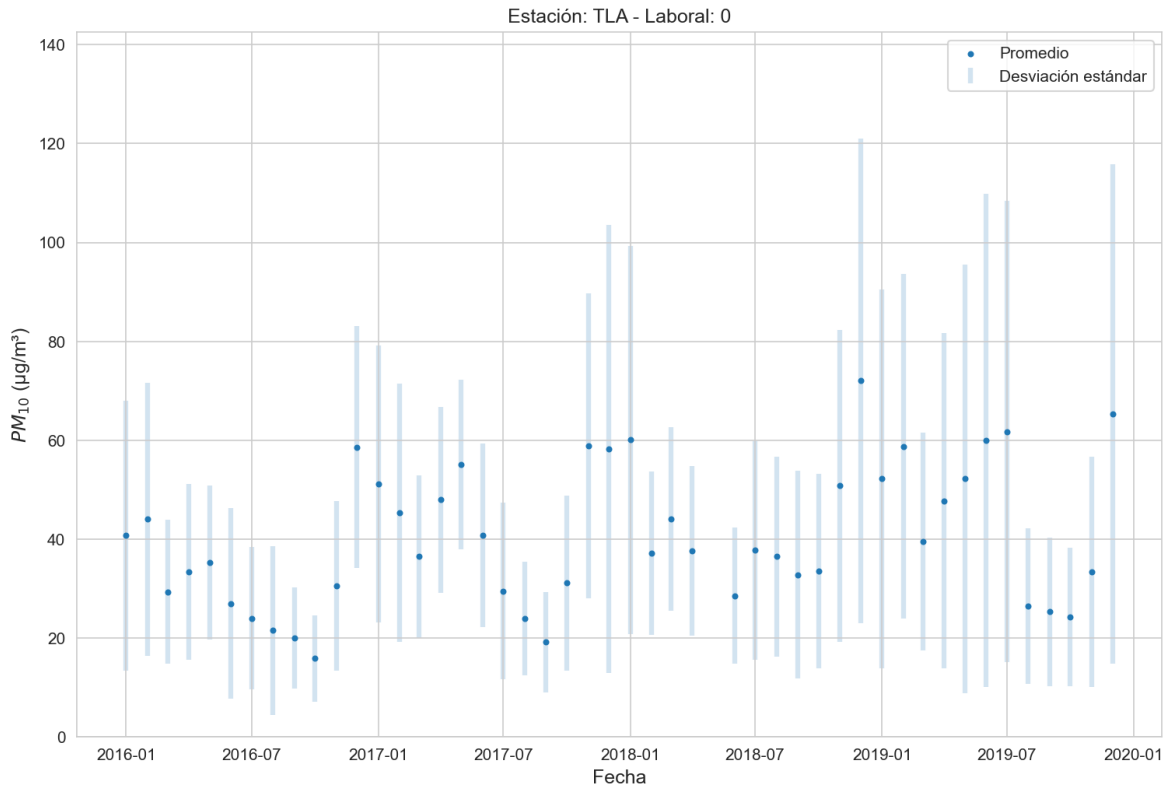
8.5.1.2. Fines de semana



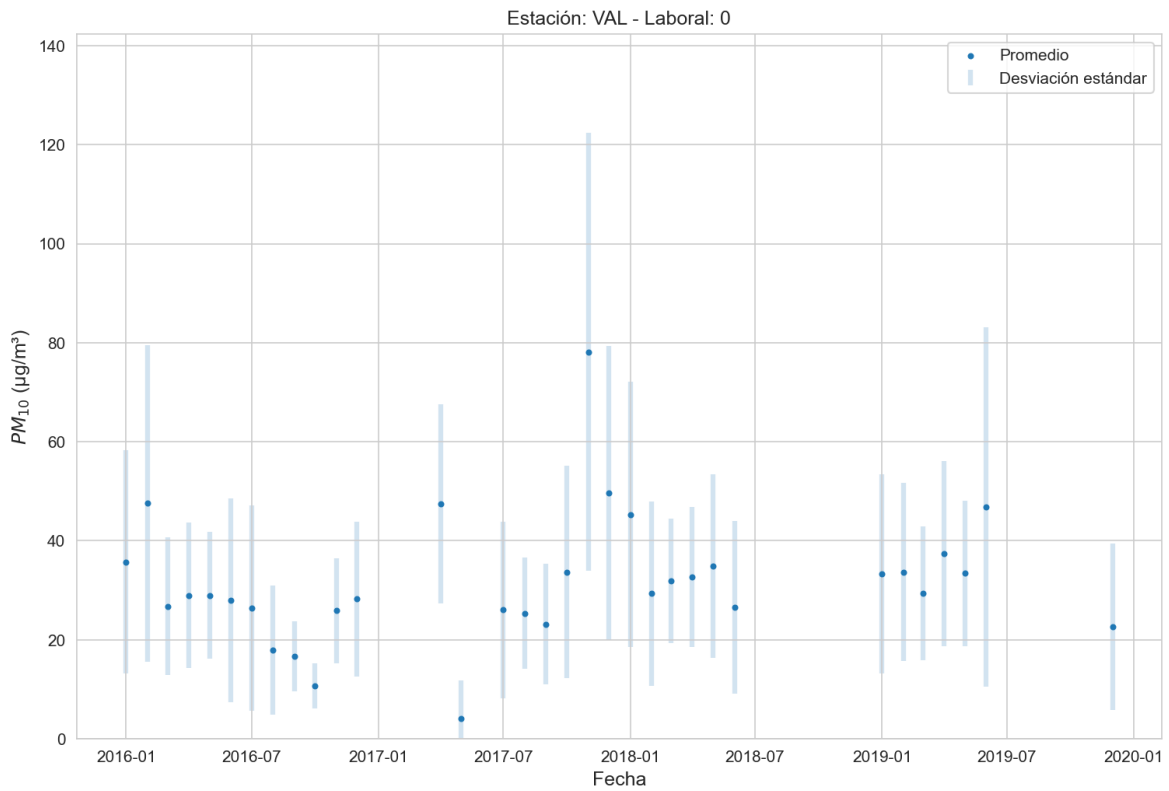
Línea base – Fin de semana – Oblatos



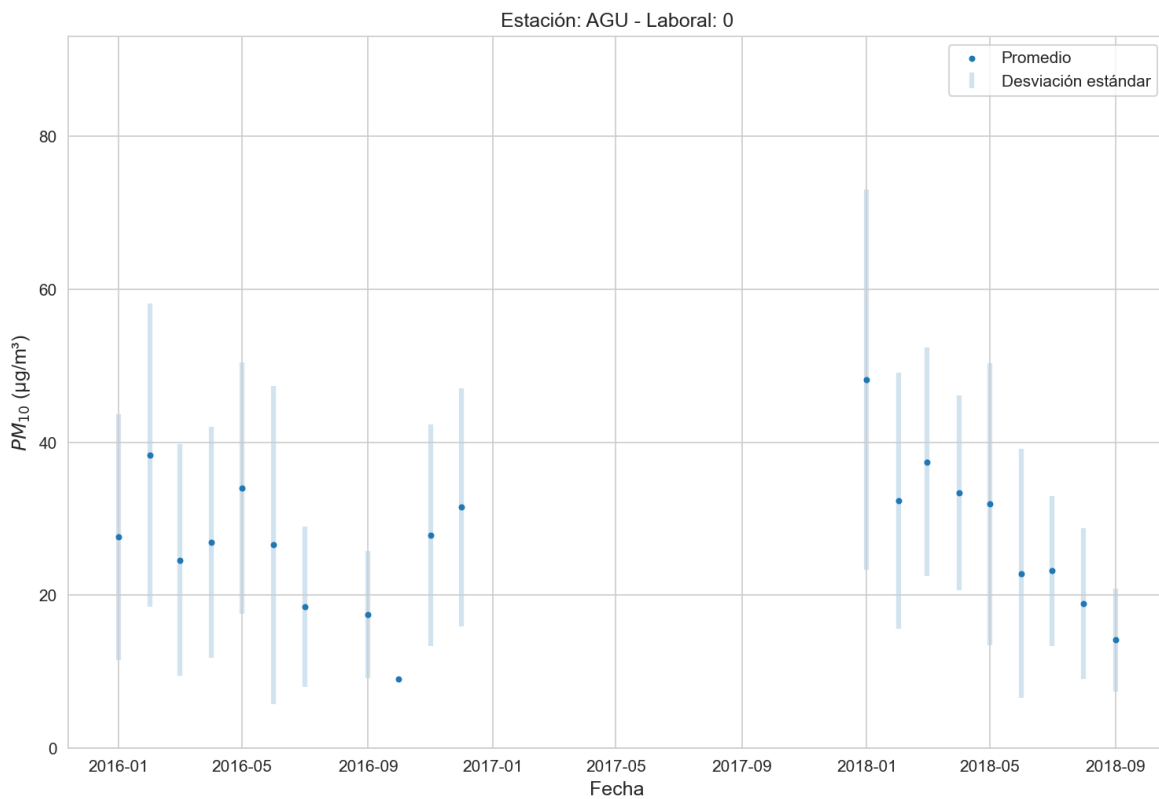
Línea base – Fin de semana – Santa Fe



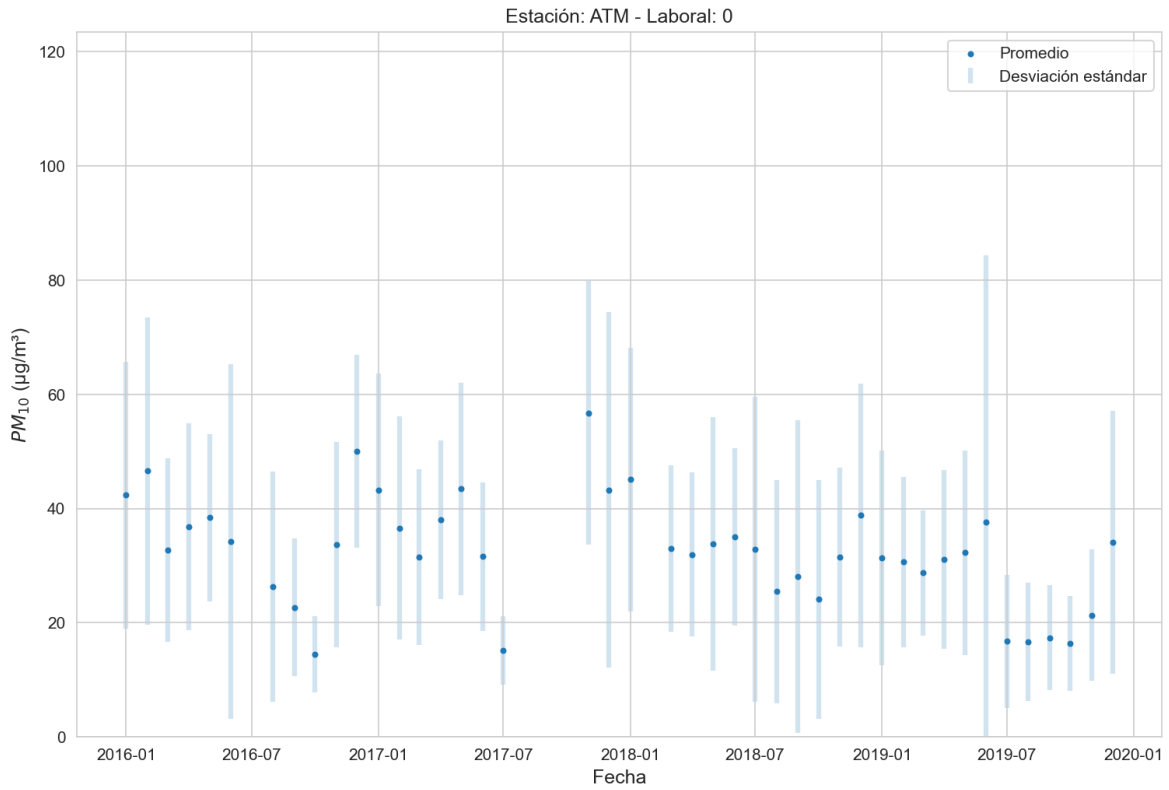
Línea base – Fin de semana – Tlaquepaque



