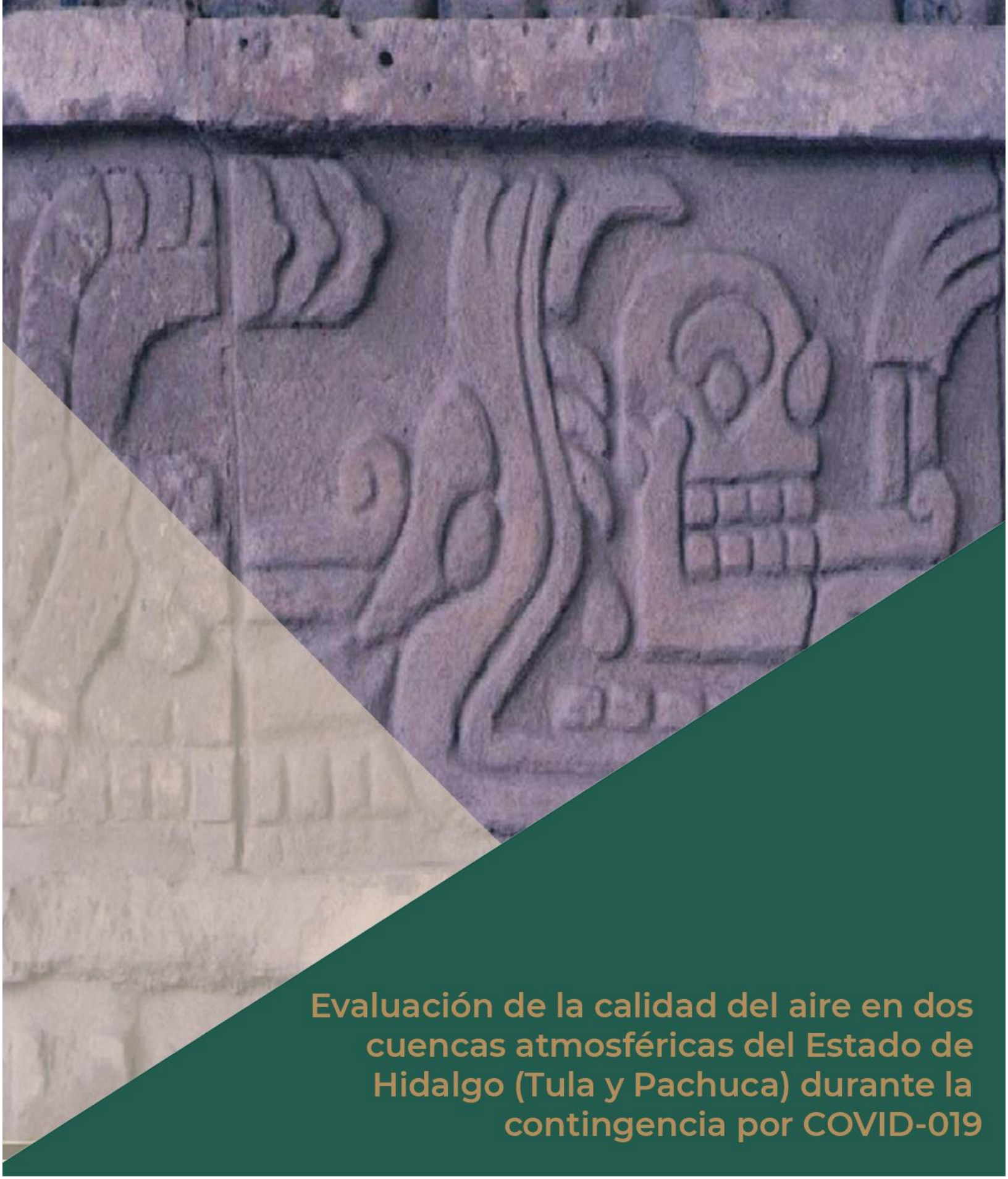


Evaluación de la calidad del aire en dos cuencas atmosféricas del Estado de Hidalgo (Tula y Pachuca) durante la contingencia por COVID-019

MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
INECC
INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO
COMISIÓN AMBIENTAL DE LA MEGALÓPOLIS
HIDALGO

DIRECTORIO

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Dra. María Amparo Martínez Arroyo
Directora General del INECC

Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez
Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental

Dr. José Abraham Ortínez Álvarez
Director de Economía Sectorial

Gobierno del Estado de Hidalgo

Mtro. Said Javier Estrella García
Secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales de Hidalgo

Ing. Ricardo Alberto Pérez Hernández
Subdirector de Mantenimiento de la Calidad del Aire de la SEMARNATH