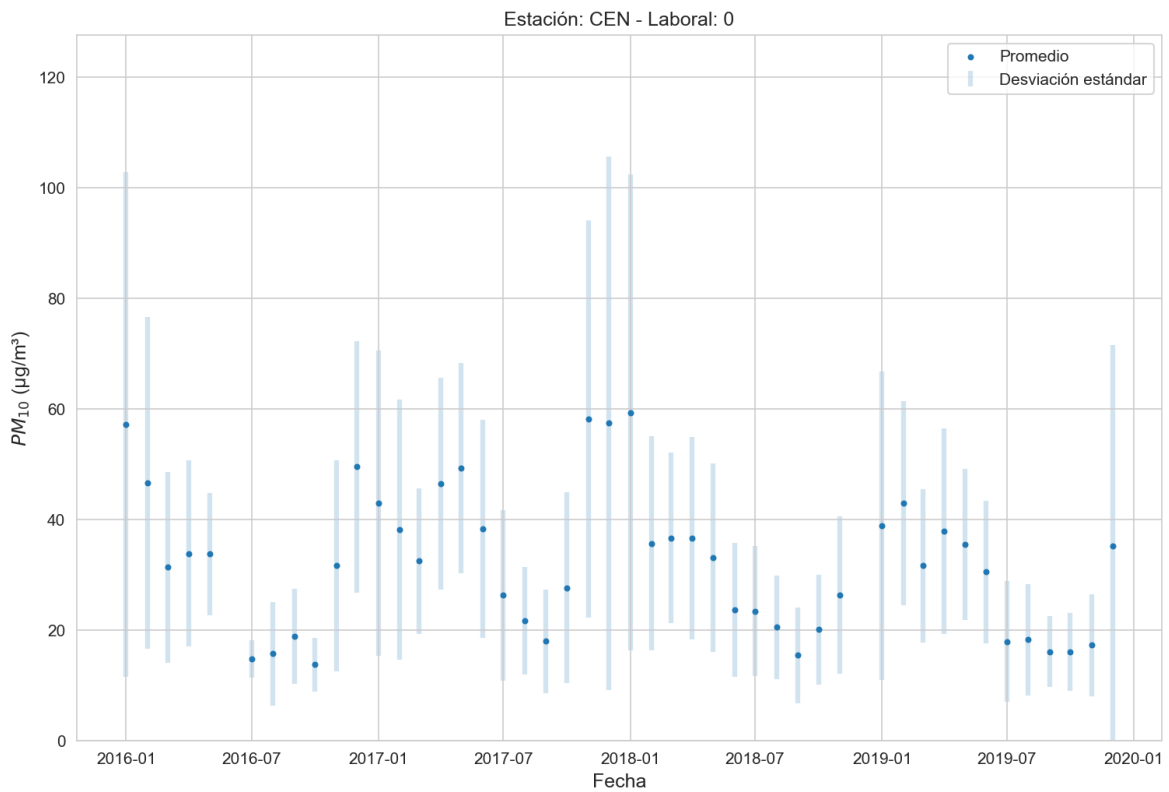
Línea base – Fin de semana – Vallarta



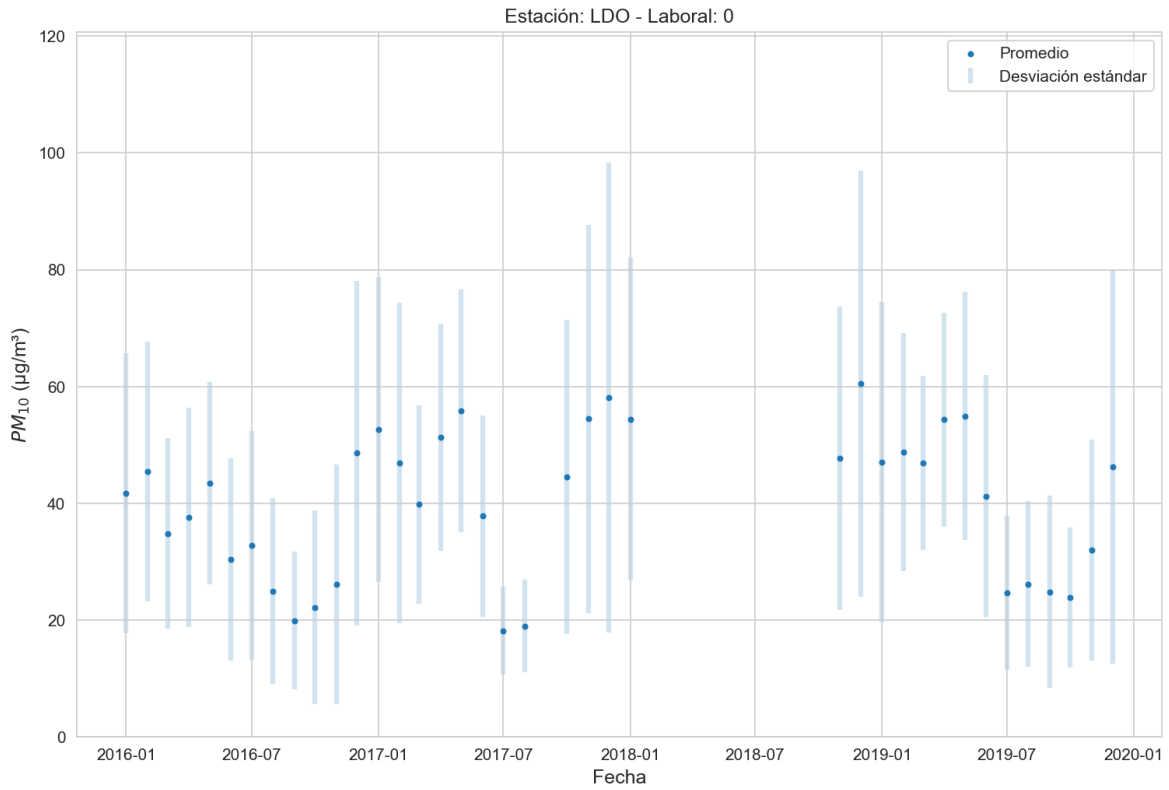
Línea base – Fin de semana – Águilas



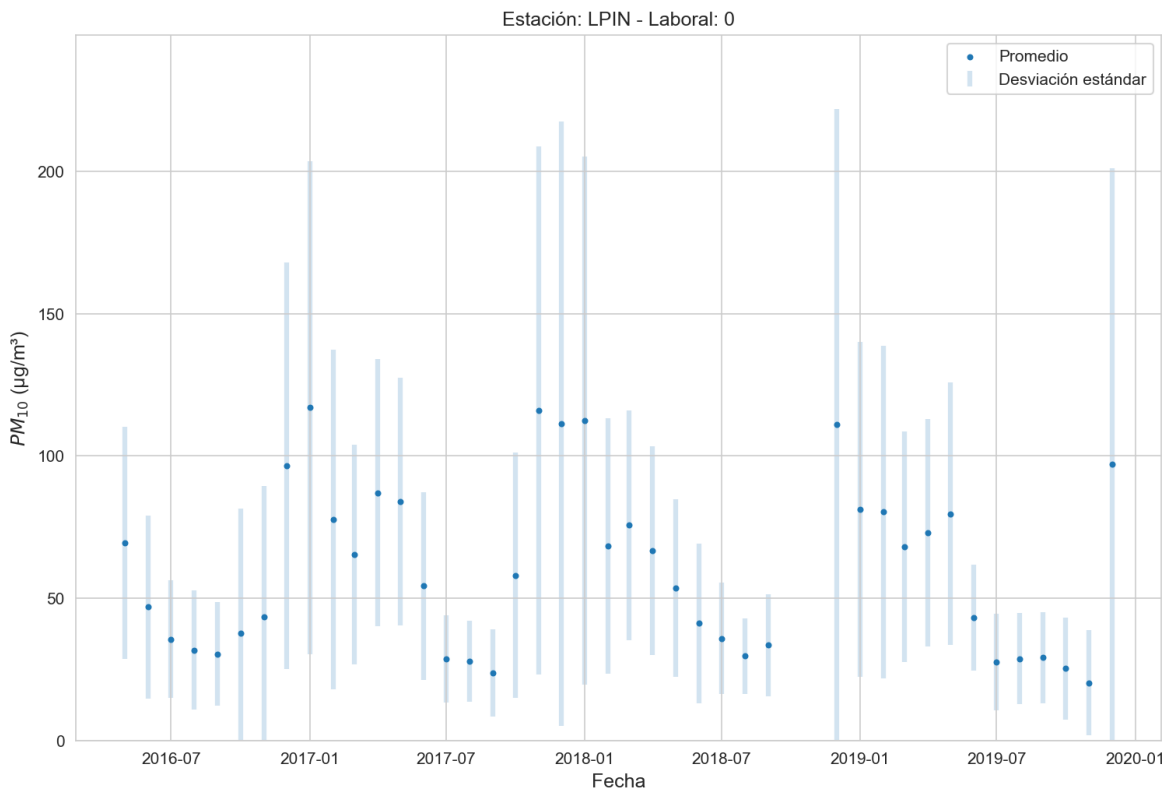
Línea base – Fin de semana – Atemajac



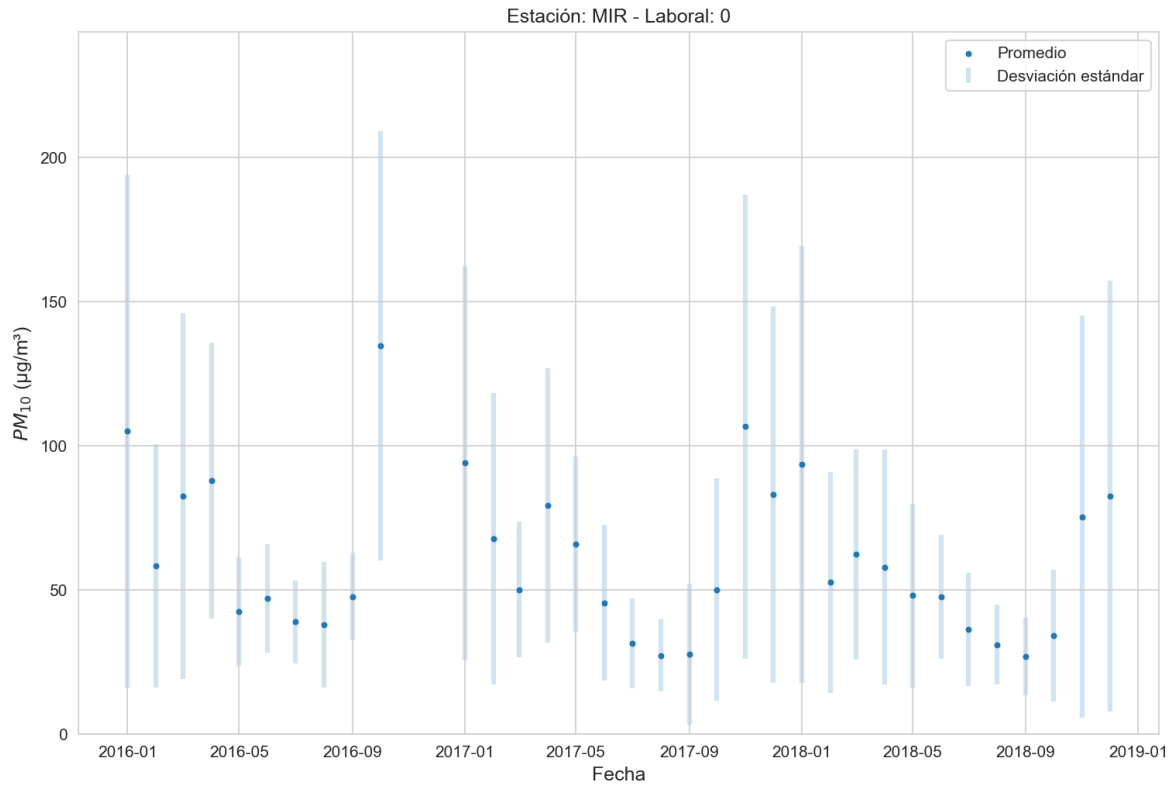
Línea base – Fin de semana – Centro



Línea base – Fin de semana – Loma Dorada



Línea base – Fin de semana – Las Pintas

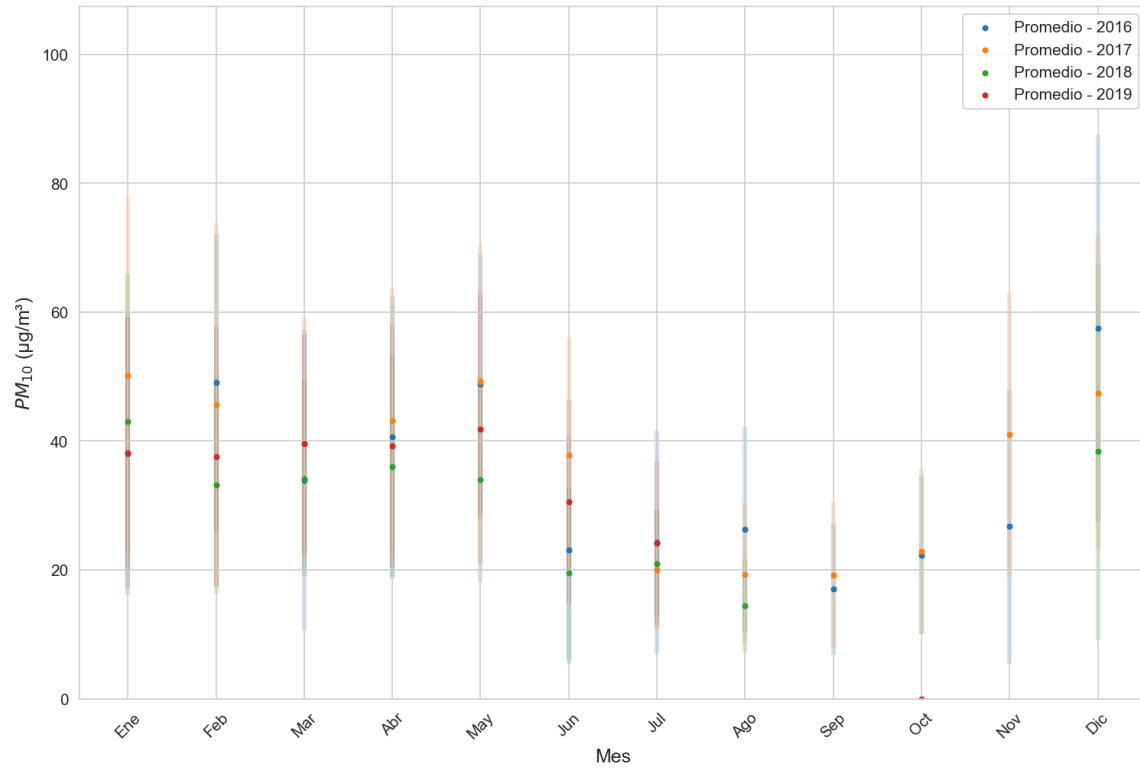


Línea base – Fin de semana – Miravalle

8.5.2. Línea base agrupada

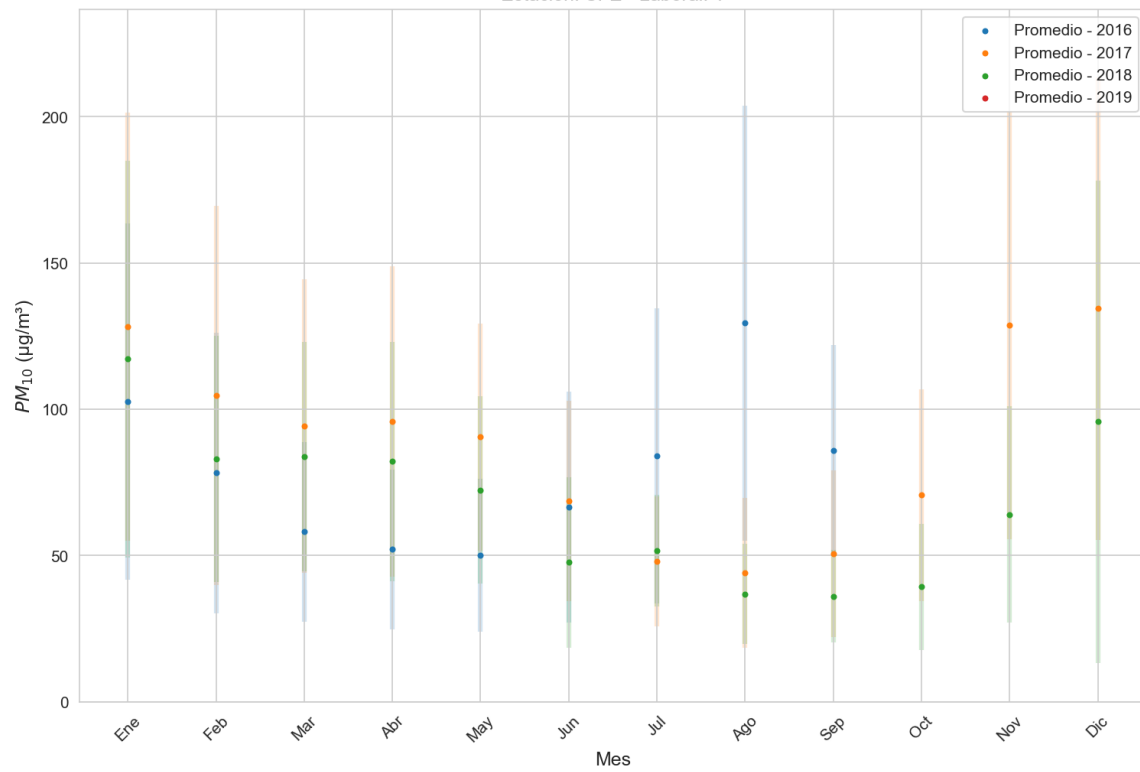
8.5.2.1. Día laboral

Estación: OBL - Laboral: 1

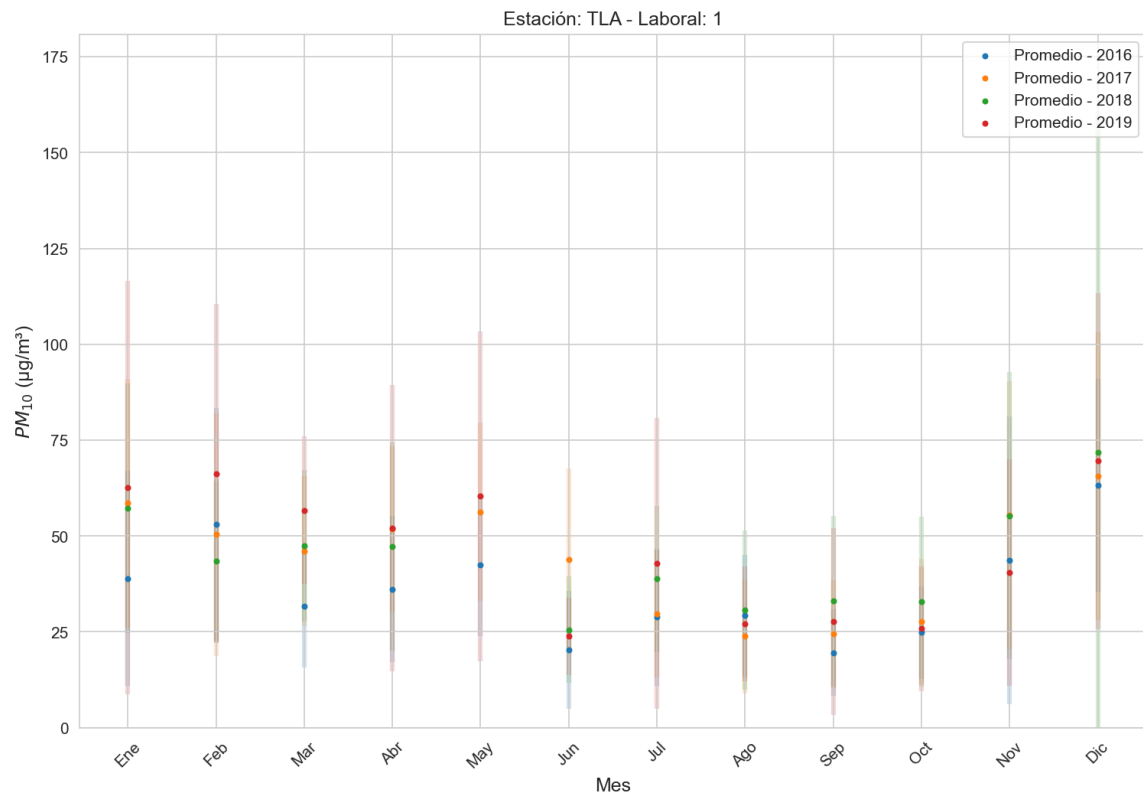


Línea base agrupada- Día laboral - Oblatos

Estación: SFE - Laboral: 1

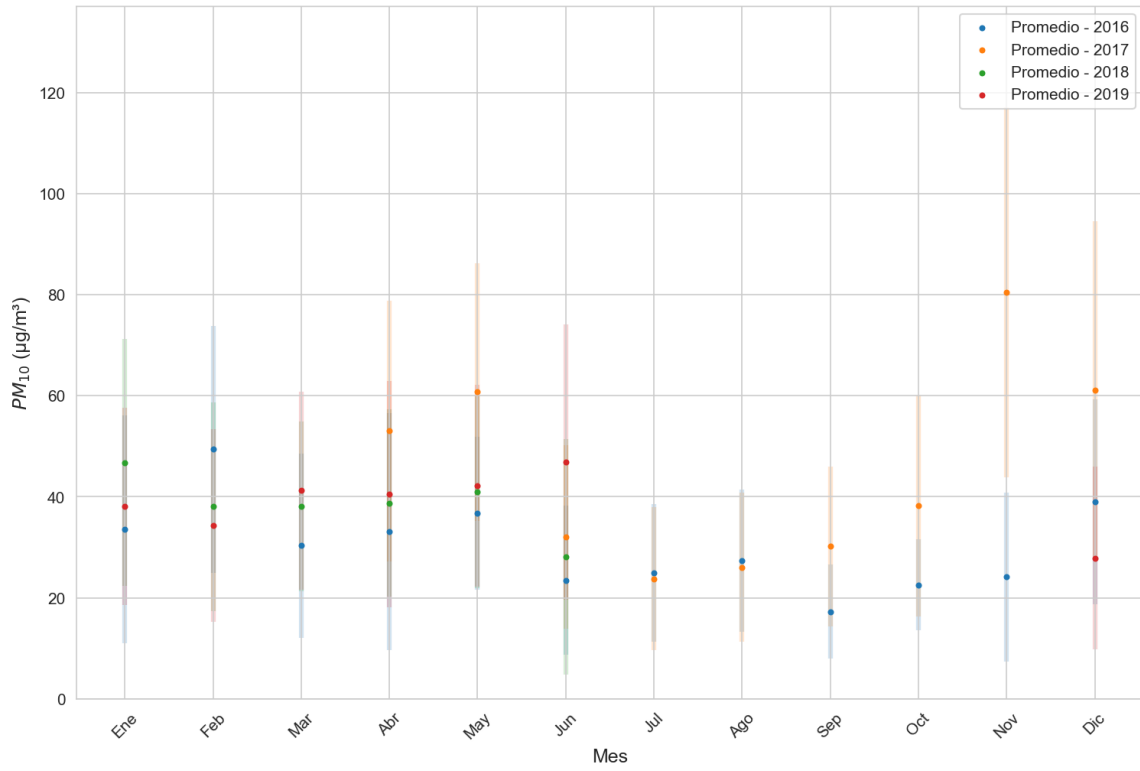


Línea base agrupada- Día laboral – Santa Fe



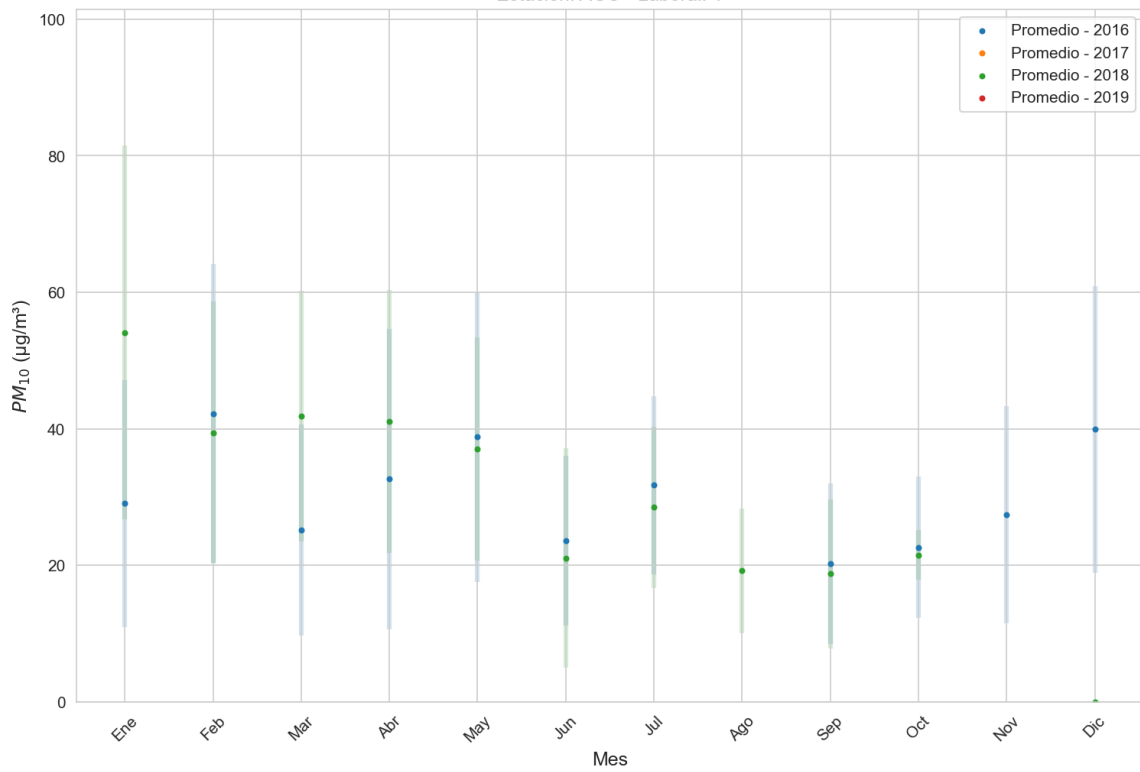
Línea base agrupada- Día laboral - Tlaquepaque

Estación: VAL - Laboral: 1

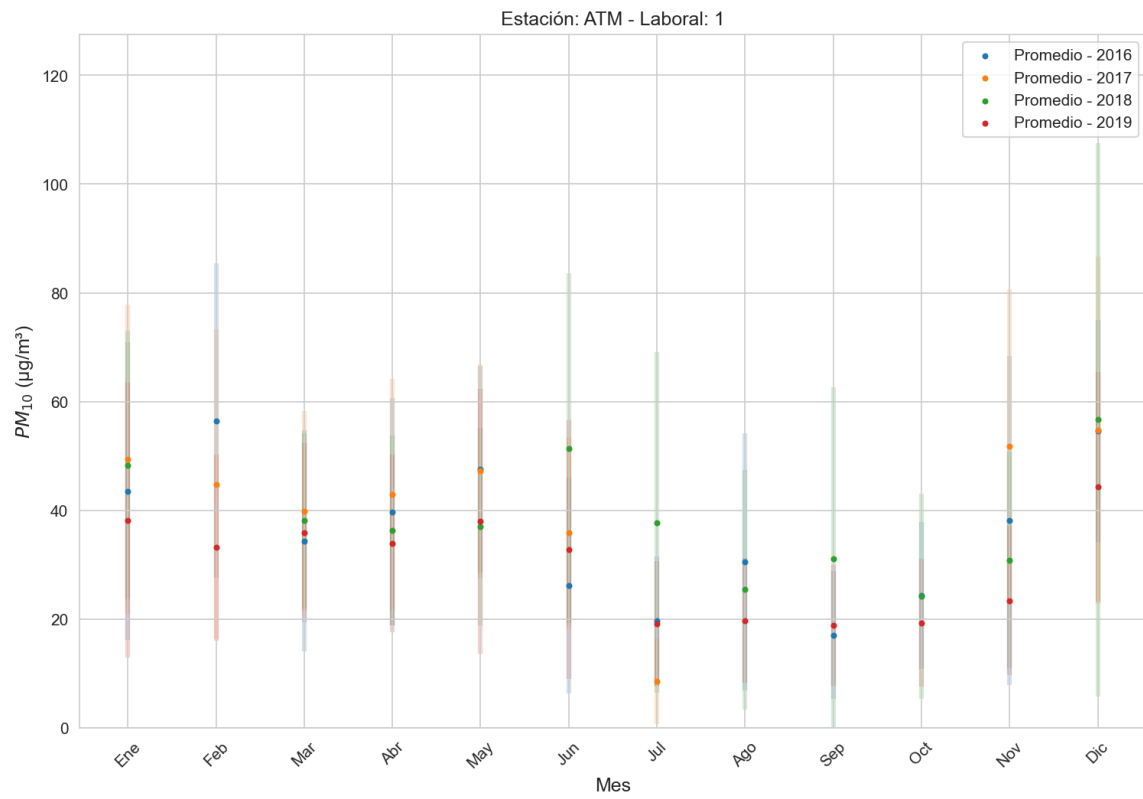


Línea base agrupada- Día laboral - Vallarta

Estación: AGU - Laboral: 1

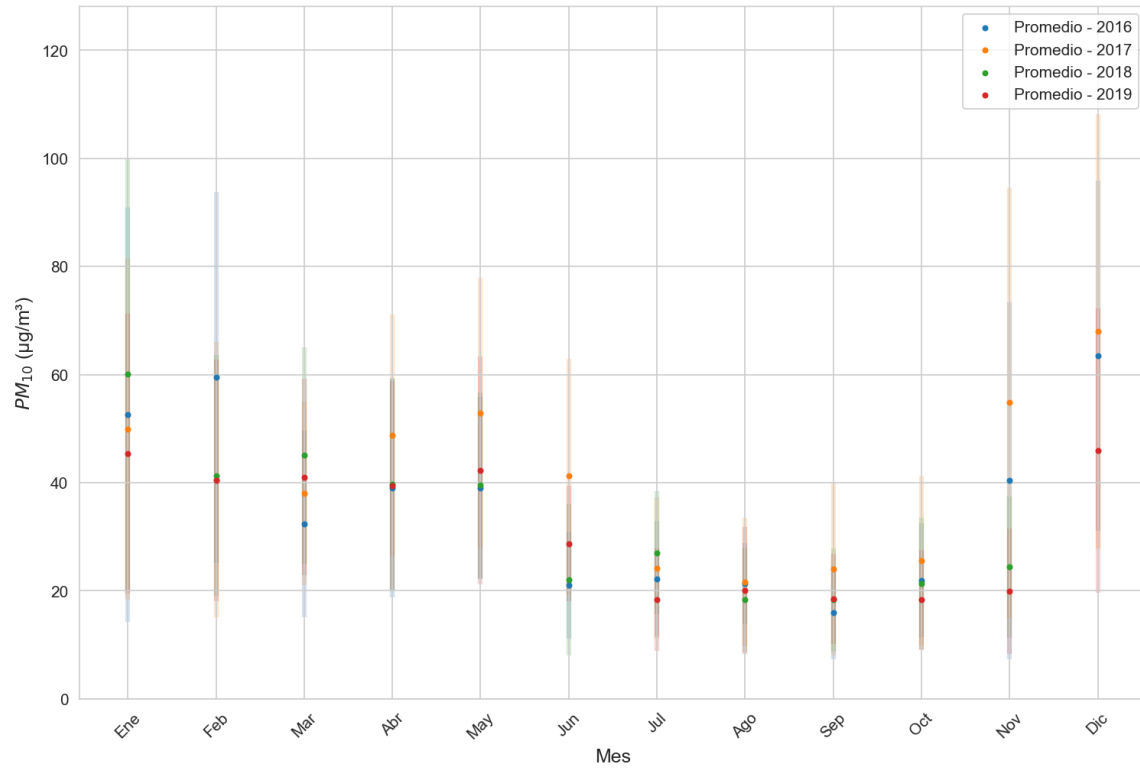


Línea base agrupada- Día laboral - Águilas



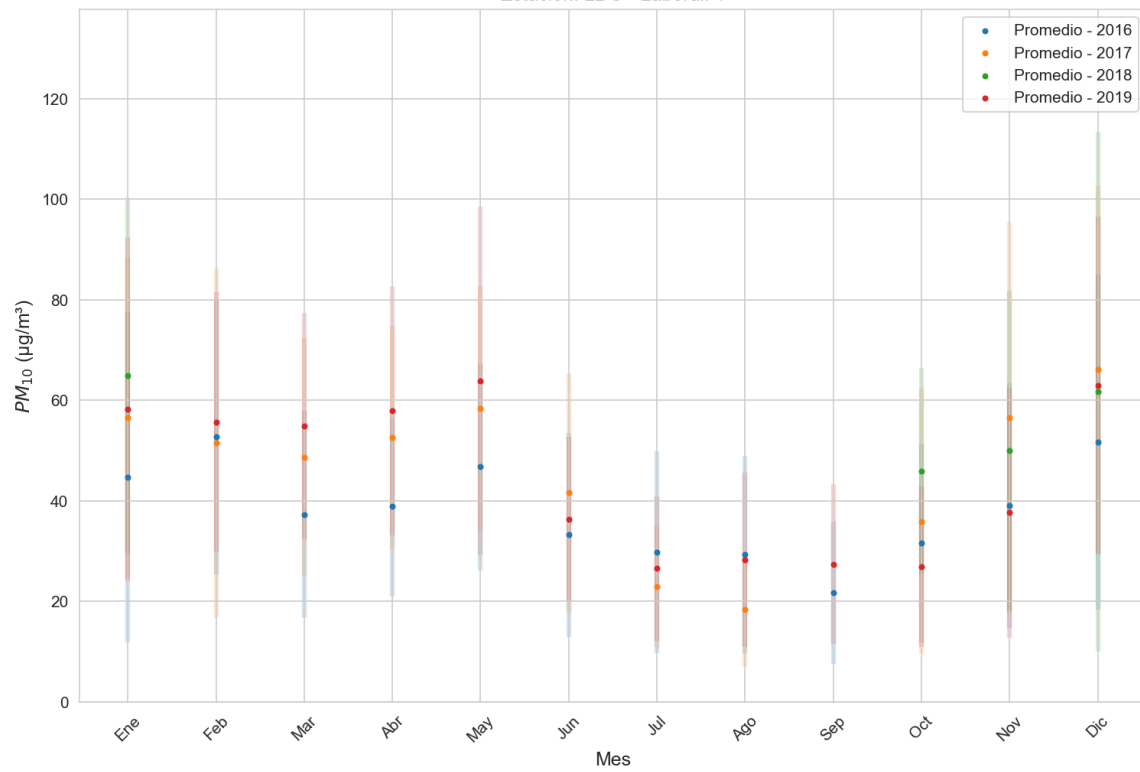
Línea base agrupada- Día laboral - Atemajac