Comisión Ambiental de la Megalópolis

Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa
Coordinador Ejecutivo

M. en C. Ramiro Barrios Castrejón
Director General Adjunto de Gestión de Calidad del Aire en Zonas Metropolitanas

M. en C. Julissa Calva Cruz
Directora de Prevención y Control de Contaminación en Zonas Metropolitanas

Elaboraron

Dra. Zuhélen Padilla Barrera
Investigadora Posdoctorante

Dr. José Abraham Ortínez Álvarez
Director de Economía Sectorial

M. en C. Roberto Basaldud Cruz
Subdirector de Investigación de Exposición a la Contaminación

M en C. Miguel Ángel Flores Román
Jefe de Departamento Estudios de Exposición Ambiental

Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez
Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental

Colaboración

Act. María Guadalupe Tzintzun Cervantes
Subdirectora de Calidad del Aire

Lic. Lili Gladys Ruiz Manzanares
Estudiante de posgrado ECATSIG
Universidad Autónoma del Estado de México

Dr. Francisco Zepeda Mondragón
Investigador Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

Estela Pérez Trejo
Estado de Hidalgo

M en I Ramón Carlos Torres Enriquez
Apoyo a la Coordinación General de Contaminación

CITAR ESTE DOCUMENTO COMO:

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2021). Evaluación de la calidad del aire en dos cuencas atmosféricas del Estado de Hidalgo (Tula y Pachuca) durante la contingencia por COVID-019., México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. 45 pp.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Blvd. Adolfo Ruiz Cortines 4209, Col. Jardines en la Montaña, Del. Tlalpan, C.P. 14210.Ciudad de México. http://www.gob.mx/inecc

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo (SEMARNATH)

Vicente Segura 100, Adolfo López Mateos, 42094 Pachuca de Soto, Hgo.
https://s-medioambiente.hidalgo.gob.mx

Comisión Nacional de la Megalópolis (CAMe)

Av. Ejército Nacional 223 Col. Anáhuac 11320 Ciudad de México
https://www.gob.mx/comisionambiental

CONTENIDO

DIRECTORIO 2

INTRODUCCIÓN 1

1. **CUENCAS ATMOSFÉRICAS DEL ESTADO DE HIDALGO** 3
2. **EVOLUCIÓN DE LA TENDENCIA DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DE MARZO A JUNIO DEL 2017, 2018, 2019 Y 2020.** 8
3. **ANÁLISIS COMPARATIVO MENSUAL POR CUENCAS ATMOSFÉRICAS** 12
4. **ANÁLISIS COMPARATIVO POR CUENCA ATMOSFÉRICA POR PROMEDIO HORARIO** 19
5. **PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO** 22
6. **ANÁLISIS DE OBSERVACIONES SATELITALES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN DOS CUENCAS ATMOSFÉRICAS DEL ESTADO DE HIDALGO (TULA Y PACHUCA)** 26
7. **ANÁLISIS DE VIENTOS Y DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LAS CUENCAS ATMOSFÉRICAS DEL ESTADO DE HIDALGO (TULA Y PACHUCA).** 30
8. **CONCLUSIONES** 40
9. **BIBLIOGRAFíA** 42

INTRODUCCIÓN

Durante la emergencia sanitaria generada por el virus SARS-CoV2 (COVID-19), con la implementación de la Jornada Nacional de Sana Distancia —que estableció la reducción de actividades no esenciales en los sectores público, privado y social—, durante el periodo del 23 de marzo al 30 de mayo del 2020, y posteriormente el plan de la "nueva normalidad" que incluye la reapertura parcial de algunas actividades, ambas medidas establecidas con base en el semáforo epidemiológico y sus cuatro colores: rojo, naranja, amarillo y verde, se observó que las principales actividades que emiten contaminantes atmosféricos en dos cuencas atmosféricas del Estado de Hidalgo (Tula y Pachuca), se redujeron sustancialmente como en muchas otras ciudades del país.

Con la finalidad de cuantificar las reducciones, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo (SEMARNATH), de manera conjunta con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y con el apoyo de la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe), realizaron una evaluación de las concentraciones de contaminantes atmosféricos registrados en las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico del Estado de Hidalgo.

Para cuantificar los cambios observados se definieron dos niveles de aproximación. En un primer análisis se evaluaron las tendencias de las concentraciones diarias de los principales contaminantes monitoreados, con la finalidad de establecer el nivel del cumplimiento de los límites de protección a la salud establecidos en la normatividad vigente en la materia (INECC, 2019) y en una segunda etapa fueron comparadas las concentraciones de los años 2017, 2018, 2019 y 2020 para el periodo de marzo a junio, considerando que en este periodo tuvo lugar la emergencia sanitaria por COVID-19 para establecer las diferencias entre los mismos periodos de los tres años previos al 2020 y realizar la comparación. Esto incluyó tanto datos obtenidos en superficie como observaciones satelitales. Los resultados obtenidos muestran una reducción importante en las concentraciones de algunos contaminantes criterio en superficie, durante el periodo de marzo a junio del año 2020, con respecto al mismo periodo de los años 2017, 2018 y 2019.