Estación: CEN - Laboral: 1

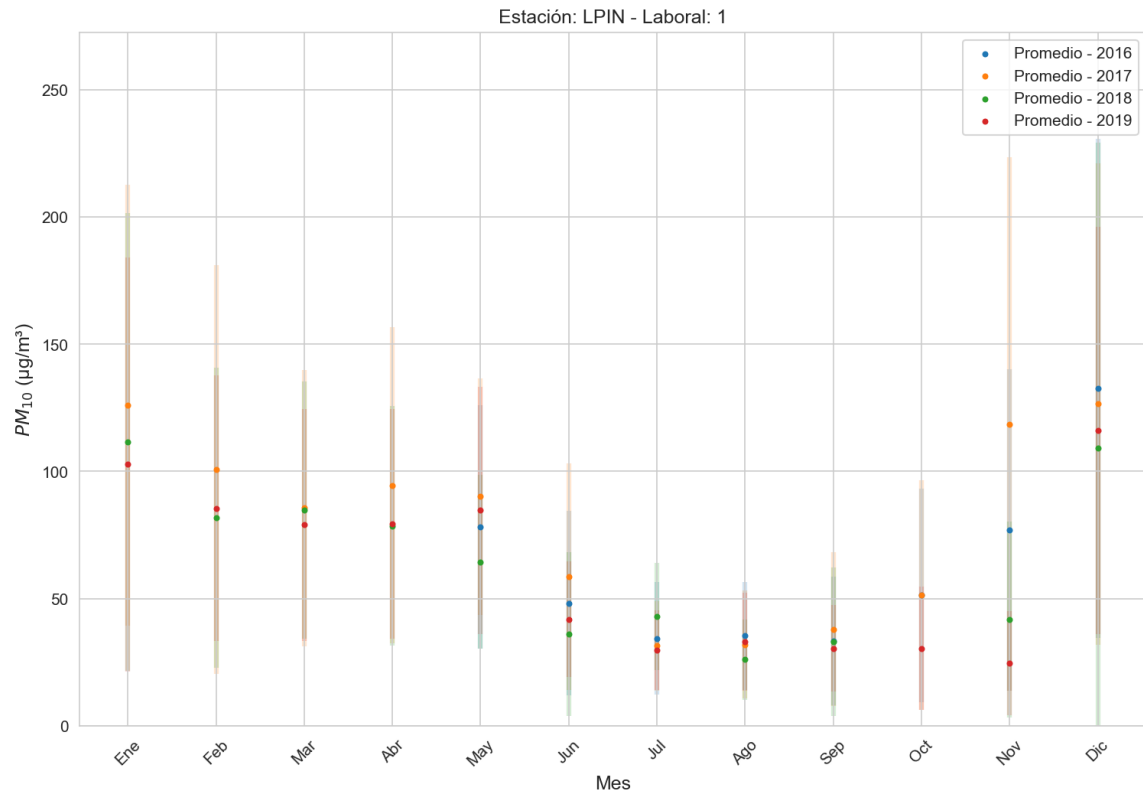


Línea base agrupada- Día laboral - Centro

Estación: LDO - Laboral: 1

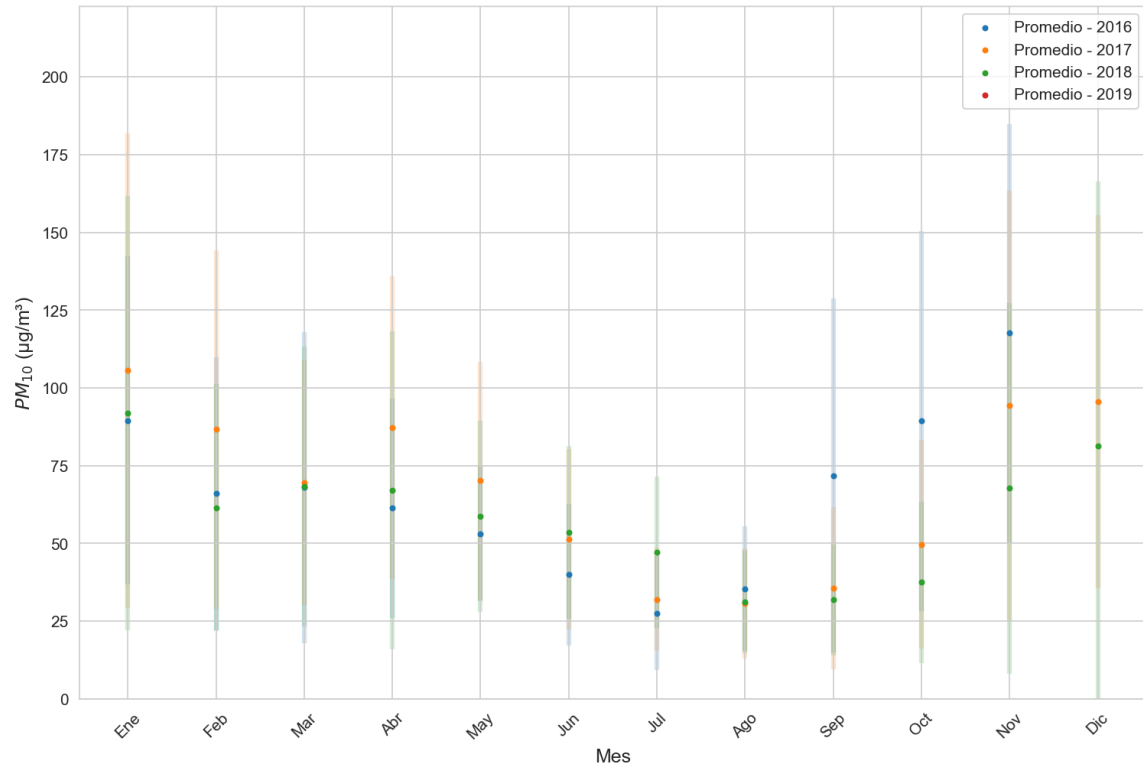


Línea base agrupada- Día laboral – Loma Dorada



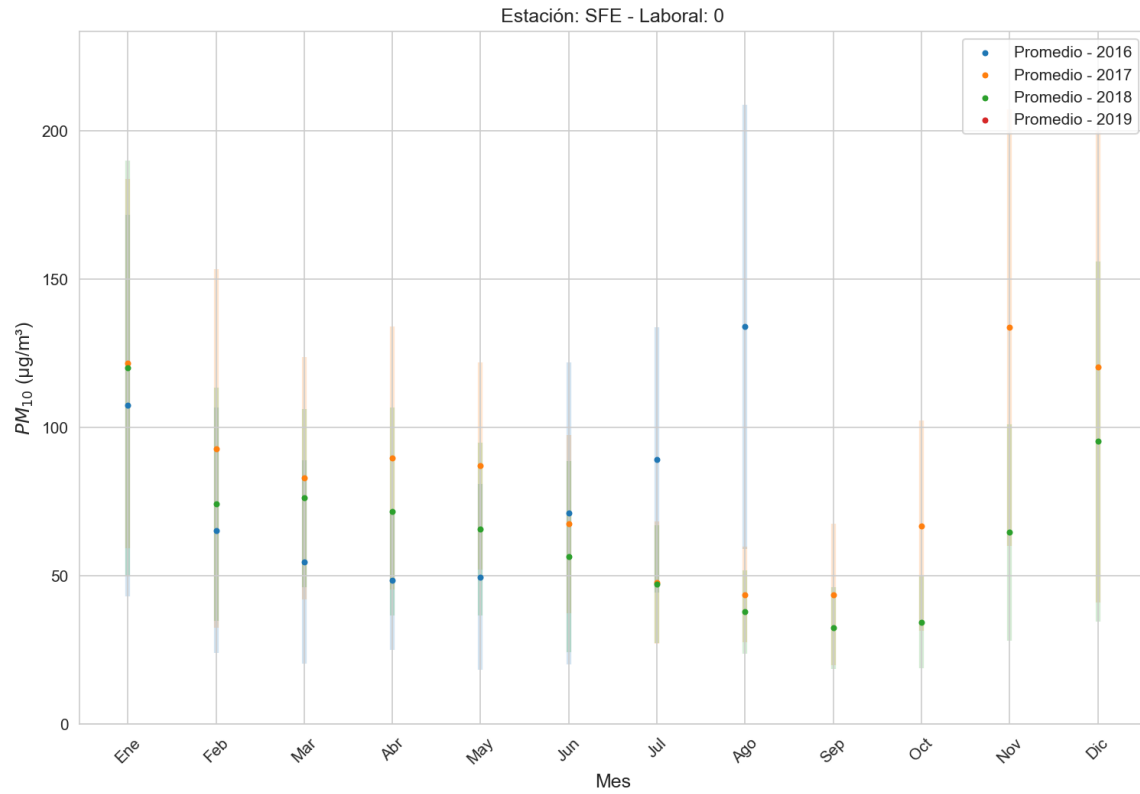
Línea base agrupada- Día laboral – Las Pintas

Estación: MIR - Laboral: 1

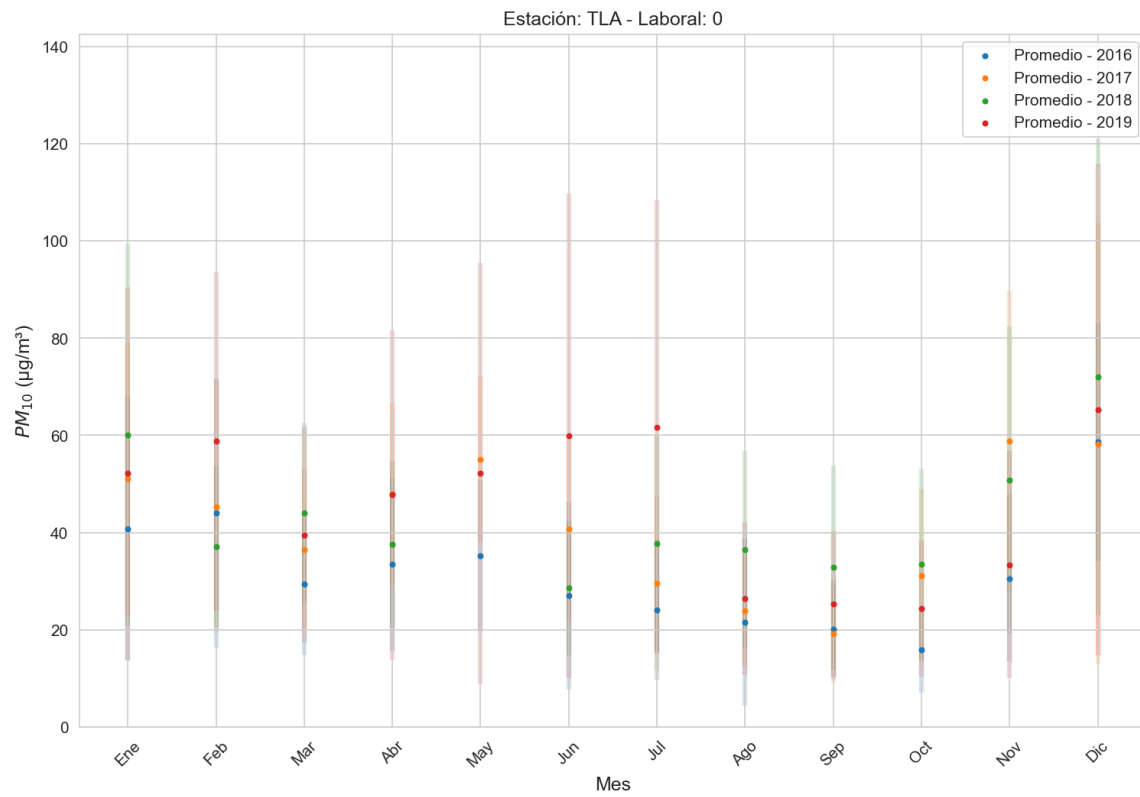


Línea base agrupada- Día laboral - Miravalle

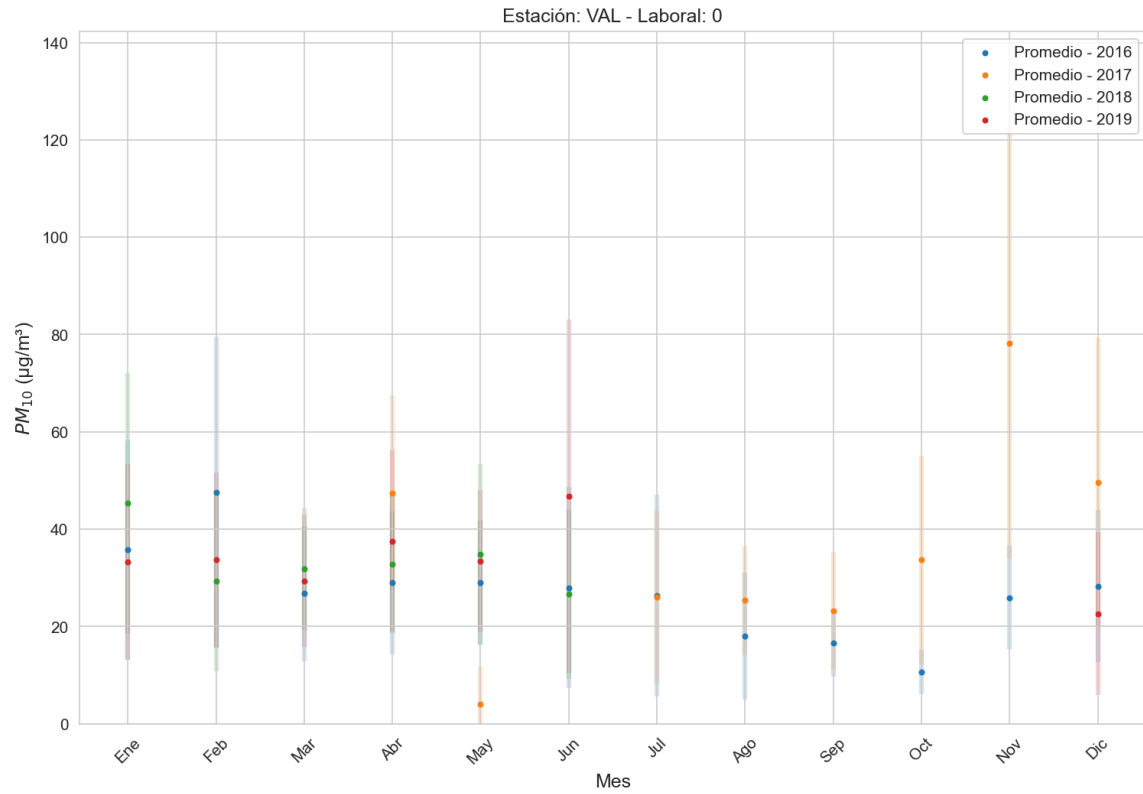
8.5.2.2. Fin de semana



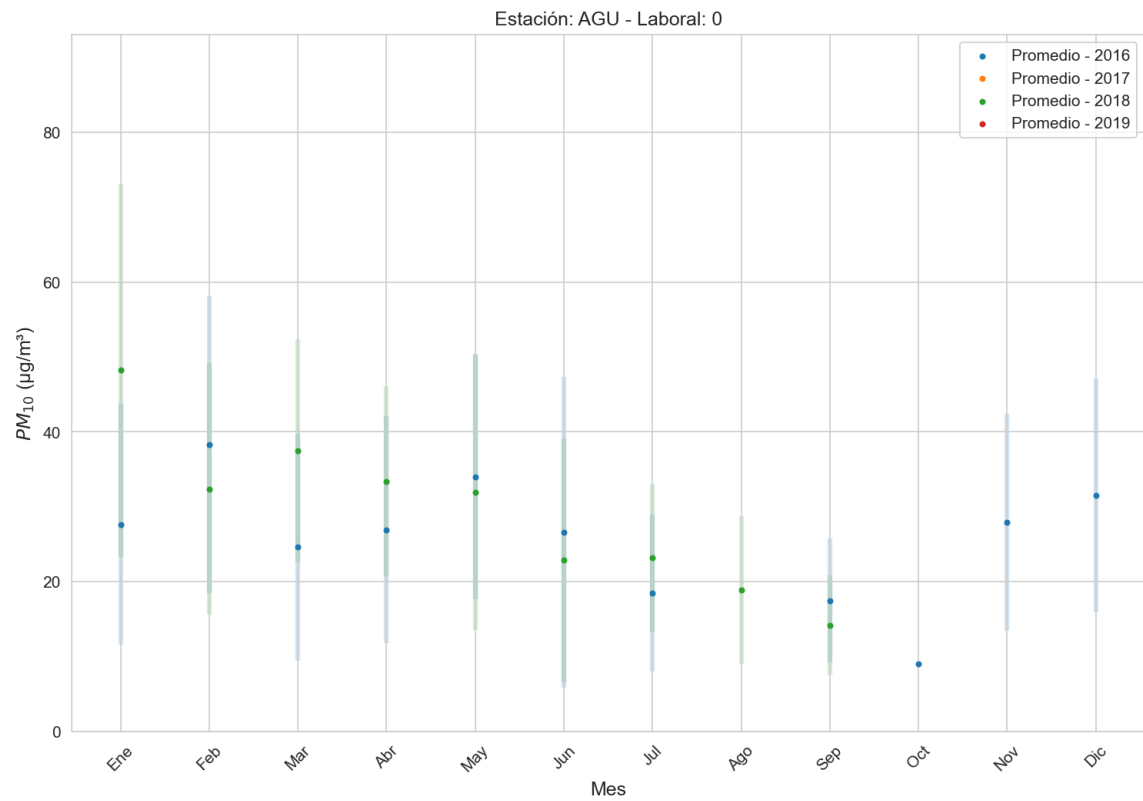
Línea base agrupada- Fin de semana- Santa Fe



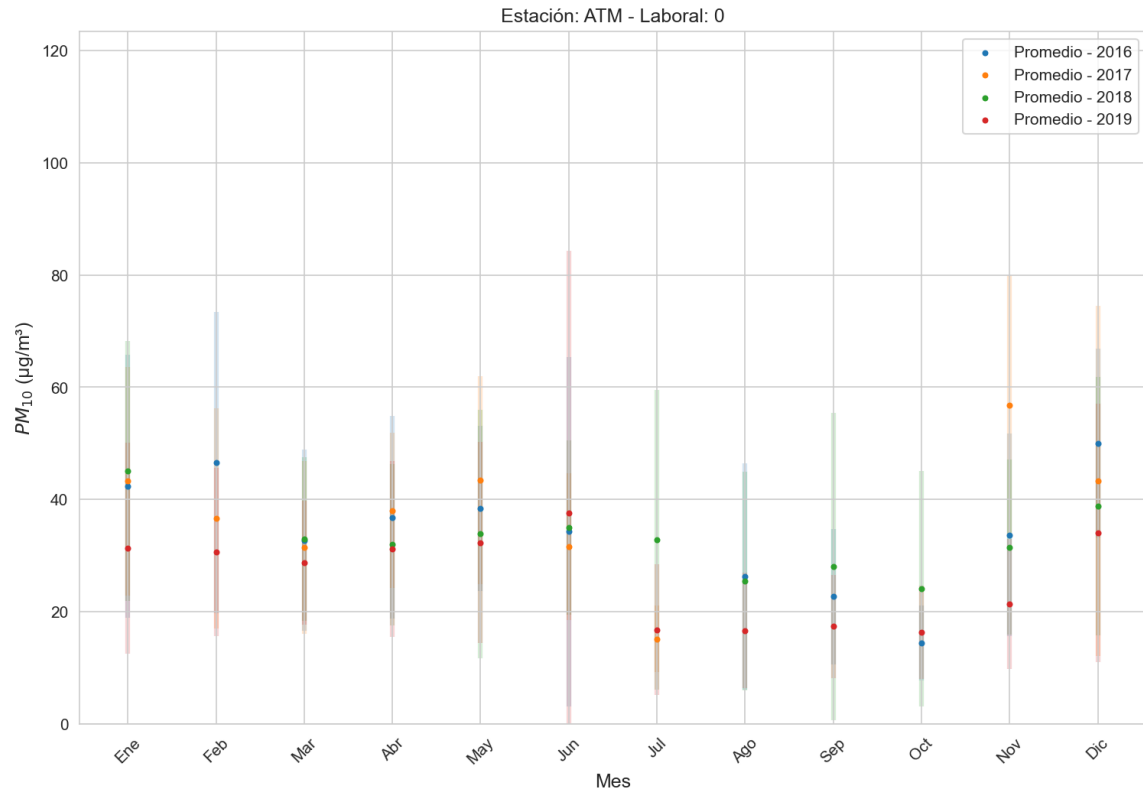
Línea base agrupada- Fin de semana- Tlaquepaque



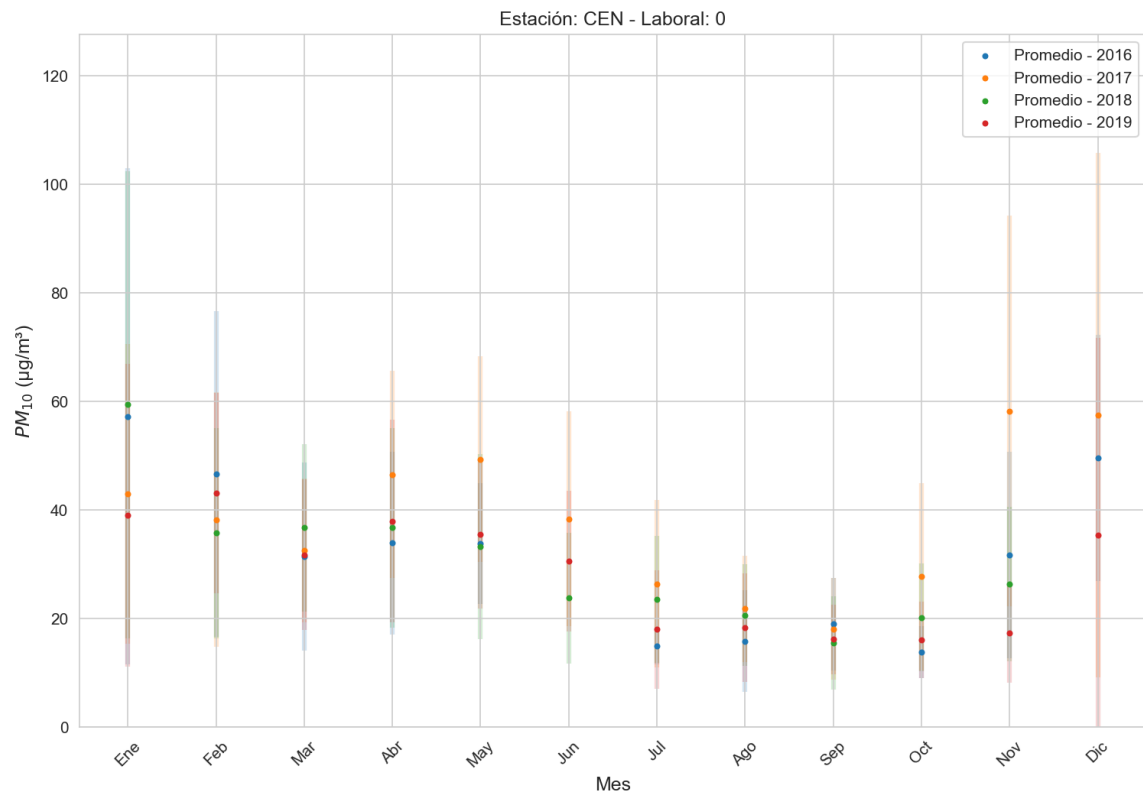
Línea base agrupada– Fin de semana- Vallarta



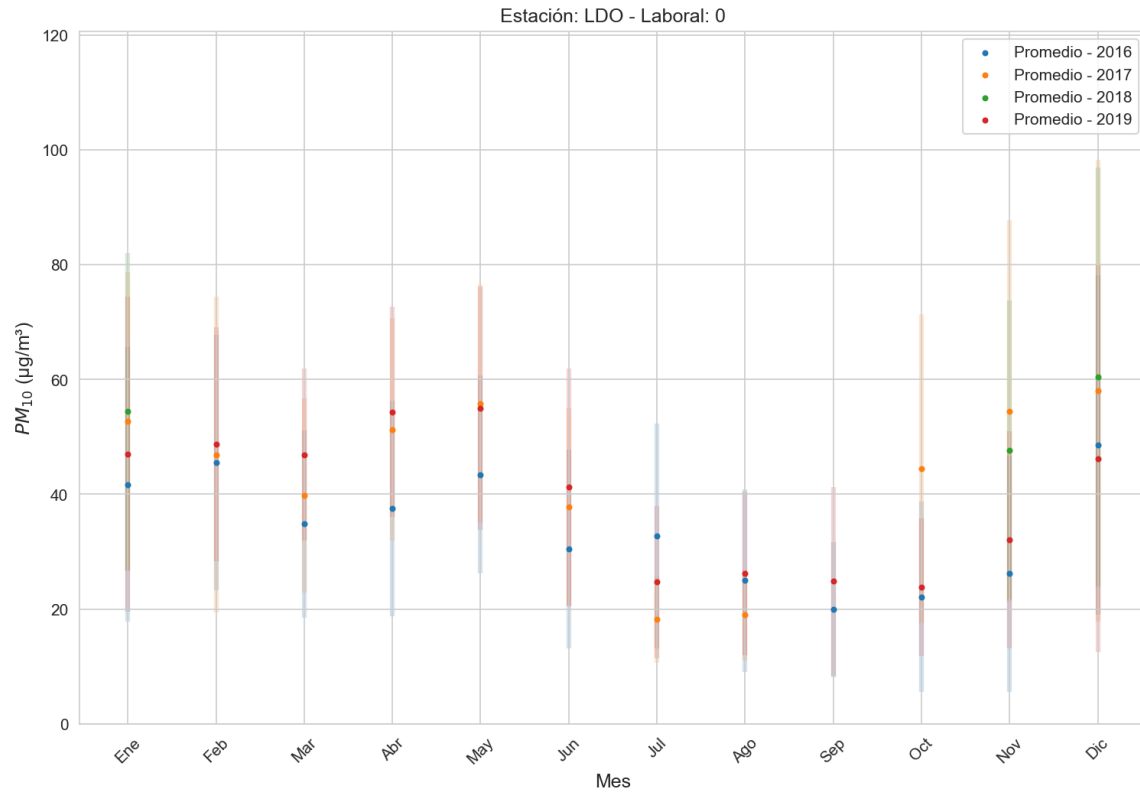
Línea base agrupada– Fin de semana- Águilas



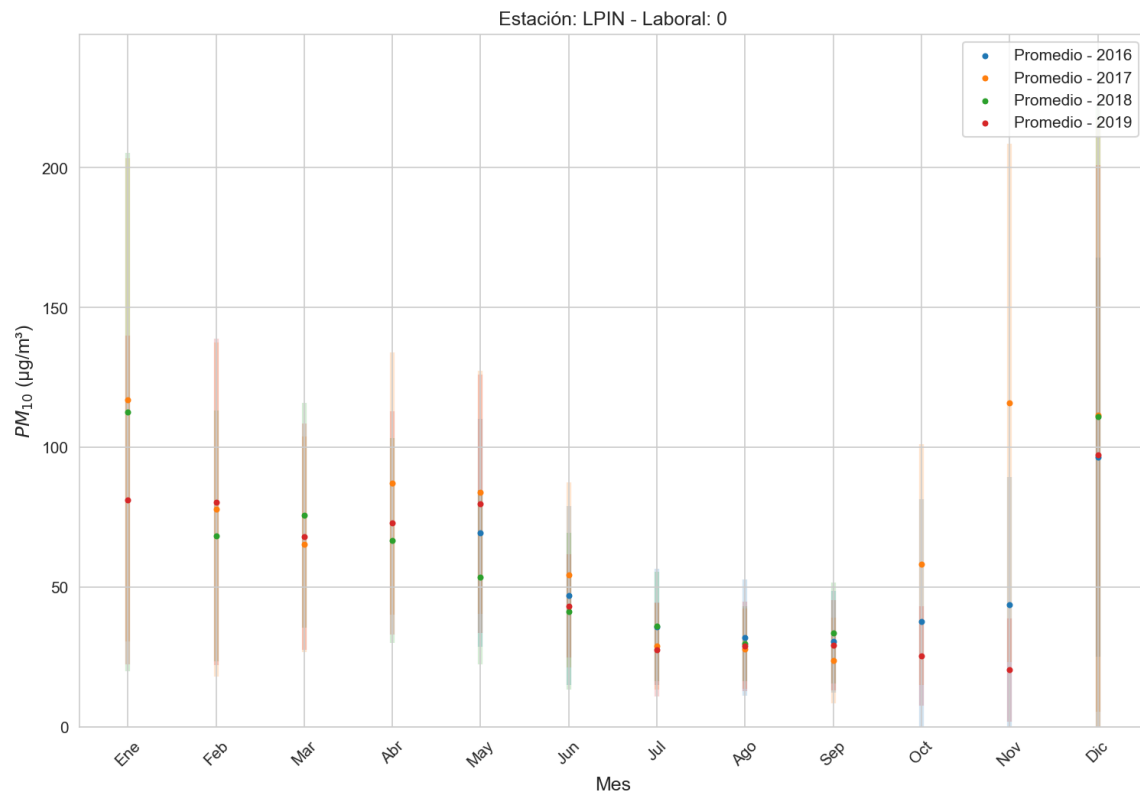
Línea base agrupada- Fin de semana- Atemajac



Línea base agrupada- Fin de semana- Centro

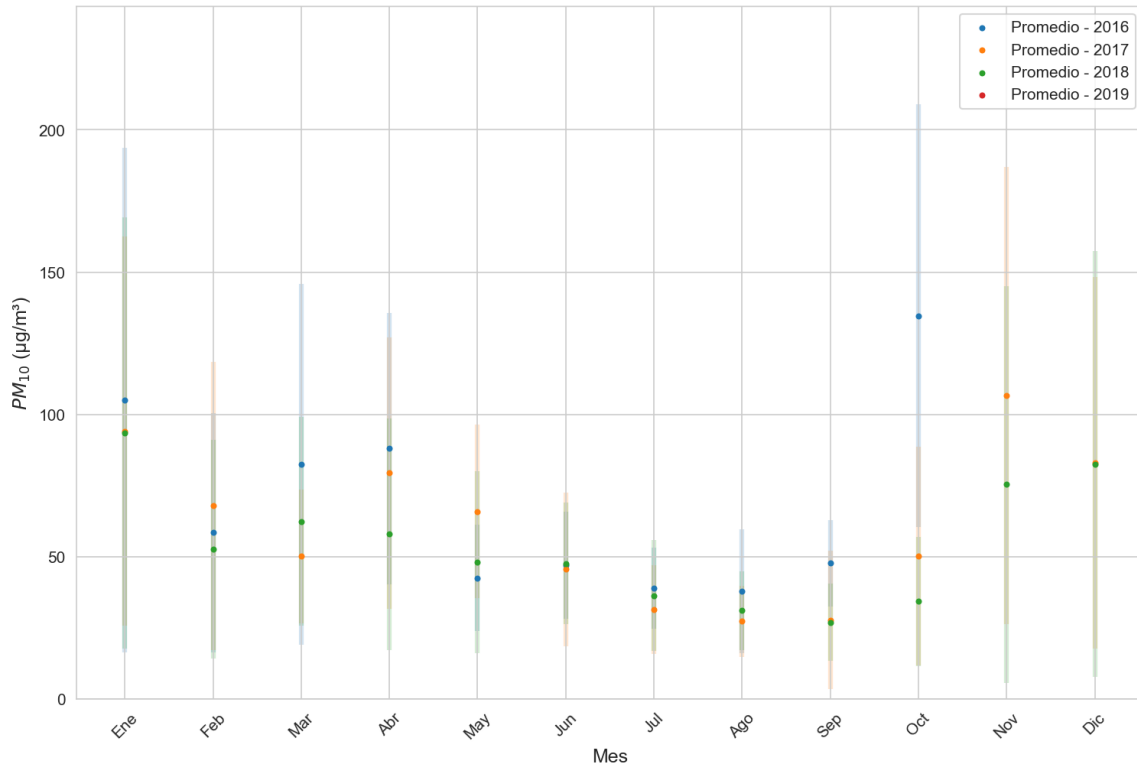


Línea base agrupada- Fin de semana- Loma Dorada



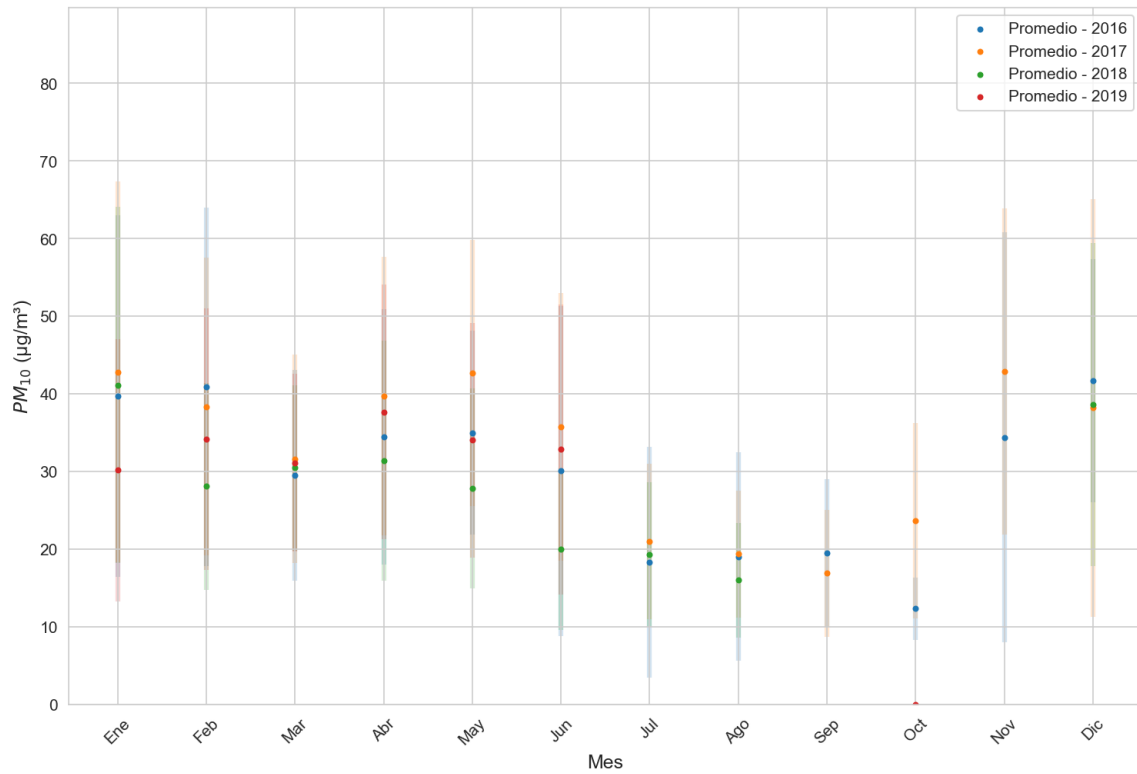
Línea base agrupada- Fin de semana- Las Pintas

Estación: MIR - Laboral: 0



Línea base agrupada- Fin de semana- Miravalle

Estación: OBL - Laboral: 0

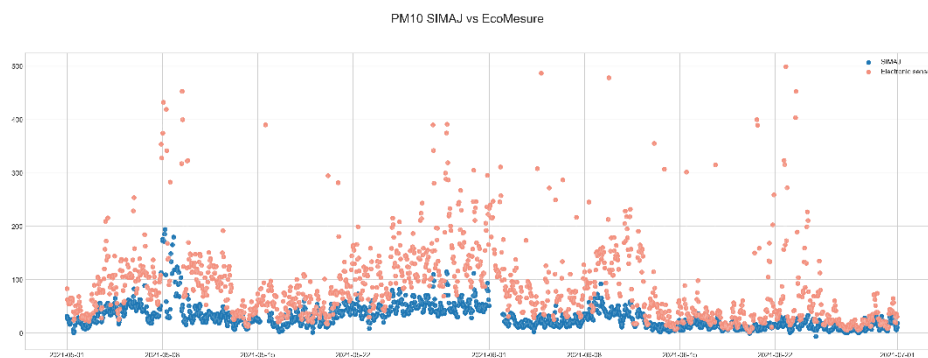


Línea base agrupada- Fin de semana- Oblatos

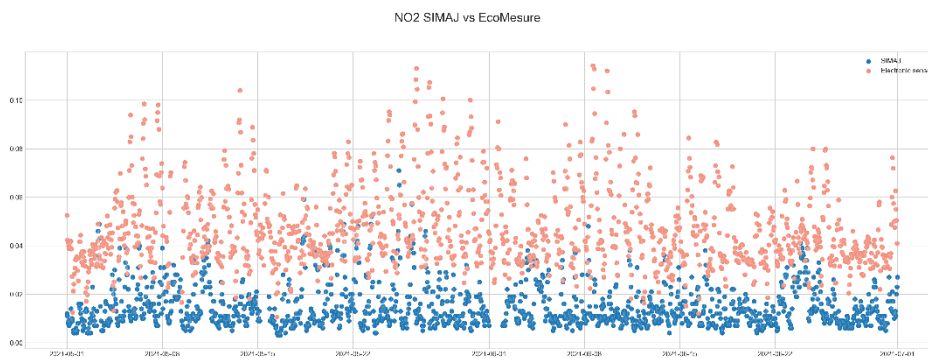
8.6. Anexo F – Gráficas del análisis de sensores de bajo costo

8.6.1. EcoMeasure

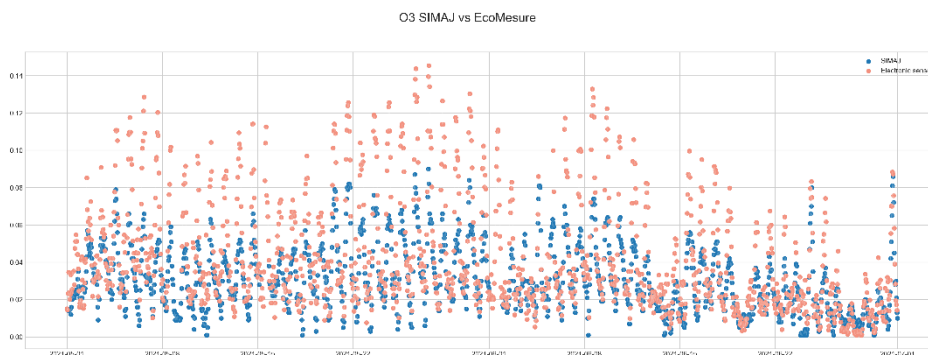
8.6.1.1. Dispersión de datos



Dispersión de contaminantes PM₁₀ EcoMeasure vs SIMAJ



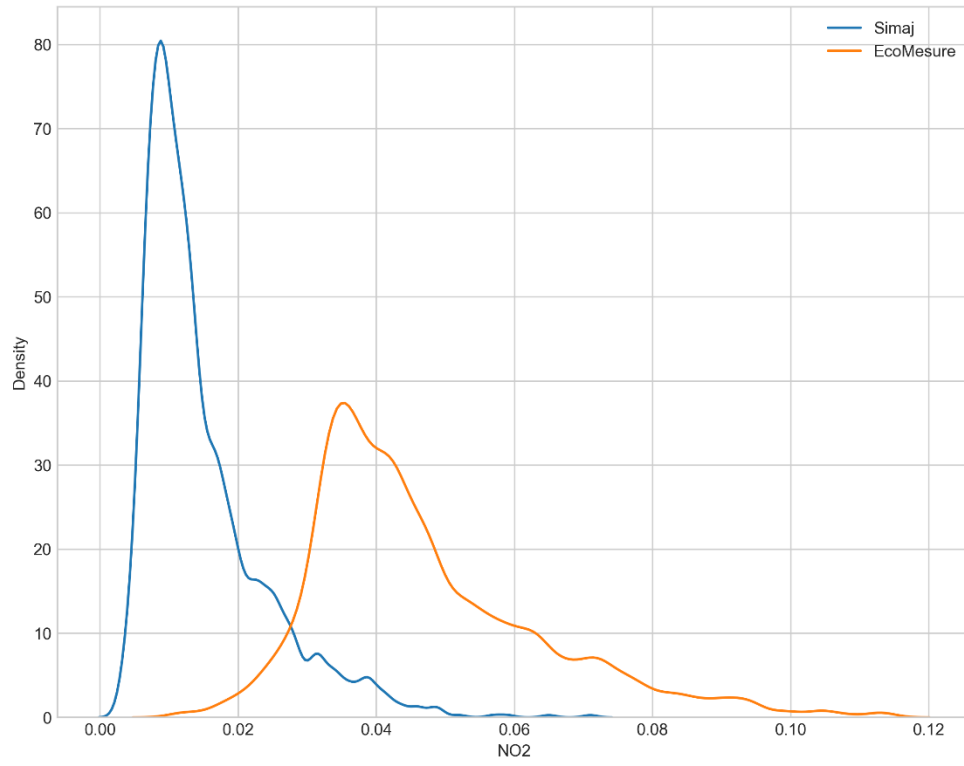
Dispersión de contaminantes NO₂ EcoMeasure vs SIMAJ



Dispersión de contaminantes O₃ EcoMeasure vs SIMAJ

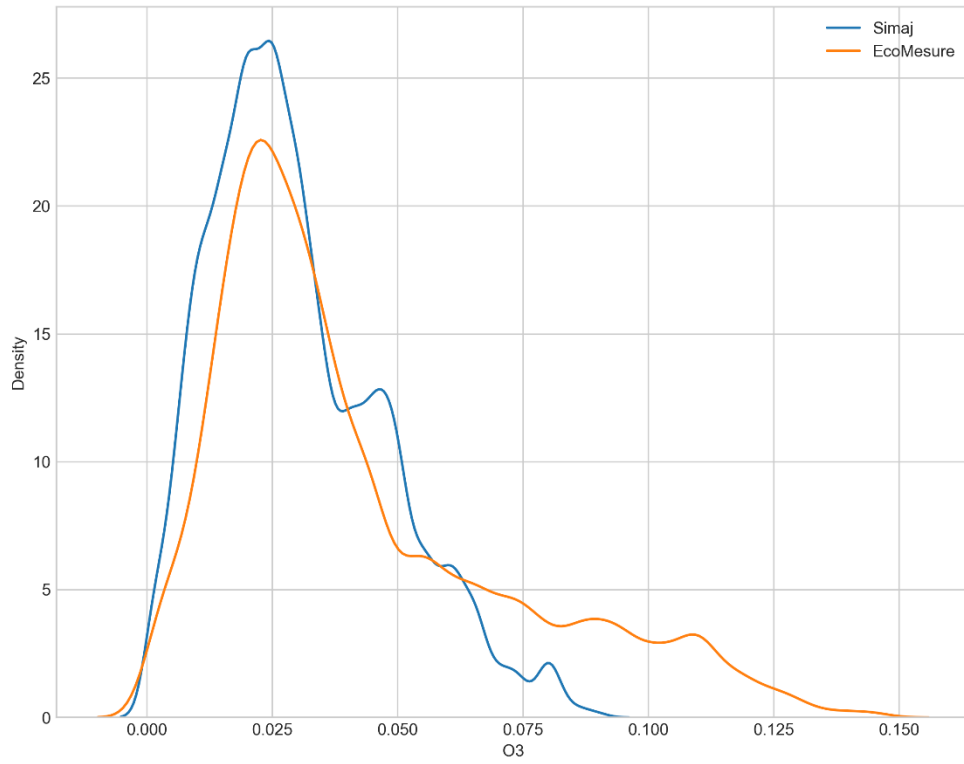
8.6.1.2. Función de densidad de probabilidad

NO2 - EcoMeasure



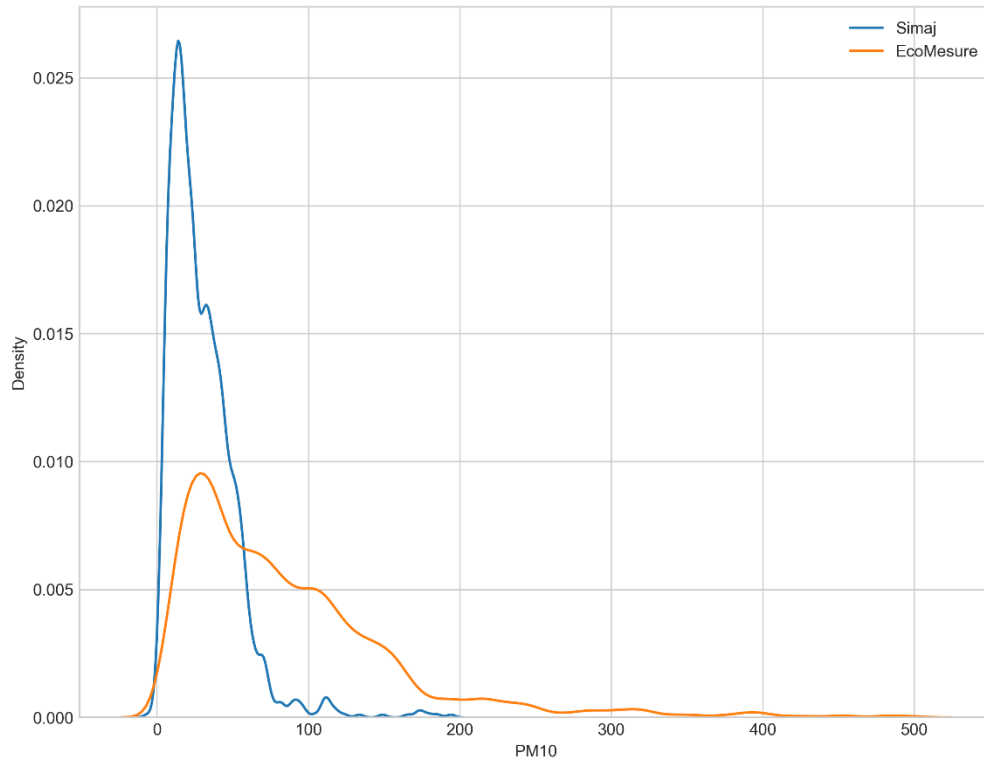
Función de probabilidad NO₂ EcoMeasure vs SIMAJ