Adicionalmente y con la finalidad de profundizar el análisis de los datos generados en las estaciones de monitoreo en superficie, se realizó un diagnóstico y evaluación de las columnas de dióxido de nitrógeno (NO_2) y formaldehido (HCHO) como proxy de compuestos orgánicos volátiles (COV) en las cuencas atmosféricas de Tula y Pachuca mediante el uso de imágenes satelitales generadas con el instrumento de percepción remota TROPOMI que se encuentra a bordo de la plataforma satelital Sentinel-5P, el cual tiene una resolución espacial de 3.5 km x 5.5 km (Veefkind et al, 2012).

TROPOMI reporta la densidad de moléculas por unidad de área del gas observado en una columna de aire desde la superficie al tope de la atmósfera. Si se asume que la mayor parte de la masa de ese gas se encuentra cerca de la superficie entonces esa variable está relacionada con las concentraciones en superficie. En este caso usamos los valores reportados por TROPOMI para NO_2 y HCHO. Se compararon lo valores observados en los periodos de marzo a junio de 2019 y 2020.

Los resultados obtenidos en esta evaluación permitieron conocer cuáles son los máximos de reducción de las concentraciones que se pueden alcanzar cuando las principales fuentes de emisión reducen significativamente su actividad por la emergencia sanitaria en las cuencas atmosféricas de Tula y Pachuca en el Estado de Hidalgo.

Finalmente, será posible analizar con mayor detalle la identificación de las fuentes sectoriales que mostraron una importante reducción temporal y espacial de sus emisiones y diseñar acciones y estrategias de mitigación de emisiones de contaminantes atmosféricos en el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Hidalgo (PROAIRE 2016-2024) y eventualmente en programas de contingencias ambientales, así como, en los programas de acción climática para la reducción de gases de efecto invernadero que permitan mejorar la calidad del aire y reducir el impacto al cambio climático en el Estado de Hidalgo.

1. CUENCAS ATMOSFÉRICAS DEL ESTADO DE HIDALGO

Las cuencas atmosféricas (CA) en el Estado de Hidalgo (Tula, Pachuca y Tulancingo) definen los espacios donde deben aplicarse las acciones de gestión de la calidad del aire en el Estado

Para efectos del presente documento, se describen brevemente dos cuencas atmosféricas del Estado de Hidalgo: Tula y Pachuca, ubicadas al sur del Estado en las cuales se concentran en operación de la mayoría de los parques industriales. Dichas cuencas han sido delimitadas de acuerdo con la densidad de población, según el Consejo Nacional de Población (CONAPO), así como la actividad industrial, clima, variables meteorológicas y zonas montañosas que pudieran reduzcan la dinámica atmosférica de los vientos.

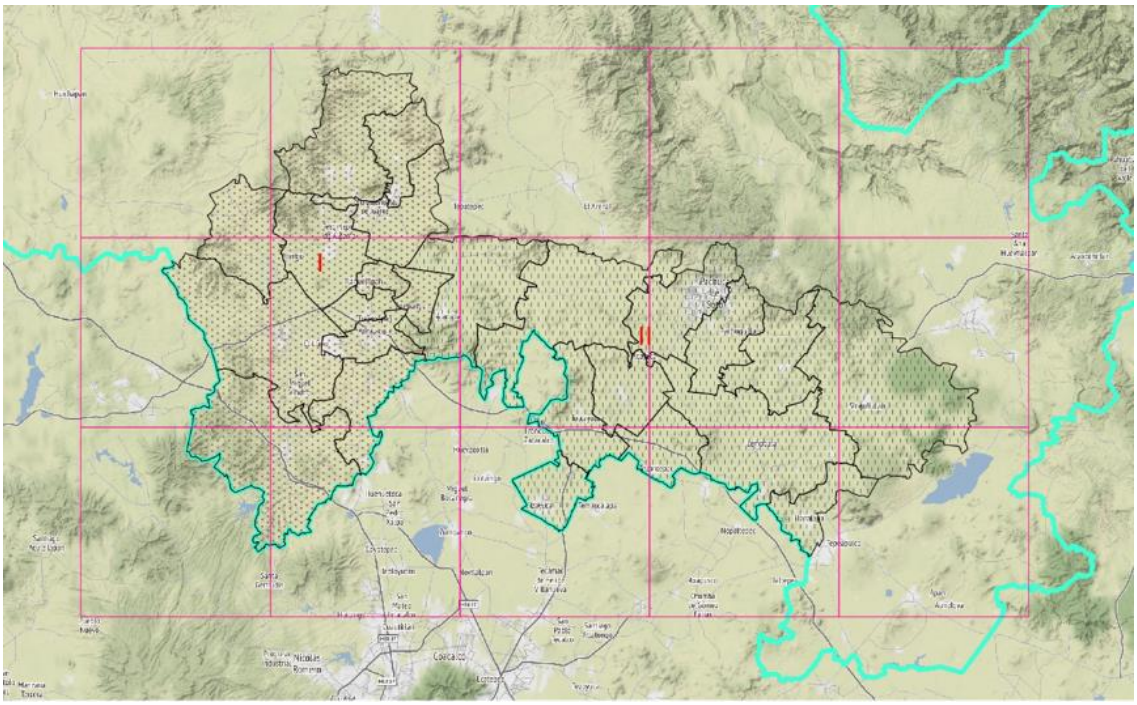


Figura 1 Cuencas Atmosféricas Tula (I) Pachuca (II).

La cuenca atmosférica de Tula (CA-T) (Fig. 1) está formada por 12 municipios; se localiza al suroeste de Hidalgo en una superficie de 1,730 km2 y alberga una población de 470,985 habitantes que representan el 16.36% de la población estatal (CONAPO, proyección 2015) (tabla 1). En esta cuenca se encuentra uno de los corredores industriales más importantes del país. Entre las industrias más significativas localizadas en esta cuenca, se puede mencionar: la Refinería Miguel Hidalgo de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), además de la industria química, cementera, calera, metalúrgica, metalmecánica, entre otras.

Tabla 1 Municipios que conforman la cuenca atmosférica de Tula. Fuente. CONAPO, 2016.

MUNICIPIOS	POBLACIÓN	SUPERFICIE (Km^2)
Atitalaquia	28,482	64
Atotonilco de Tula	33,905	121
Chilcuautla	18,806	223
Mixquiahuala de Juárez	46,106	115
Progreso de Obregón	23,992	91
Tepeji del Río de Ocampo	87,586	353
Tepatitlán	10,592	148
Tetepango	11,988	45
Tezontepec de Aldama	51,829	163
Tlahuelilpan	18,272	29
Tlaxcoapan	28,235	42
Tula de Allende	111,193	336
TOTAL	**470,985**	**1,730**

La cuenca atmosférica de Pachuca (CA-P) (Fig. 1), se ubica entre la CA-T y Tulancingo, está formada por 12 municipios, con una extensión territorial de 2,191 km^2 y concentra al 26.17% de la población hidalguense con 753,332 habitantes, por lo que es la cuenca atmosférica más poblada del Estado de Hidalgo (tabla 2). Al considerar las cuencas atmosféricas, el 35.9% de la población de la CA-P se concentra en el municipio de Pachuca de Soto mientras que el 16.8% se ubica en el municipio de Tizayuca.

Tabla 2 Municipios que conforman la cuenca atmosférica de Pachuca Fuente. CONAPO, 2016.

MUNICIPIOS	POBLACIÓN	SUPERFICIE (Km^2)
Ajacuba	17,743	253
Epazoyucan	15,183	139
Mineral de la Reforma	168,218	106
Pachuca de Soto	271,099	164
San Agustín Tlaxiaca	34,977	302
Singuilucan	15,829	420
Tizayuca	126,766	77
Tlanalapa	11,235	83
Tolcayuca	14,186	118
Villa de Tezontepec	12,268	92
Zapotlán de Juárez	19,006	117
Zempoala	46,821	320
TOTAL	**753,332**	**2,191**

1.1 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LAS CUENCAS ATMOSFÉRICAS TULA Y PACHUCA.

La evaluación de la calidad del aire en las cuencas de Tula, Pachuca y Tulancingo se realiza mediante el monitoreo atmosférico continuo el cual es llevado a cabo por el gobierno del Estado de Hidalgo a través de la SEMARNAT. La Red de Monitoreo Atmosférico proporcionó los datos de los principales contaminantes atmosféricos para elaborar un análisis de tendencia, distribución de contaminantes y variaciones en tiempo.

Estos análisis se realizan considerando todos los datos de contaminantes atmosféricos para todo el Estado de Hidalgo, así como también un análisis por cuenca atmosférica (Tula y Pachuca).

La Figura 2 muestra la ubicación geográfica de cada una de estas estaciones, para este estudio 10 estaciones tienen datos validados a partir del 2017 al 2020.