O3 - EcoMeasure



Función de probabilidad O₃ EcoMeasure vs SIMAJ

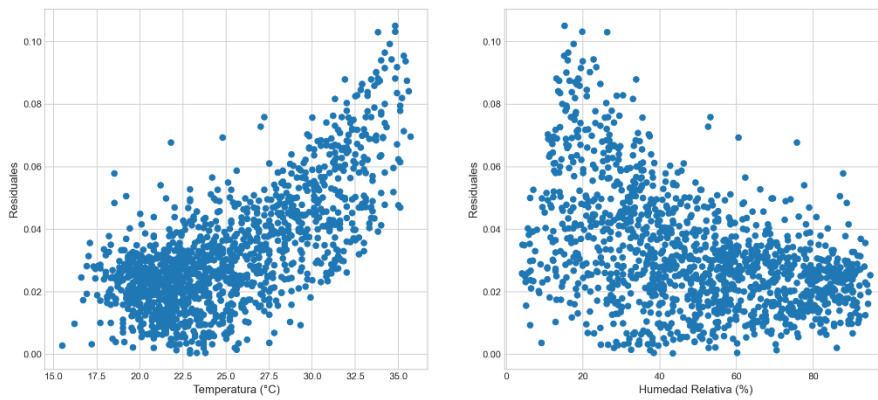
PM10 - EcoMeasure



Función de probabilidad PM₁₀ EcoMeasure vs SIMAJ

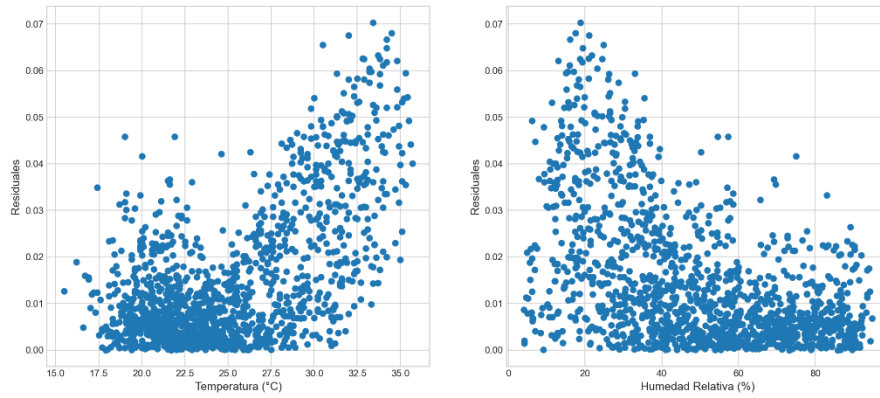
8.6.1.3. Análisis de residuales

NO₂ - EcoMeasure



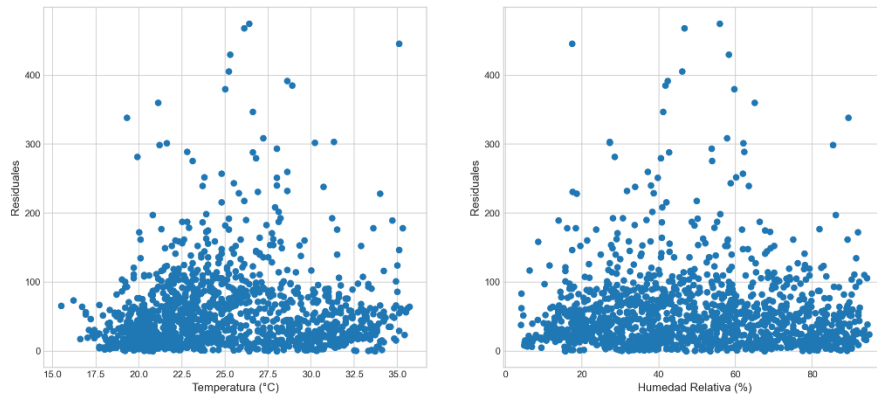
EcoMeasure NO₂ Residuales vs Temperatura (izquierda) – Residuales vs Humedad Relativa (derecha)

O₃ - EcoMeasure



EcoMeasure O₃ Residuales vs Temperatura (izquierda) – Residuales vs Humedad Relativa (derecha)

PM₁₀ - EcoMeasure

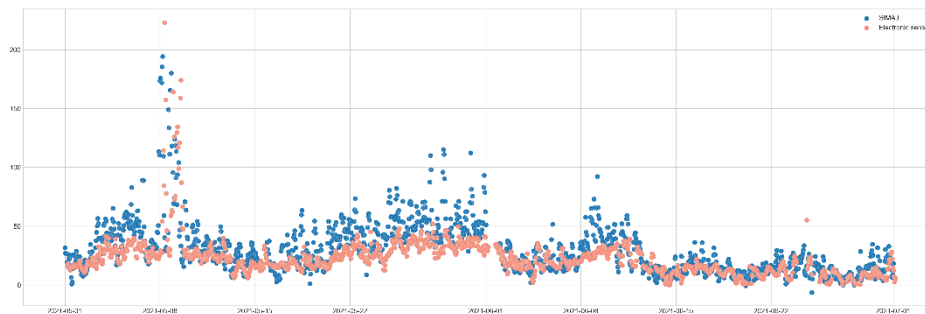


EcoMeasure PM₁₀ Residuales vs Temperatura (izquierda) – Residuales vs Humedad Relativa (derecha)

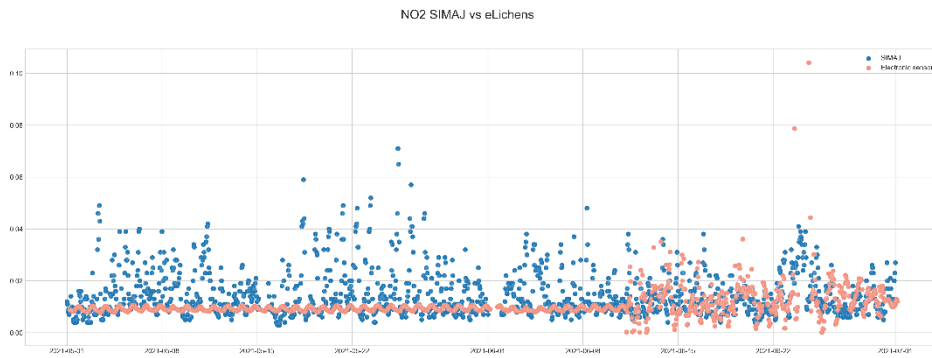
8.6.2. eLichens

8.6.2.1. Dispersión de datos

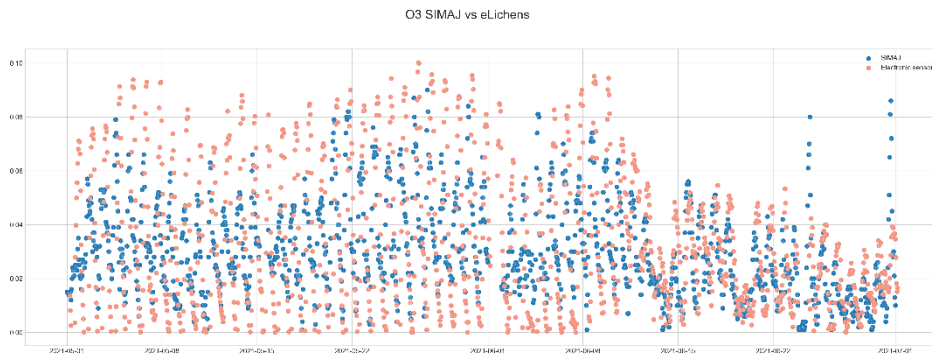
PM₁₀ SIMAJ vs eLichens



Dispersión de contaminantes PM₁₀ eLichens vs SIMAJ



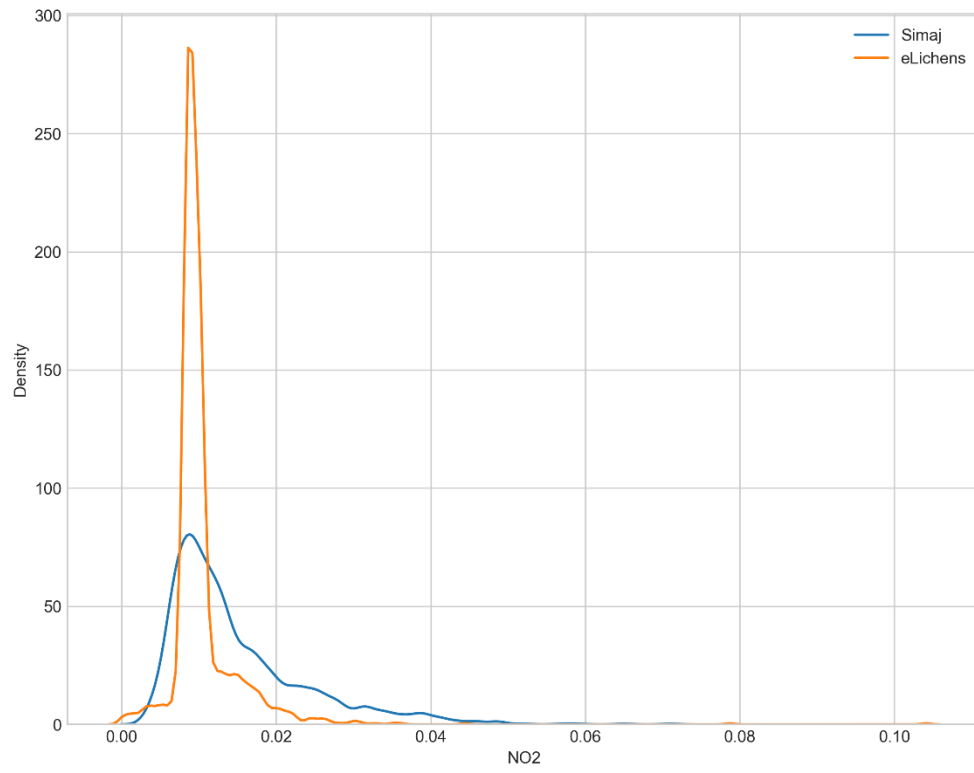
Dispersión de contaminantes NO₂ eLichens vs SIMAJ



Dispersión de contaminantes O₃ eLichens vs SIMAJ

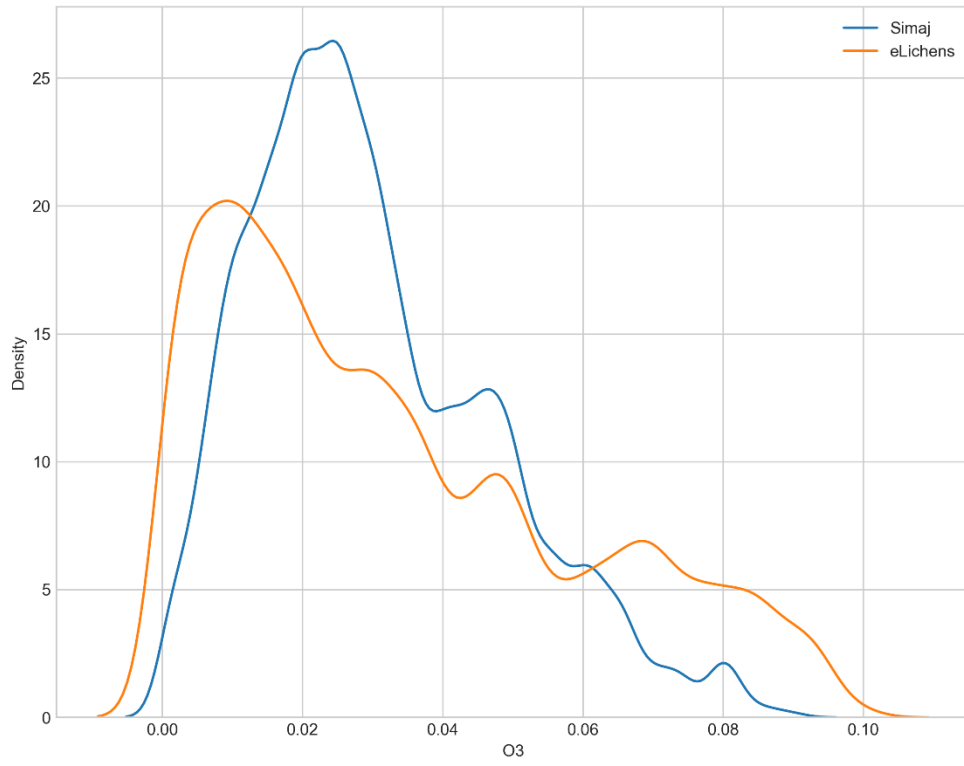
8.6.2.2. Función de densidad de probabilidad

NO₂ - eLichens



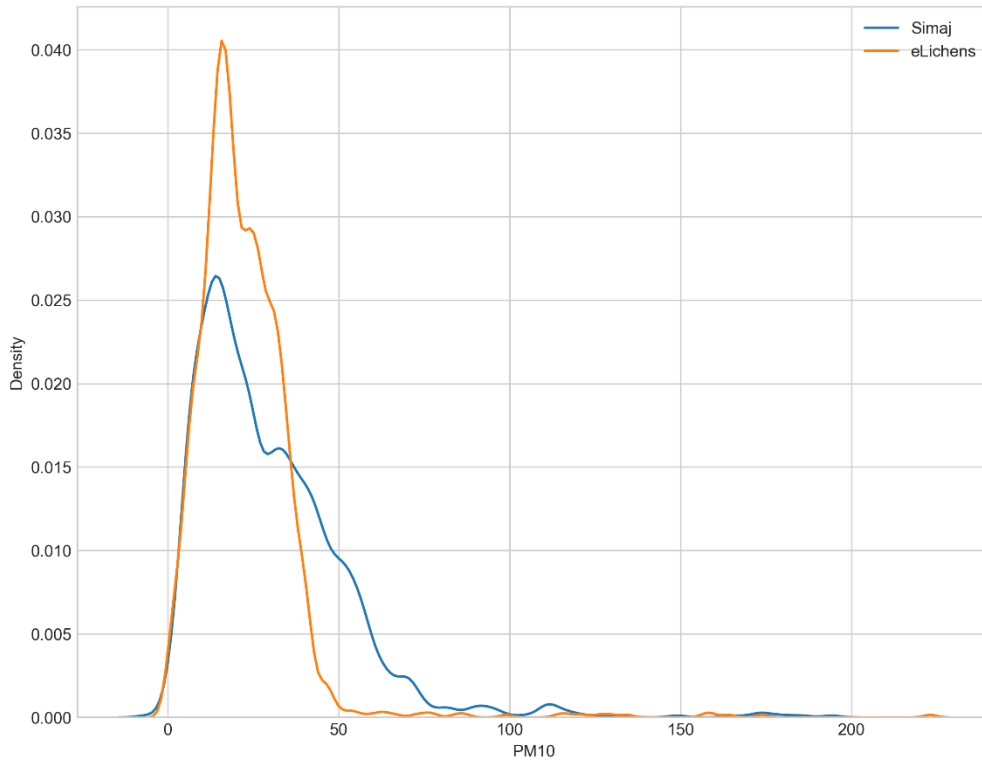
Función de probabilidad NO₂ eLichens vs SIMAJ

O3 - eLichens



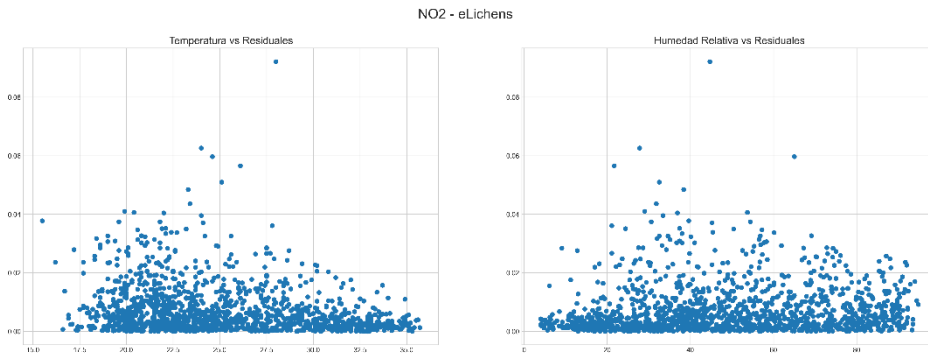
Función de probabilidad O₃ eLichens vs SIMAJ

PM10 - eLichens



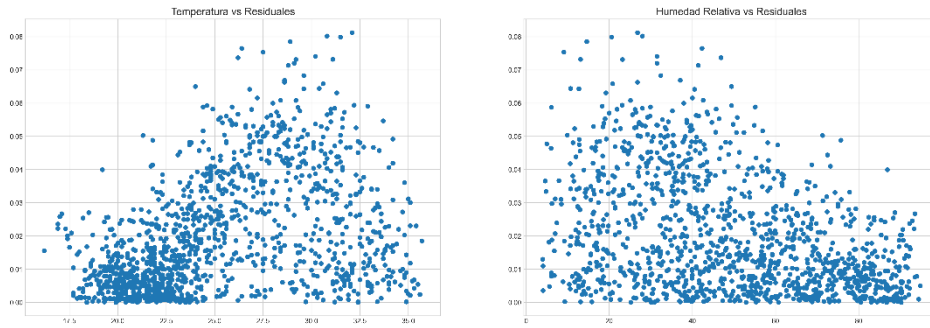
Función de probabilidad PM₁₀ eLichens vs SIMAJ

8.6.2.3. Análisis de residuales



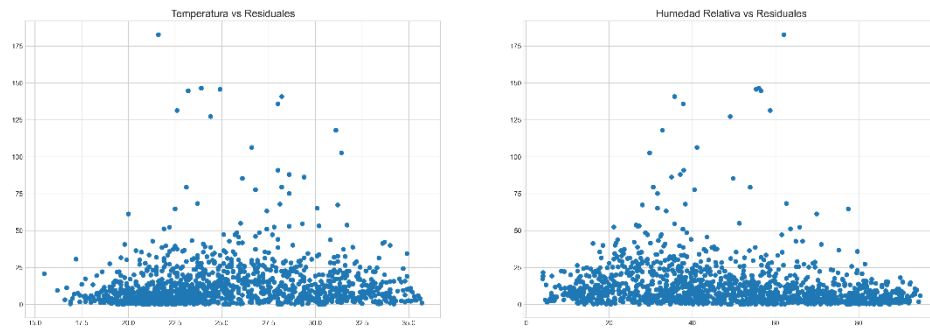
eLichens NO₂ Residuales vs Temperatura (izquierda) – Residuales vs Humedad Relativa (derecha)

O3 - eLichens



eLichens O₃ Residuales vs Temperatura (izquierda) – Residuales vs Humedad Relativa (derecha)

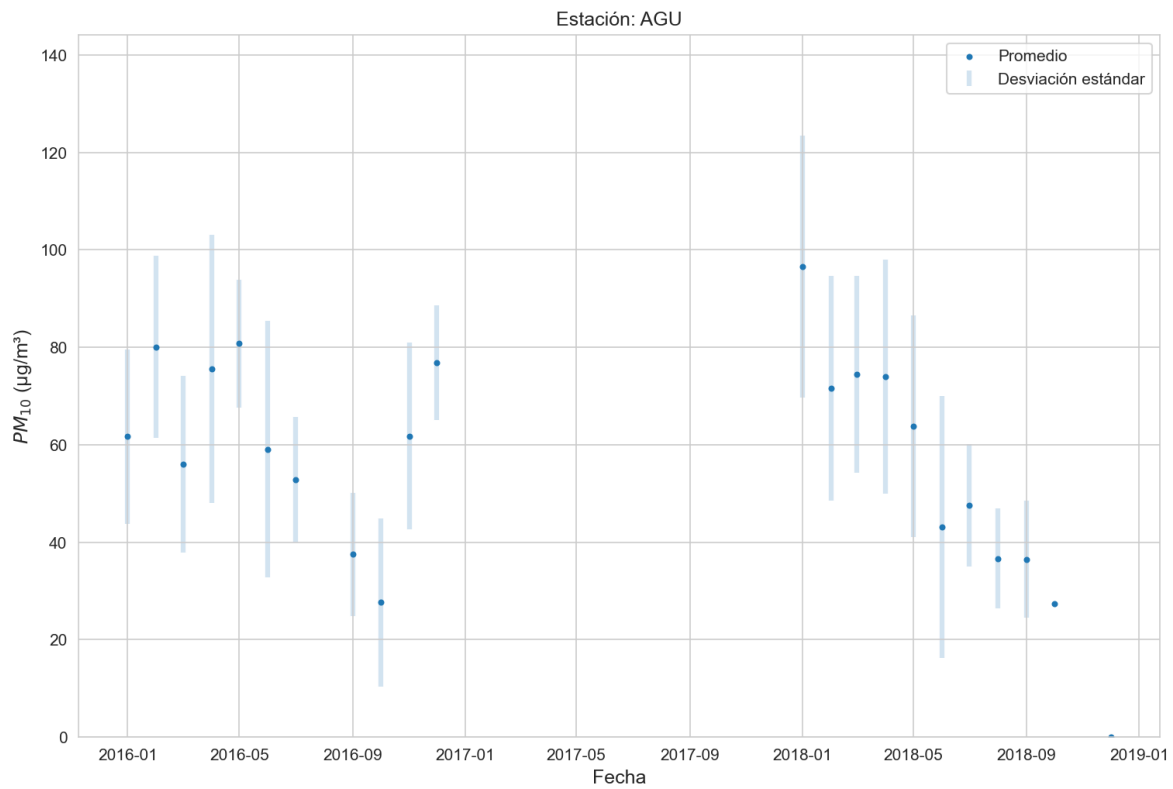
PM10 - eLichens



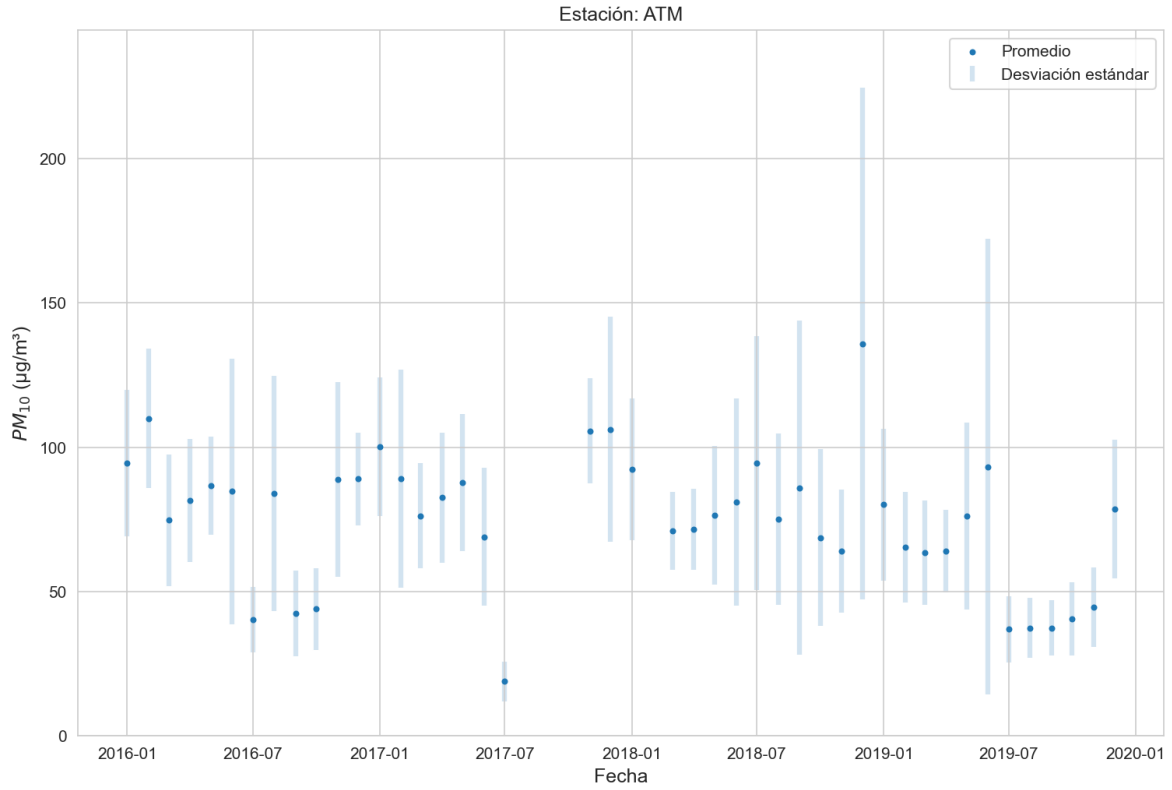
eLichens PM₁₀ Residuales vs Temperatura (izquierda) – Residuales vs Humedad Relativa (derecha)