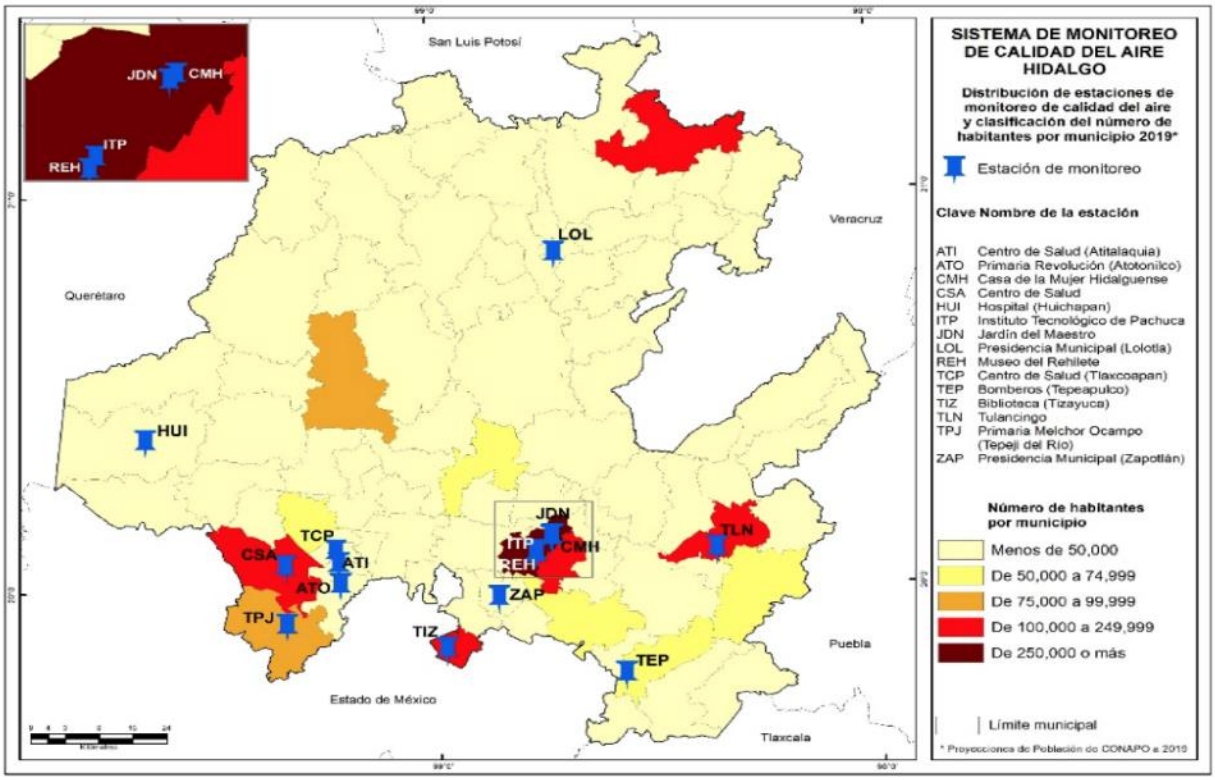


Figura 2 Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire de Hidalgo, 2018.
Fuente: Informe Nacional de la Calidad de Aire 2019.

El Sistema de Monitoreo Atmosférico del Estado de Hidalgo "SIMAEH" (Fig. 2) actualmente se encuentra integrado por:

- 10 estaciones automáticas (tabla 3)
- 10 estaciones manuales (tabla4)

Tabla 3 Estaciones automáticas del SIMAEH

	MUNICIPIO	ESTACIÓN UBICADA EN:	CLAVE	TIPO DE ATENCIÓN
1	Pachuca	Jardín del Maestro	JDN	Automático
2		Museo del Rehilete	REH	Automático
3	Tula de Allende	Centro de Salud	CSA	Automático
4	Atitalaquia	Centro de Salud	ATI	Automático
5	Atotonilco	Primaria Revolución	ATO	Automático
6	Tepeji del Río	Primaria Melchor Ocampo	TPJ	Automático
7	Tizayuca	Biblioteca	TIZ	Automático
8	Tepeapulco	Bomberos	TEP	Automático
9	Huichapan	Hospital	HUI	Automático
10	Tulancingo	DIF municipal	TUL	Automático

Tabla 4 Estaciones manuales del SIMAEH

	MUNICIPIO	ESTACIÓN UBICADA EN:	CLAVE	TIPO DE ESTACIÓN
1	Pachuca	Casa de la Mujer Hidalguense	CMH	Manual
2		Instituto Tecnológico de Pachuca	ITP	Manual
3	Tula de Allende	Centro de Salud	CSA	Manual
4	Atitalaquia	Centro de Salud	ATI	Manual
5	Atotonilco	Primaria Revolución	ATO	Manual
6	Tepeji del Río	Primaria Melchor Ocampo	TPJ	Manual
7	Tlaxcoapan	Centro de Salud	TCP	Manual
8	Tizayuca	Biblioteca	TIZ	Manual
9	Lolotla	Presidencia Municipal	LOL	Manual
10	Zapotlán de Juárez	Palacio Municipal	ZAP	Manual

De las 20 estaciones que integran el SIMAEH, en cinco puntos coinciden estaciones manuales con automáticas y se les conoce como estaciones mixtas (tabla 5 y 6).