8.7. Anexo G – Promedio de máximos diarios por mes

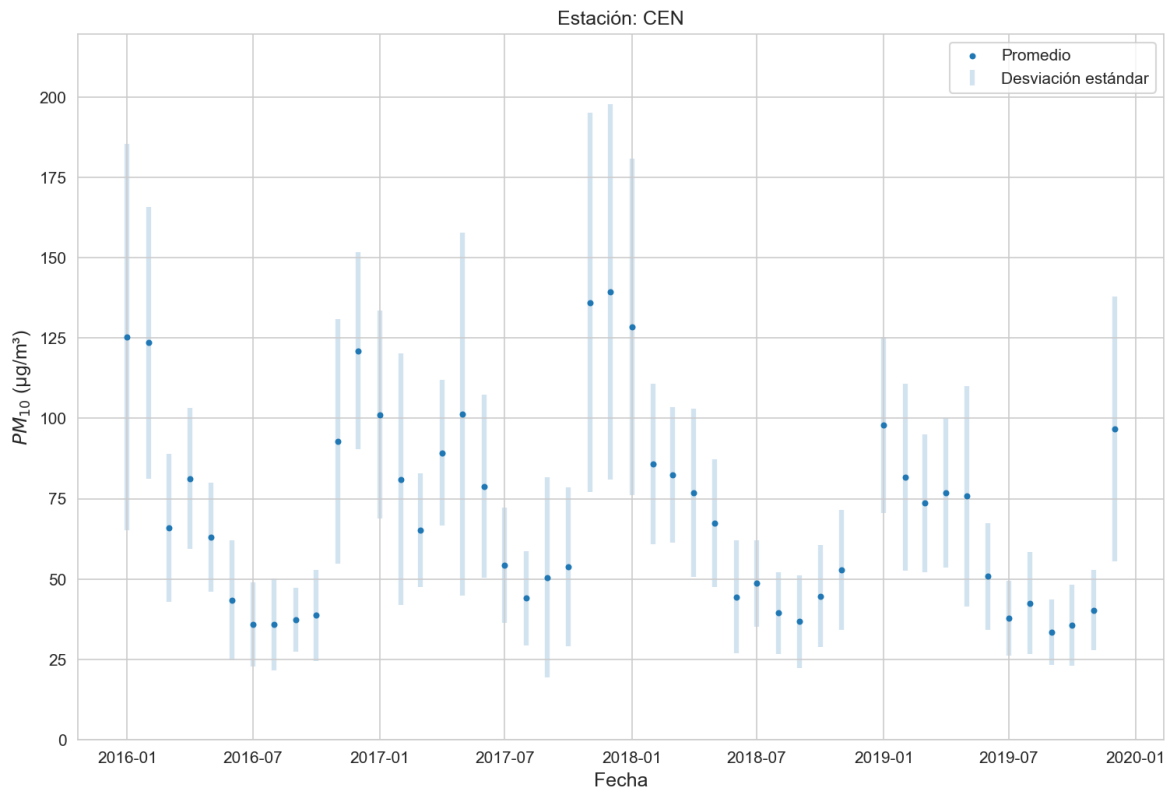
8.7.1. Máximos mensuales continuos



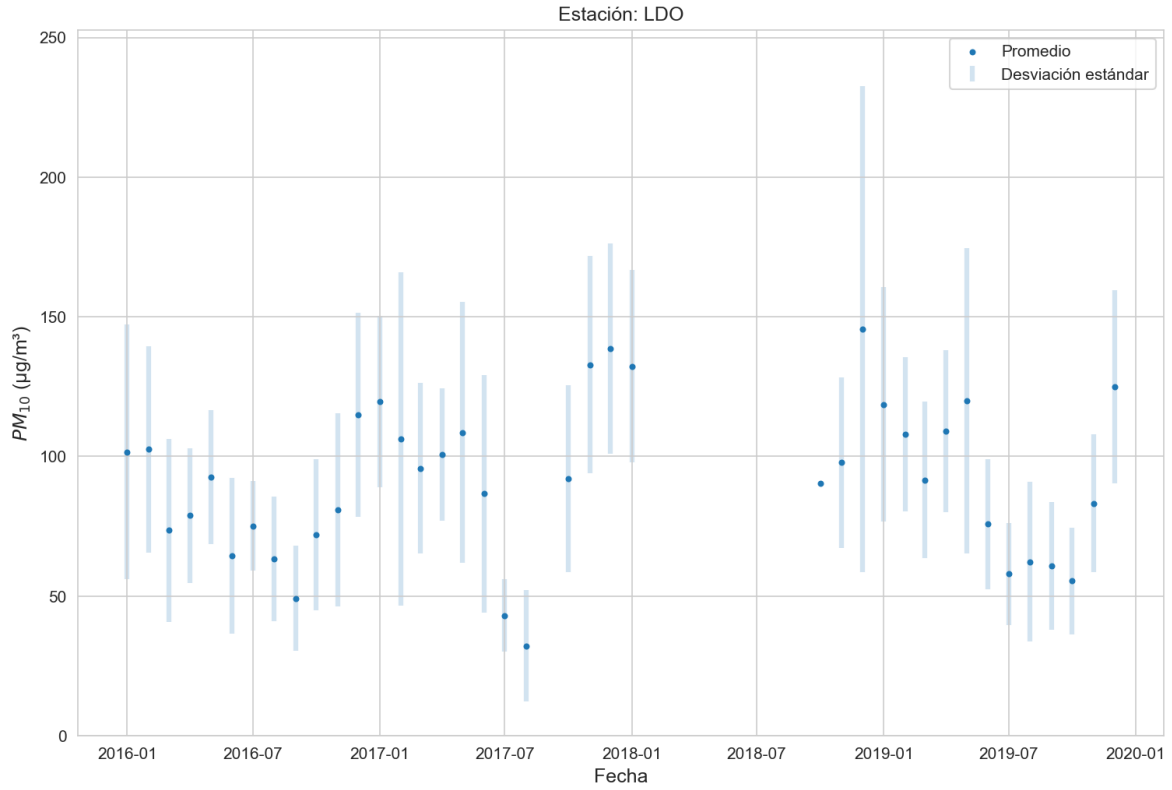
Promedio de máximos diarios por mes – Continuo - Águilas



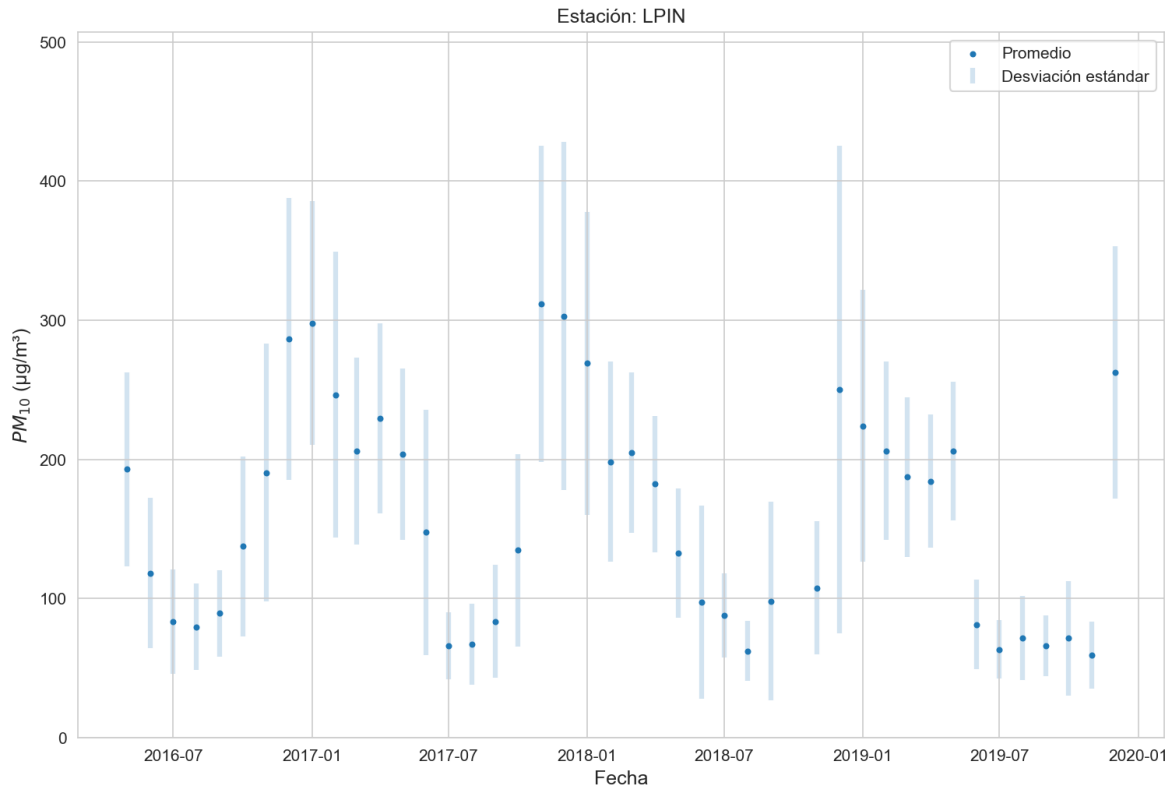
Promedio de máximos diarios por mes – Continuo - Atemajac



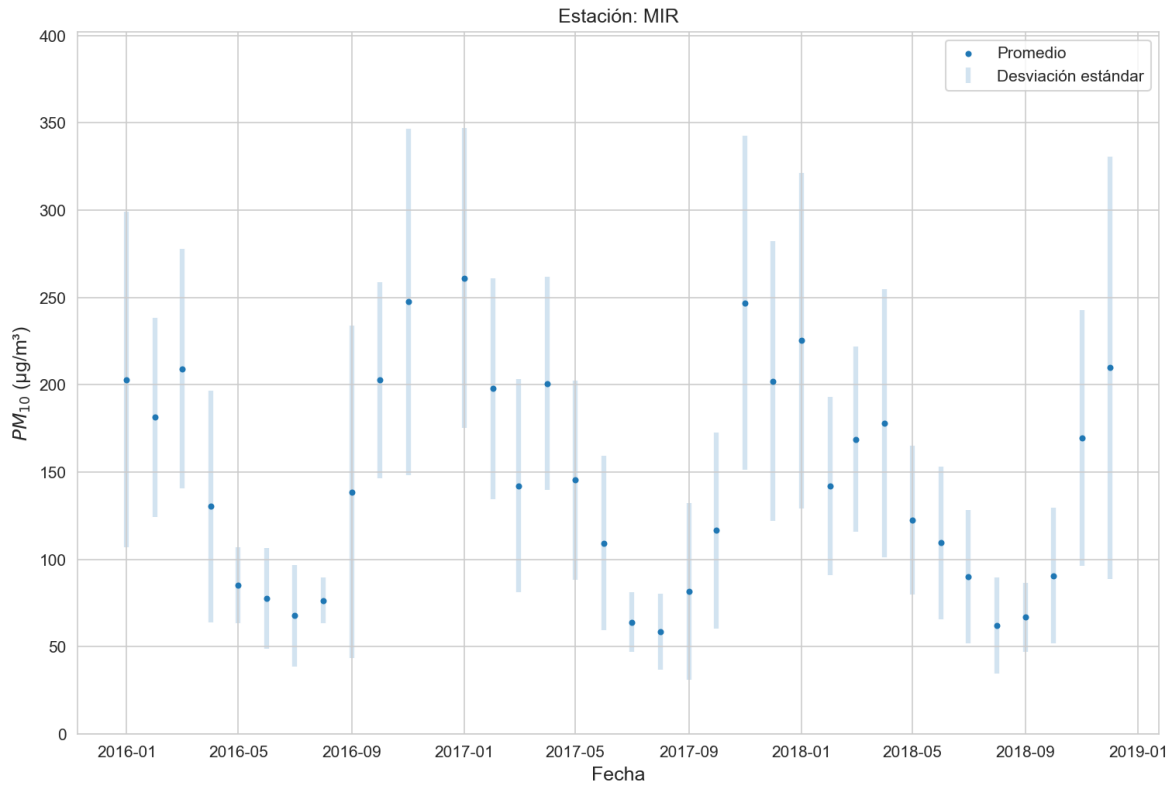
Promedio de máximos diarios por mes – Continuo - Centro



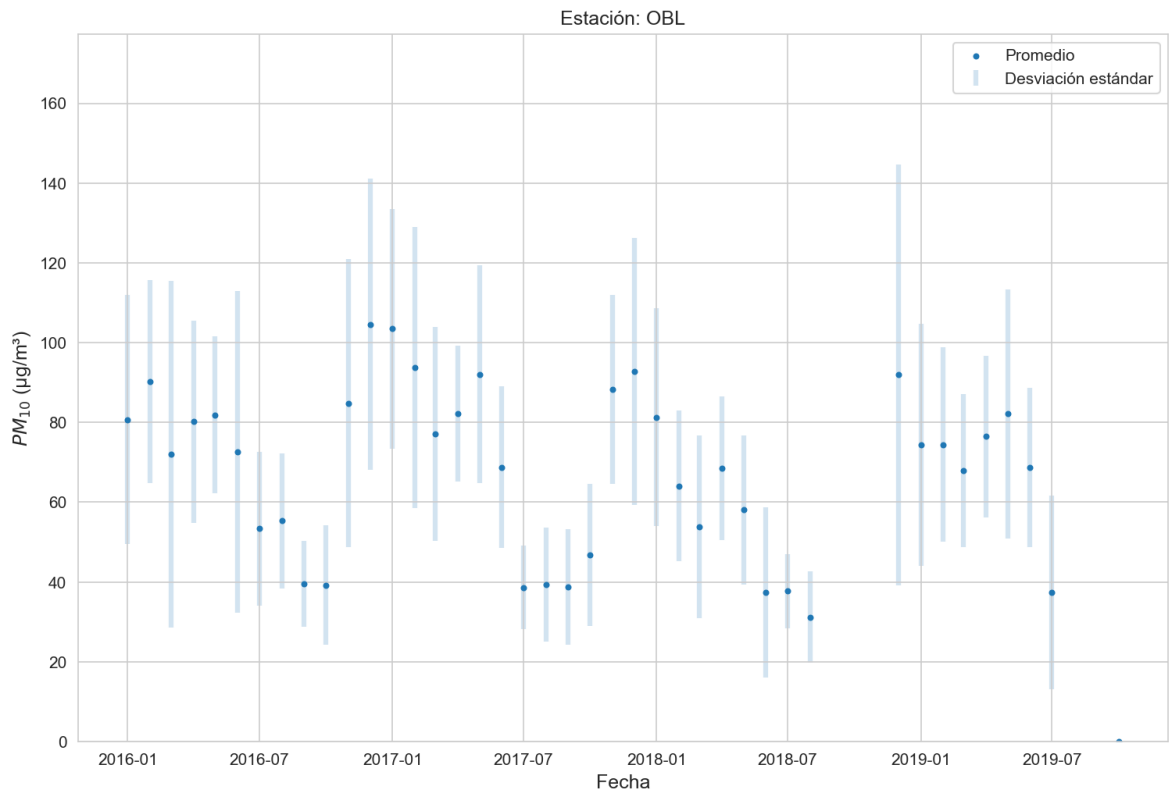
Promedio de máximos diarios por mes – Continuo – Loma Dorada



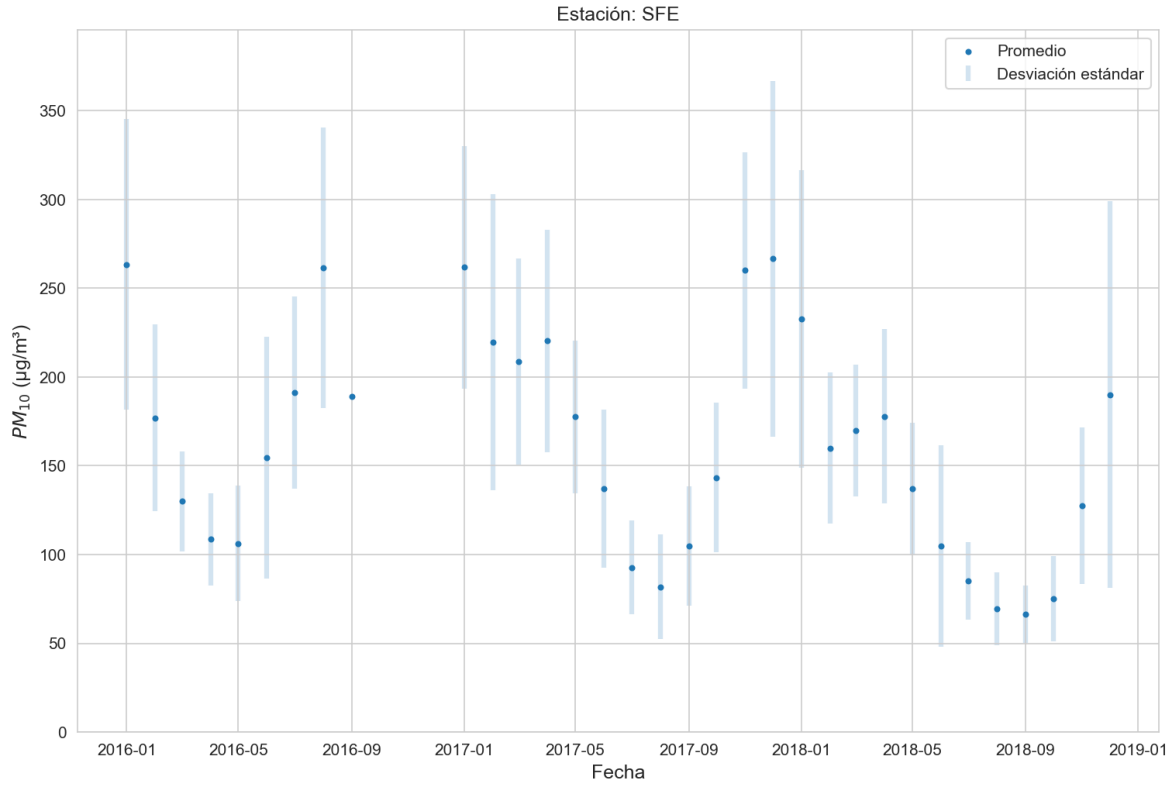
Promedio de máximos diarios por mes – Continuo – Las Pintas



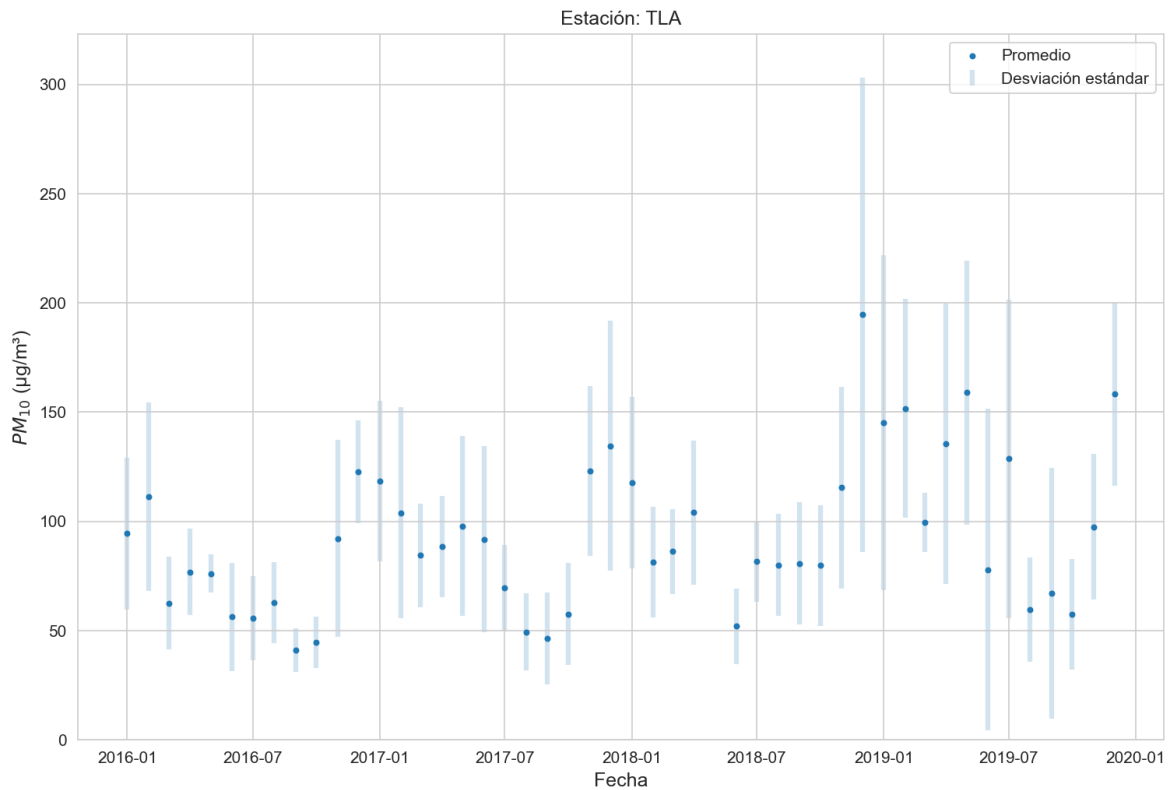
Promedio de máximos diarios por mes – Continuo - Miravalle



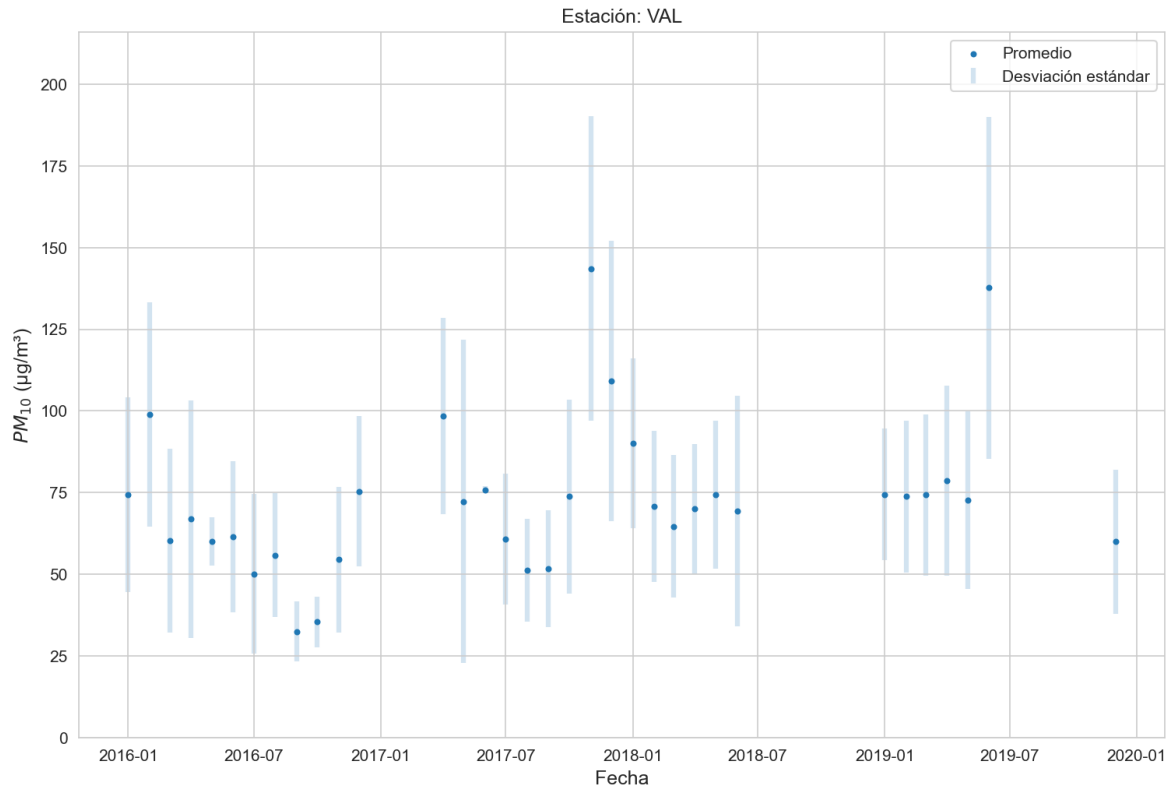
Promedio de máximos diarios por mes – Continuo - Oblatos



Promedio de máximos diarios por mes – Continuo – Santa Fe

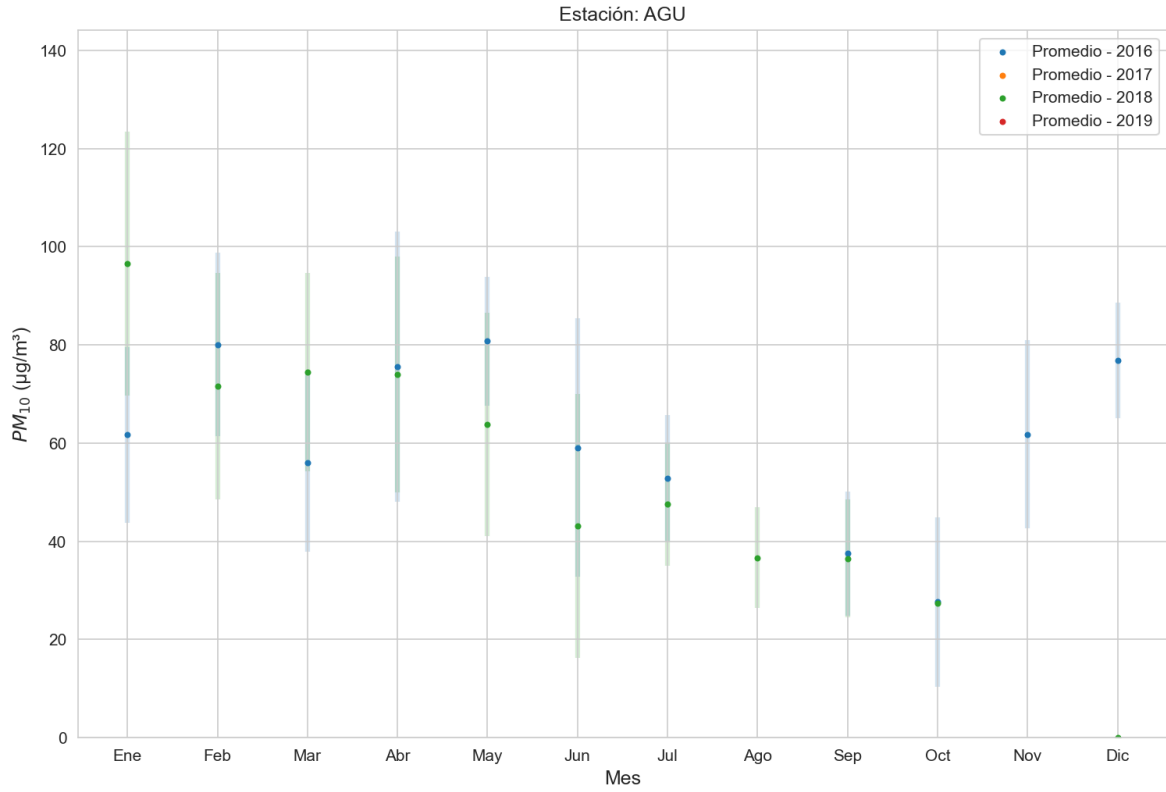


Promedio de máximos diarios por mes – Continuo - Tlaquepaque

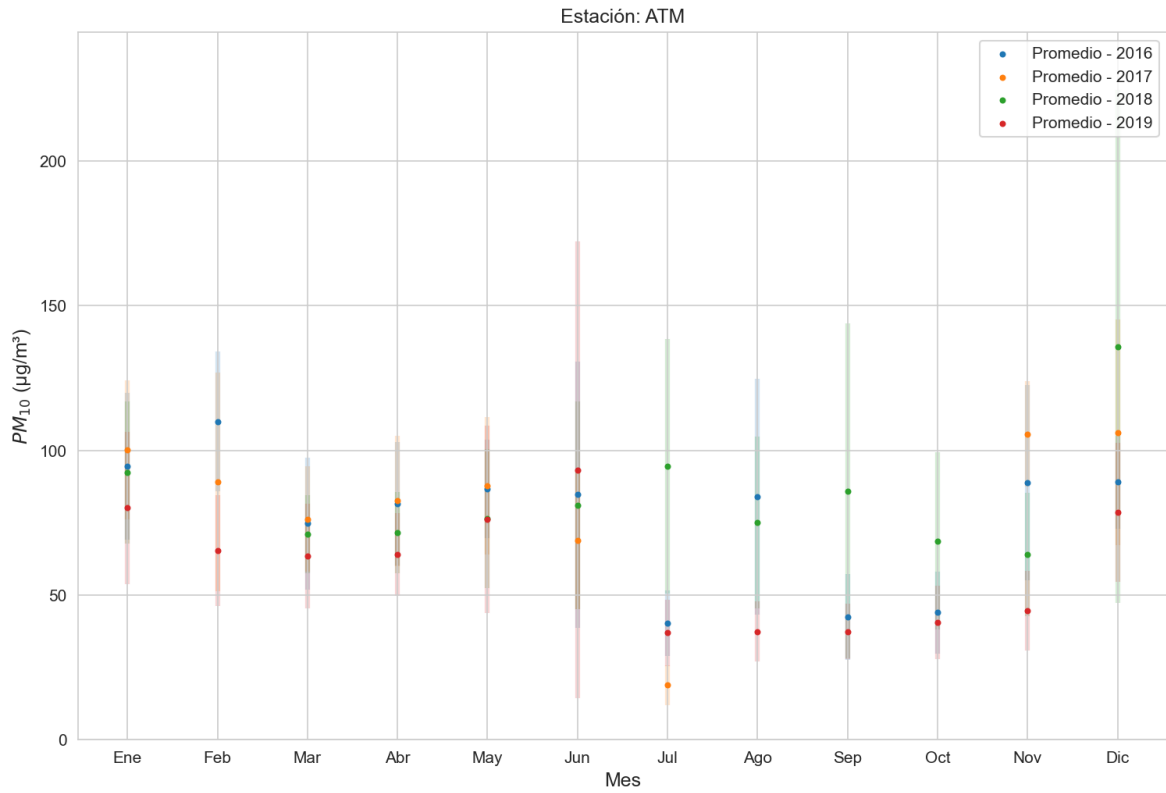


Promedio de máximos diarios por mes – Continuo - Vallarta

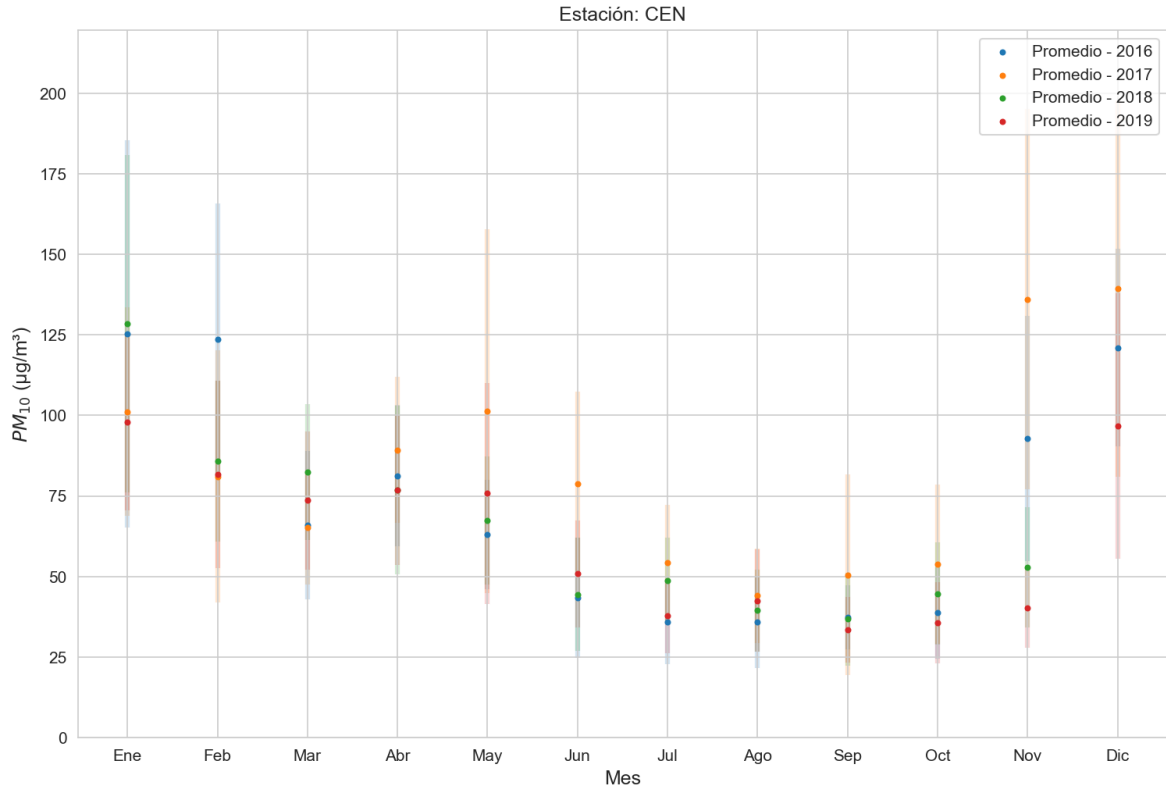
8.7.2. Máximos mensuales agrupados



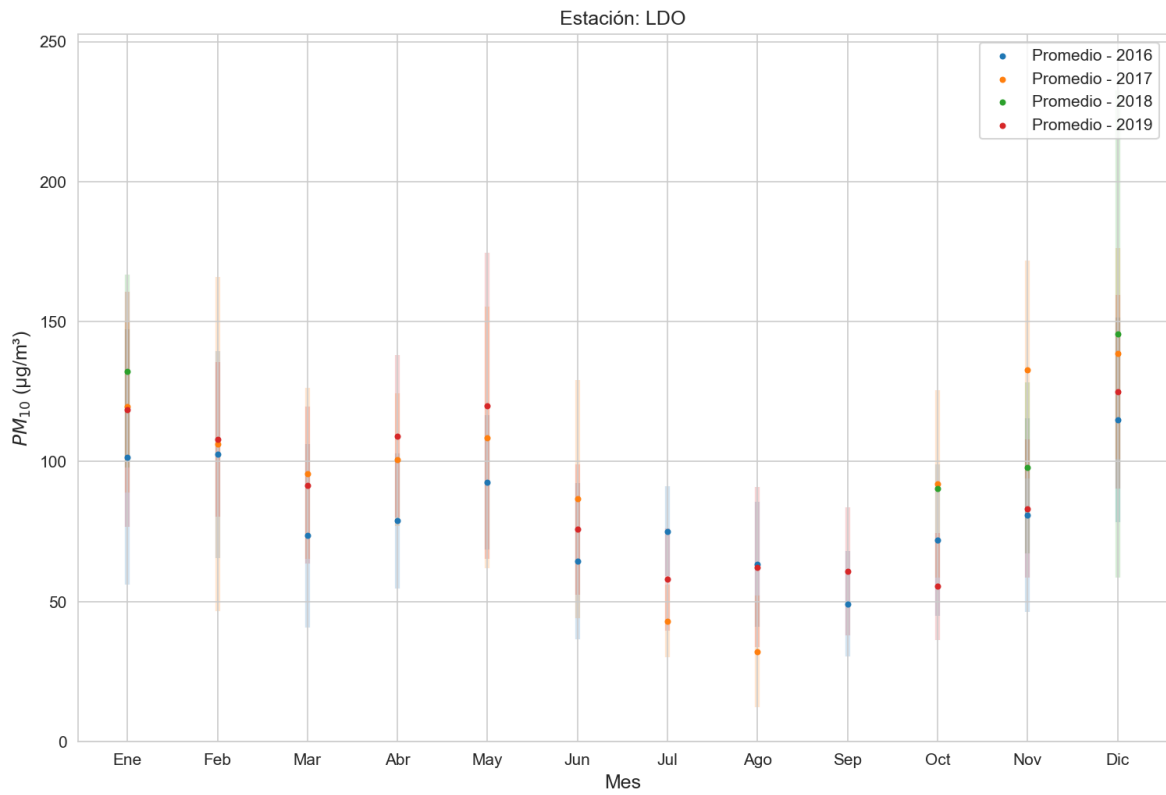
Promedio de máximos diarios por mes – Agrupado - Vallarta



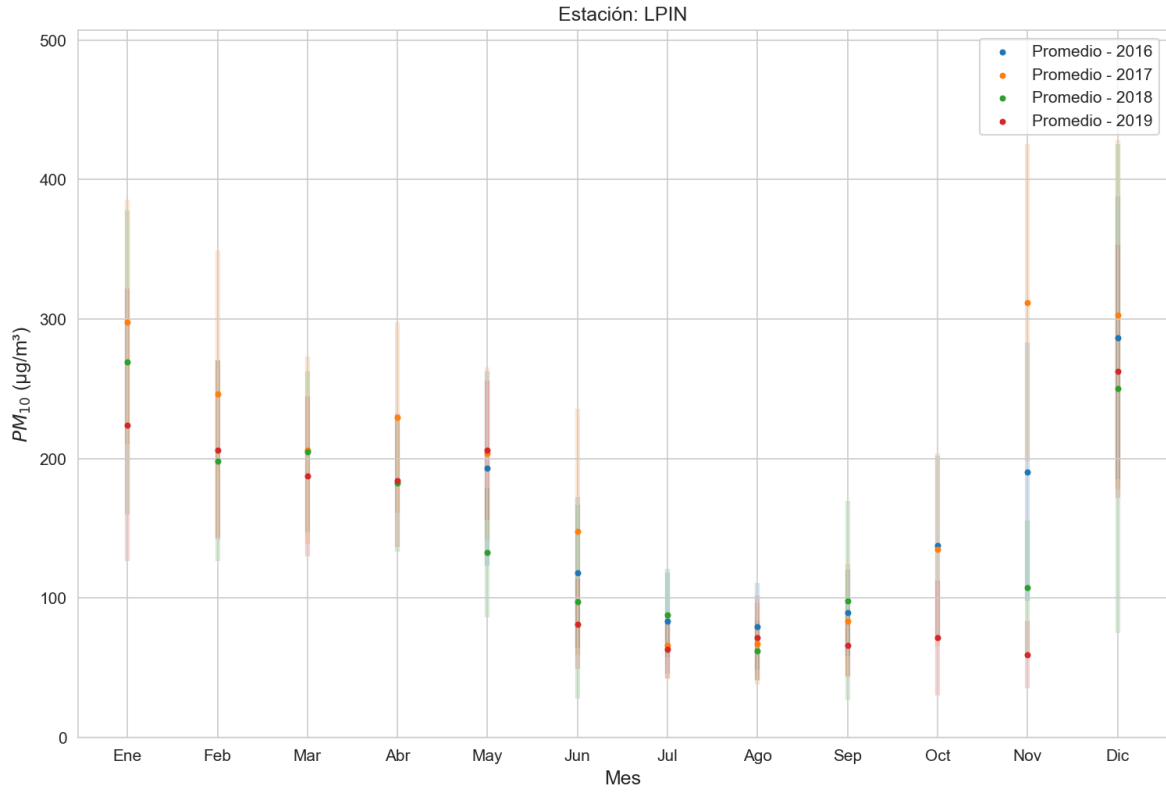
Promedio de máximos diarios por mes – Agrupado - Atemajac



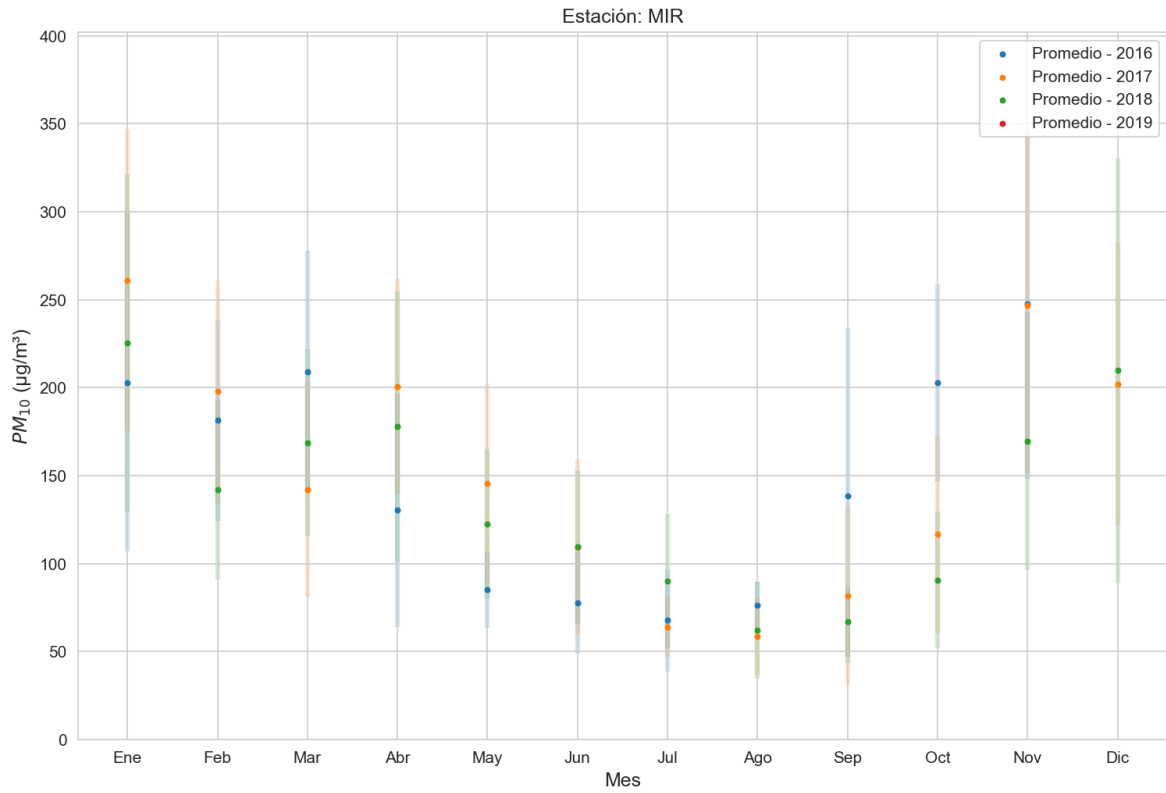
Promedio de máximos diarios por mes – Agrupado - Centro



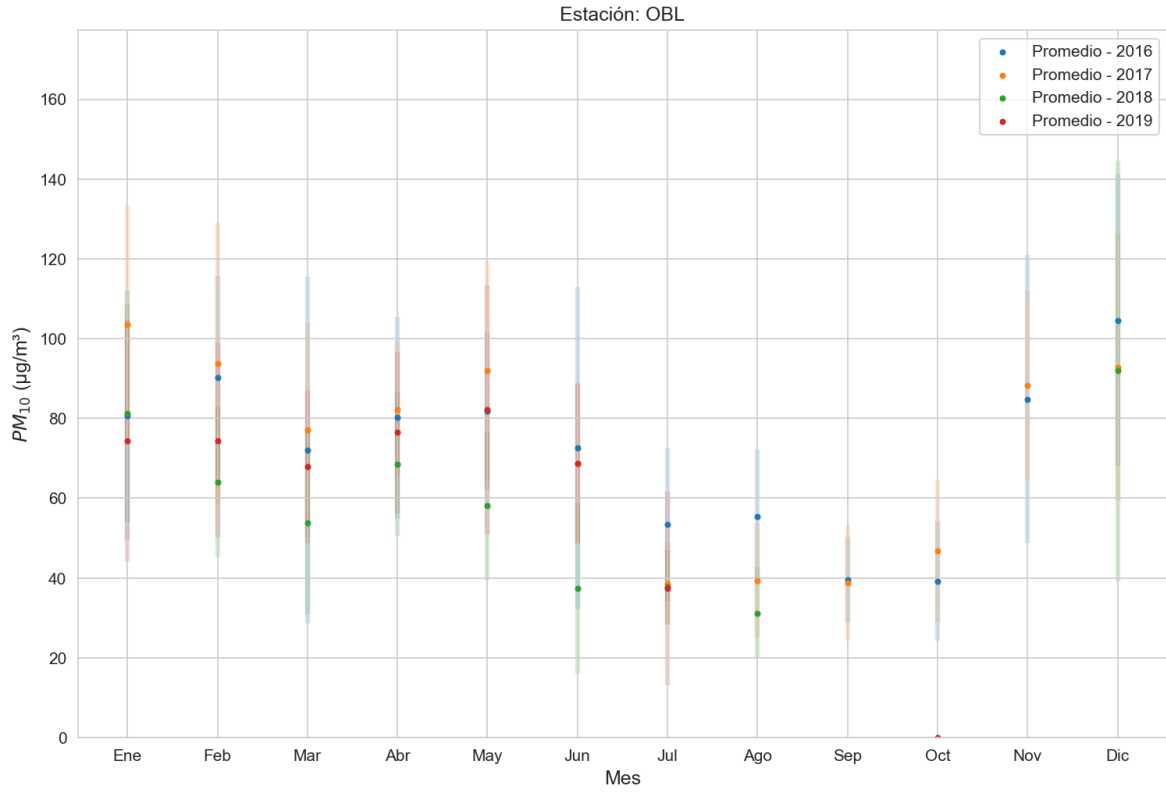
Promedio de máximos diarios por mes – Agrupado – Loma Dorada



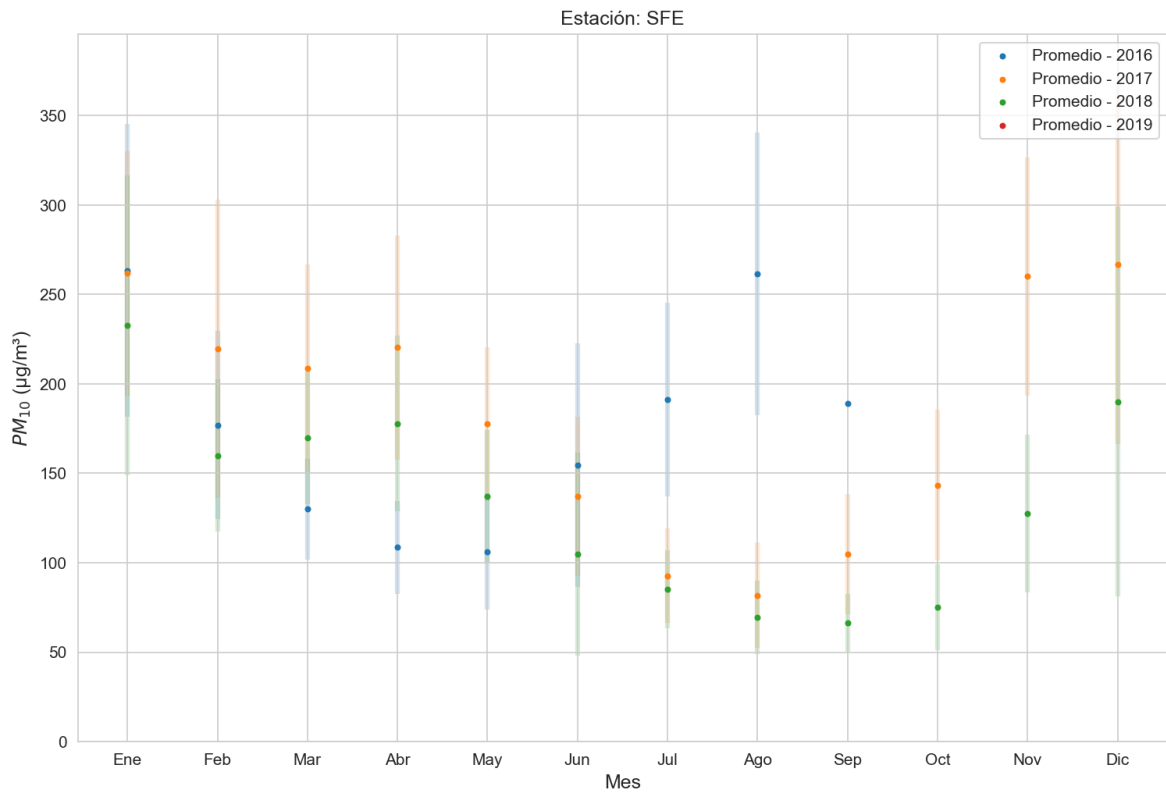
Promedio de máximos diarios por mes – Agrupado – Las Pintas