Tabla 5 Estaciones mixtas del SIMAEH

	MUNICIPIO	ESTACIÓN UBICADA EN:	CLAVE	TIPO DE ESTACIÓN
1	Tula de Allende	Centro de Salud	CSA	Mixta
2	Atitalaquia	Centro de Salud	ATI	Mixta
3	Atotonilco	Primaria Revolución	ATO	Mixta
4	Tepeji del Río	Primaria Melchor Ocampo	TPJ	Mixta
5	Tizayuca	Biblioteca	TIZ	Mixta

Si se considerara el total de estaciones que integran el SIMAEH con la clasificación de mixtas, manuales y automáticas se obtendría un total de 15 estaciones.

Tabla 6 Estaciones mixtas del SIMAEH

	MUNICIPIO	ESTACIÓN UBICADA EN:	CLAVE	TIPO DE ESTACIÓN
1	Pachuca	Jardín del Maestro	JDN	Automático
2		Museo del Rehilete	REH	Automático
3		Casa de la Mujer Hidalguense	CMH	Manual
4		Instituto Tecnológico de Pachuca	ITP	Manual
5	Tula de Allende	Centro de Salud	CSA	Mixta
6	Atitalaquia	Centro de Salud	ATI	Mixta
7	Atotonilco	Primaria Revolución	ATO	Mixta
8	Tepeji del Río	Primaria Melchor Ocampo	TPJ	Mixta
9	Tlaxcoapan	Centro de Salud	TCP	Manual
10	Tizayuca	Biblioteca	TIZ	Mixta
11	Lolotla	Presidencia Municipal	LOL	Manual
12	Tepeapulco	Bomberos	TEP	Automático
13	Huichapan	Hospital	HUI	Automático
14	Zapotlán de Juárez	Palacio Municipal	ZAP	Manual
15	Tulancingo	DIF municipal	TUL	Automático

Para esta evaluación se analizaron los datos de las estaciones de monitoreo atmosférico de las cuencas atmosféricas de Tula y Pachuca (tabla 7), en el caso de Tulancingo no se realizó el análisis debido a que no se considera una zona industrial.

Tabla 7 Estaciones de monitoreo del SIMAEH consideradas para este estudio

	MUNICIPIO	ESTACIÓN UBICADA EN:	CLAVE	TIPO DE ESTACIÓN
1	Pachuca	Jardín del Maestro	JDN	Automático
2		Museo del Rehilete	REH	Automático
3	Tula de Allende	Centro de Salud	CSA	Mixta
4	Atitalaquia	Centro de Salud	ATI	Mixta
5	Atotonilco	Primaria Revolución	ATO	Mixta
6	Tepeji del Río	Primaria Melchor Ocampo	TPJ	Mixta
7	Tizayuca	Biblioteca	TIZ	Mixta
8	Tepeapulco	Bomberos	TEP	Automático
9	Huichapan	Hospital	HUI	Automático
10	Tulancingo	DIF municipal	TUL	Automático

En este estudio se observa la evolución de las concentraciones en todas las estaciones que cumplen con los criterios de suficiencia de al menos el 75% de datos de los años 2017, 2018, 2019 y 2020 en el periodo de marzo a junio, esto permite observar de manera específica las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en condiciones normales o habituales de la actividad por cada una de las cuencas atmosféricas.

2. EVOLUCIÓN DE LA TENDENCIA DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DE MARZO A JUNIO DEL 2017, 2018, 2019 Y 2020.

2.1 TENDENCIAS DE OZONO.

El análisis de las tendencias de marzo a junio del 2017 al 2020 para el Estado de Hidalgo se realizó con los datos de 10 estaciones de monitoreo que midieron la concentración de ozono y se calcularon los valores máximos del promedio móvil de 8 horas. Se observa que para todo el Estado de Hidalgo el año 2017 se rebasó el valor límite para la concentración de ozono en el aire ambiente en cuando menos cinco estaciones en la NOM-020-SSA1-2014 (**línea azul**) —0.070 ppm como promedio móvil de 8 horas de O_3— existiendo una reducción considerable para el año 2018, incrementándose nuevamente en el año 2019 y durante el año 2020 se mantuvo en la mayoría de los días por debajo de la norma con excepción de 3 estaciones. Considerando el límite establecido para ozono (50 ppb) por la Organización Mundial de Salud (OMS) (**línea roja**), se observa que en todos los años analizados la concentración de ozono sobrepasó este límite, siendo el año 2020 en el que menos se

sobrepasó este límite. En el anexo 1, se presenta el análisis de ozono por estación de monitoreo para todo el Estado de Hidalgo, así como también para las cuencas de Tula y Pachuca.

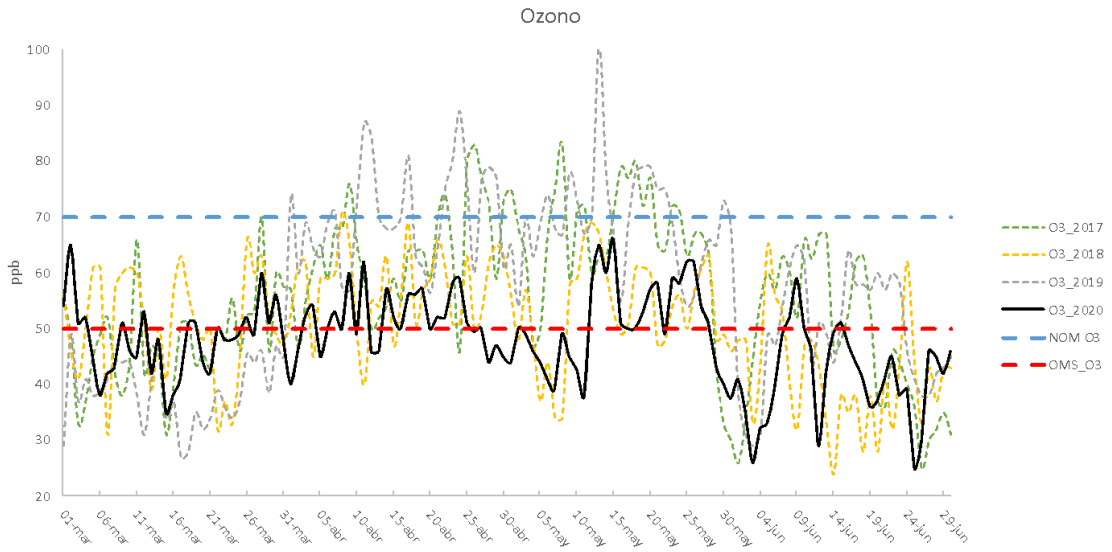


Figura 3 Tendencia anual de la concentración máxima del promedio móvil de 8 horas de la cuenca atmosférica de Pachuca.

La figura 3 muestra el comportamiento de la tendencia de las concentraciones del promedio móvil de 8 horas de ozono para la CA-P en el periodo marzo a junio de 2017 al 2020. De los valores máximos del promedio móvil de 8 horas se observa que durante el año 2017 y 2019 se rebasó el valor límite de la norma mexicana, existiendo una reducción considerable para el año 2018 y durante el año 2020, se mantuvo en la mayoría de los días por debajo de la norma mexicana, la tendencia muestra una reducción de ozono para el año 2020, aunque todos los años las concentraciones máximas de ozono sobrepasaron el límite de la OMS.

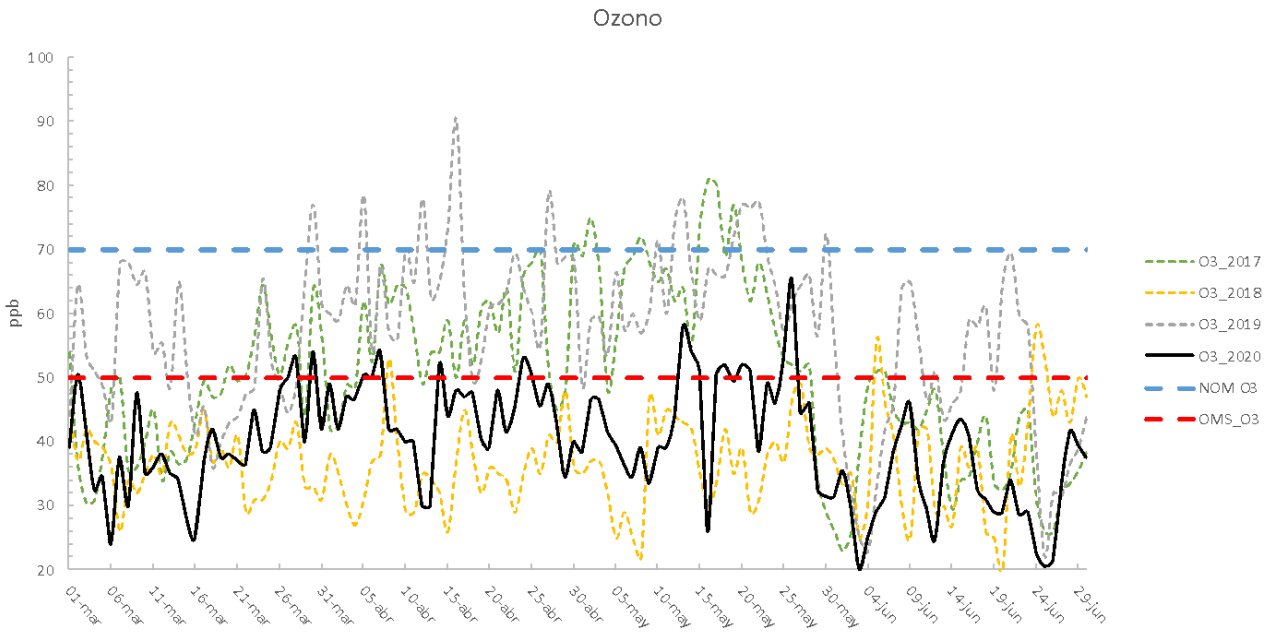


Figura 4 Tendencia anual de la concentración máxima del promedio móvil de 8 horas de la cuenca atmosférica de Tula.