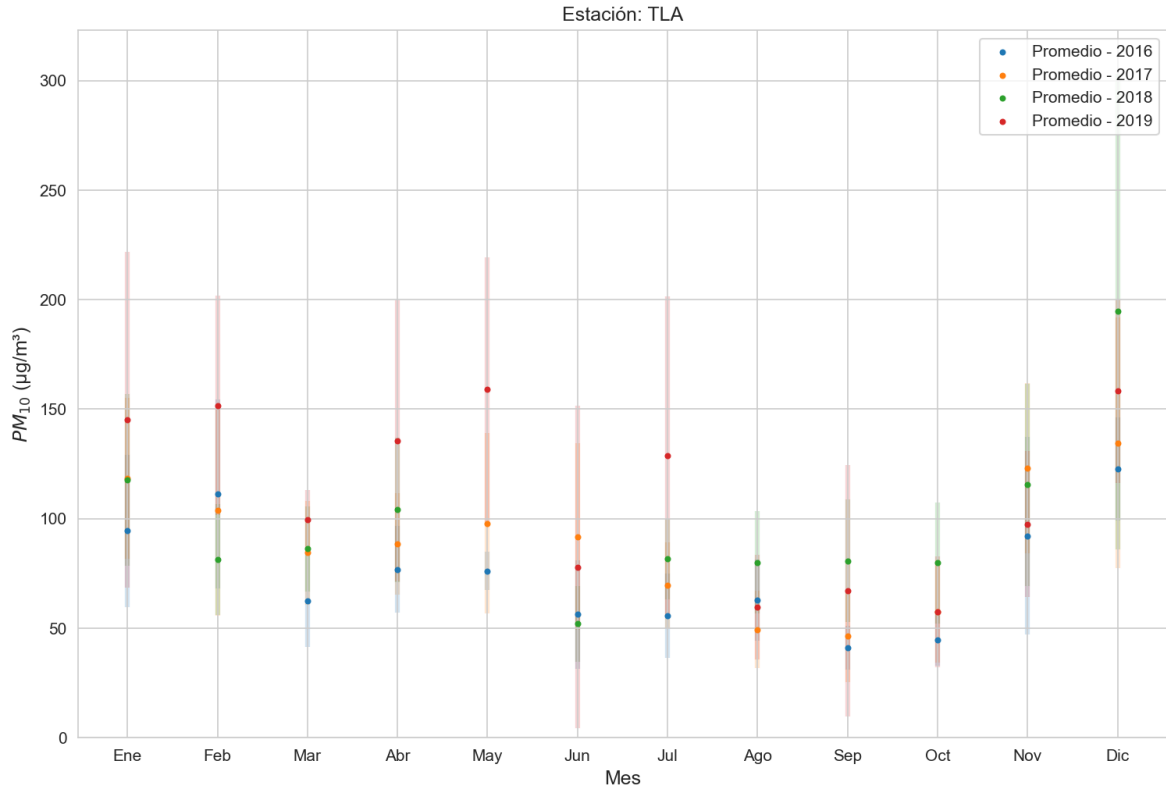
Promedio de máximos diarios por mes – Agrupado - Miravalle



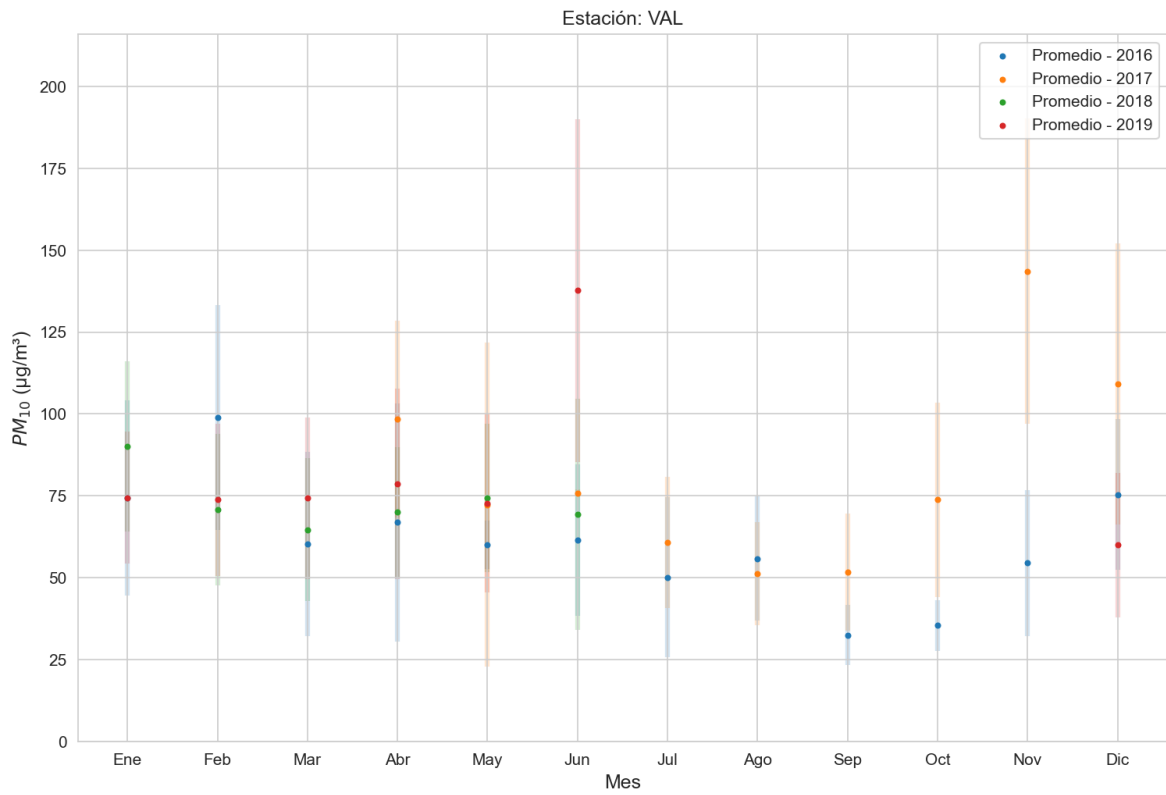
Promedio de máximos diarios por mes – Agrupado - Oblatos



Promedio de máximos diarios por mes – Agrupado – Santa Fe

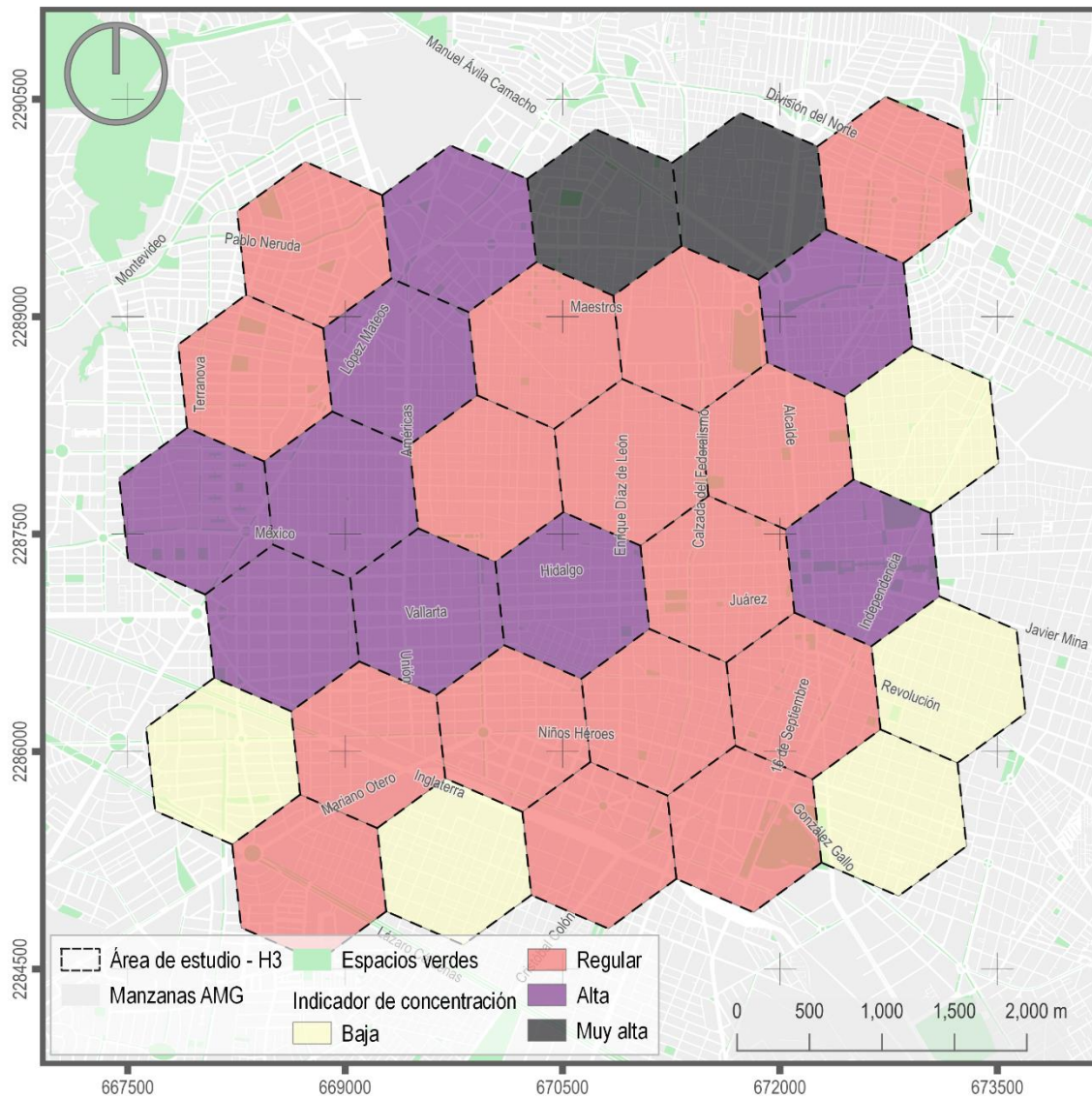


Promedio de máximos diarios por mes – Agrupado - Tlaquepaque

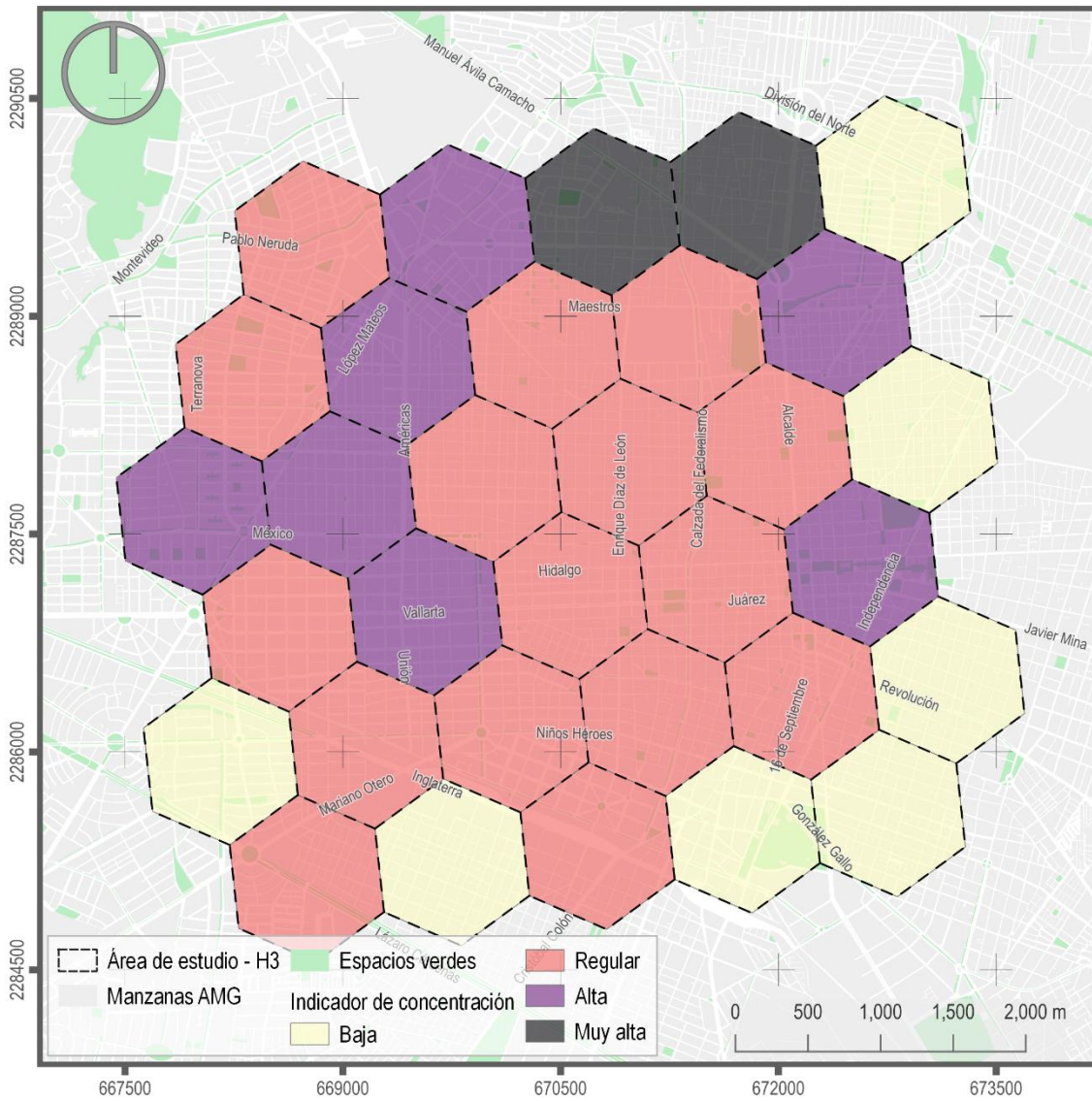


Promedio de máximos diarios por mes – Agrupado - Vallarta

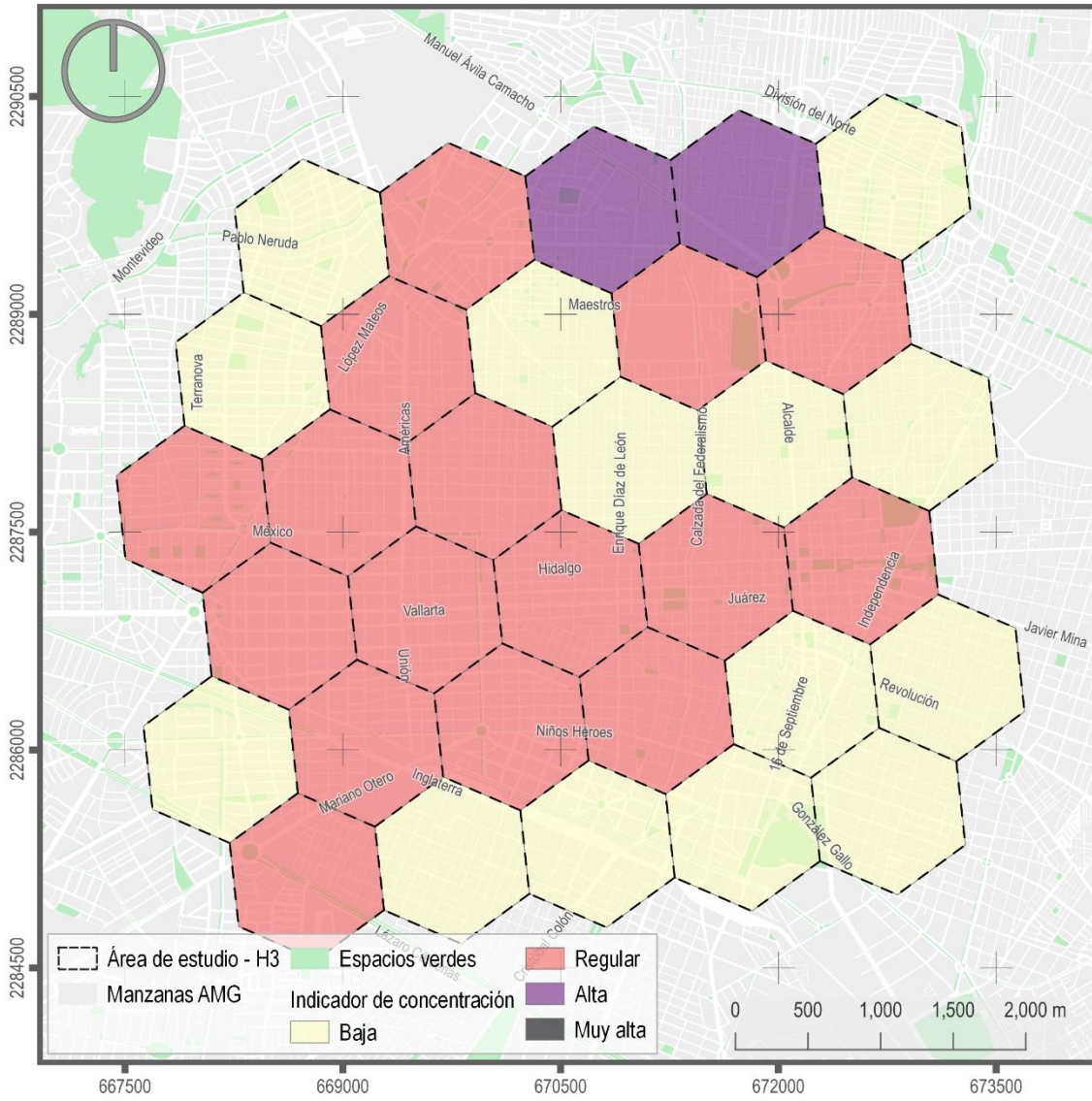
8.8. Anexo H – Resultados agrupados del indicador de concentración



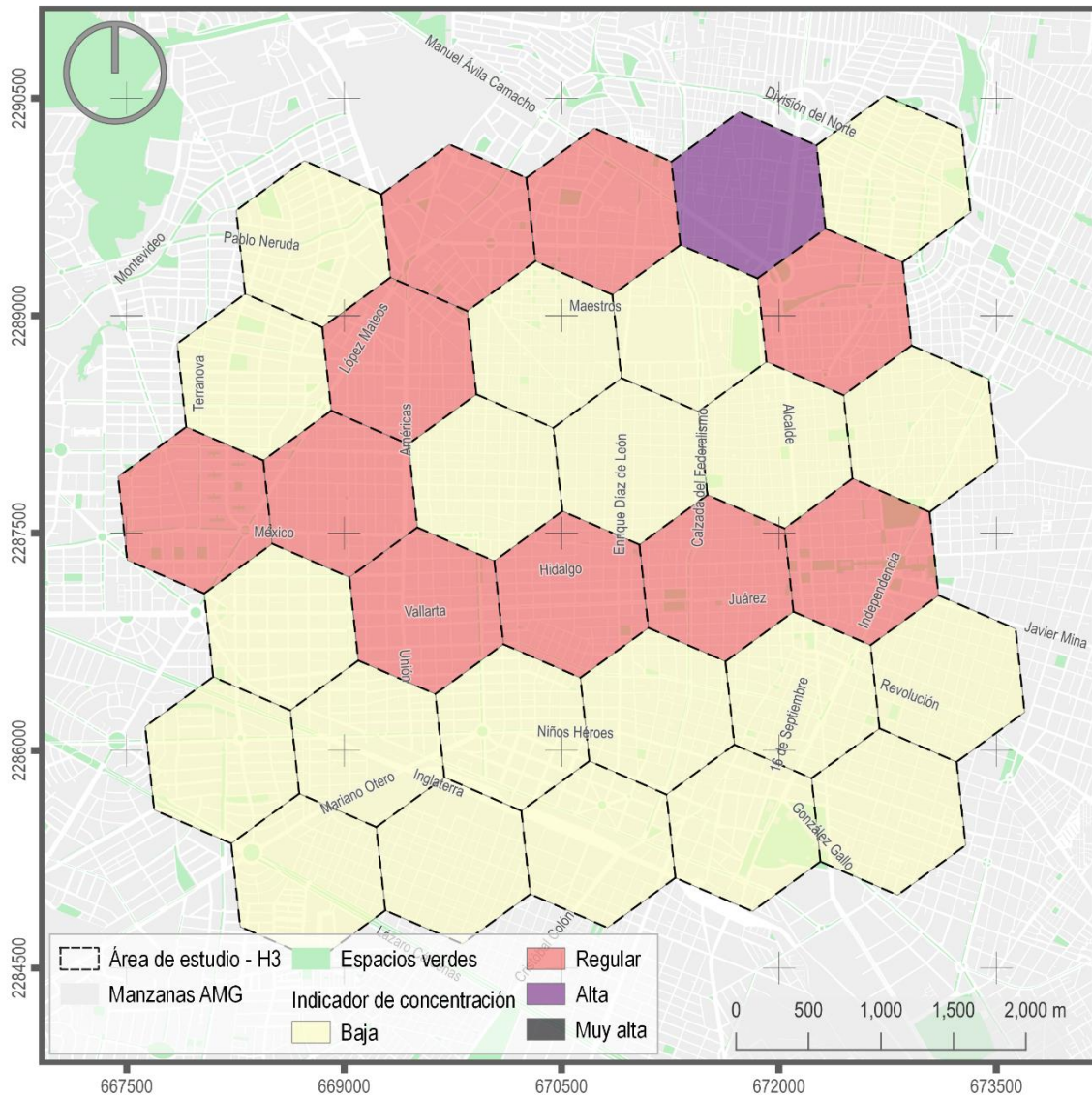
Índice de concentración agrupado – enero 2015



Índice de concentración agrupado – enero 2019



Índice de concentración agrupado – mayo 2015



Índice de concentración agrupado – mayo 2019

8.9. Anexo I

Jalisco Respira



Medio Ambiente y
Desarrollo Territorial



Por medio de la presente

hago **constar** que la **Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial** del Estado de Jalisco, a través de la Dirección de Gestión de la Calidad del Aire tiene el gusto de colaborar con el **Ing. Edgar Alán Egurrola Hernández**, estudiante de posgrado, quien trabaja en el desarrollo de una metodología para evaluar el desempeño de sensores de bajo costo y que ha sido utilizada para evaluar varias marcas de estos dispositivos en uso para diversos proyectos de evaluación de exposición a contaminantes atmosféricos en el Estado, derivado de la colaboración que se tiene desde el año 2019 a la fecha.

Es por lo anterior que esta vinculación con el investigador resulta de gran valor para la agenda de trabajo en materia de calidad del aire de esta Secretaría, y fortalece las acciones del grupo de trabajo de **sensores de calidad del aire**, que tiene como objetivo poner a disposición información de utilidad respecto a las metodologías y dispositivos que se utilicen con fines científicos y de fortalecimiento a las agendas de Gobierno en la materia.

Guadalajara, Jalisco a 17 de noviembre del 2021.


Abraham Torres Andrade
Director General
de Calidad del Aire


Estefany López Murillo
Directora de Gestión
de la Calidad del Aire