Así mismo, se analizó el comportamiento de la tendencia de las concentraciones del promedio móvil de 8 horas de ozono para la CA-T en el periodo marzo a junio de 2017 al 2020 de 4 estaciones de monitoreo que midieron la concentración de este contaminante. La figura 4 presenta los valores máximos del promedio móvil de 8 horas y se observa que durante el año 2017 se rebasó el valor límite de la norma mexicana para la concentración de ozono en el aire ambiente en cuando menos 2 estaciones, existiendo una reducción considerable para el año 2018, incrementándose nuevamente en el año 2019 y durante el año 2020 se mantuvo en la mayoría de los días por debajo de la norma. De igual manera todos los años se rebasó la concentración límite de la OMS.

2.2 TENDENCIAS DE PM10 y PM2.5.

Para las concentraciones de PM10, se consideraron datos de 10 estaciones, y al menos en el año 2017 en más de dos estaciones se incumplió con el valor límite promedio de 24 horas de 75 µg/m^3, establecido en la NOM-025-SSA1-2014. Durante el año 2018 existió un aumento considerable en el número de días y número de estaciones que incumplieron el valor límite disminuyendo levemente en el año 2019, mejorando en el número de días y número de estaciones que no rebasaron el límite durante el año 2020. En las figuras 5 y 6, se presenta la tendencia de los valores máximos de las concentraciones promedio de 24 horas para el periodo de marzo a junio del periodo 2017 al 2020 para la CA-T y Pachuca respectivamente.

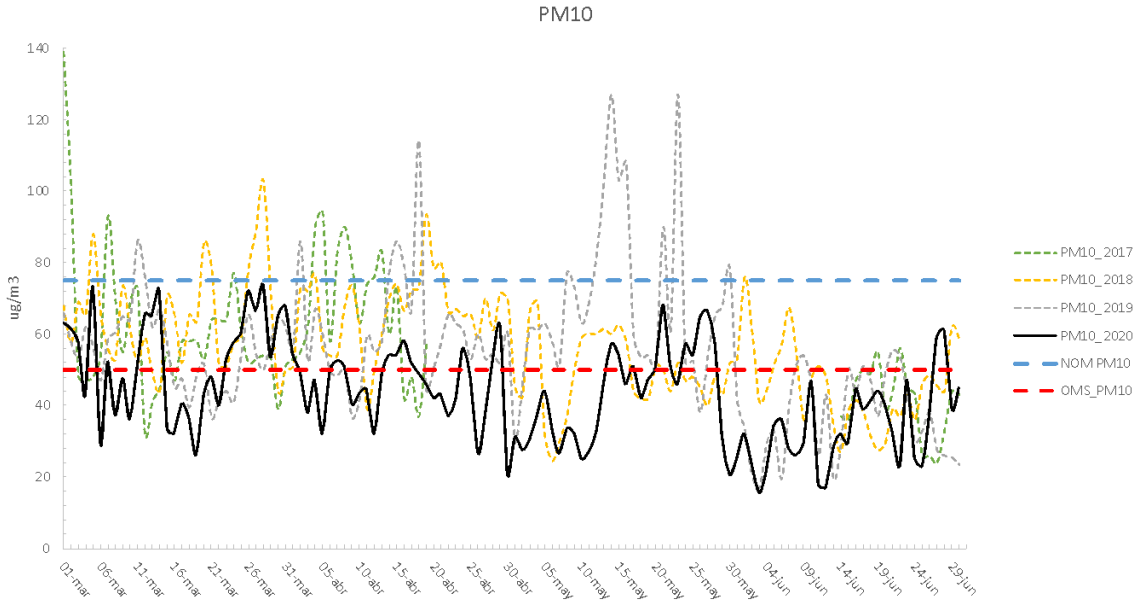


Figura 5 Tendencia de los valores máximos de las concentraciones promedio de 24 horas de PM10 en la cuenca atmosférica de Tula.

Las tendencias de PM10 en ambas cuencas rebasan el límite de la OMS (50 ug/m^3) de todos los años en el periodo analizado, así también se rebasa el límite de la norma mexicana (75ug/m^3) en los años 2017, 2018 y 2019, en el año 2020 existe una reducción de la concentración de PM10 que sí se encuentra bajo el límite de la norma mexicana, lo que indica que las restricciones por la emergencia sanitaria en el 2020 ayudaron a reducción de la concentración de PM10 en el aire ambiente.

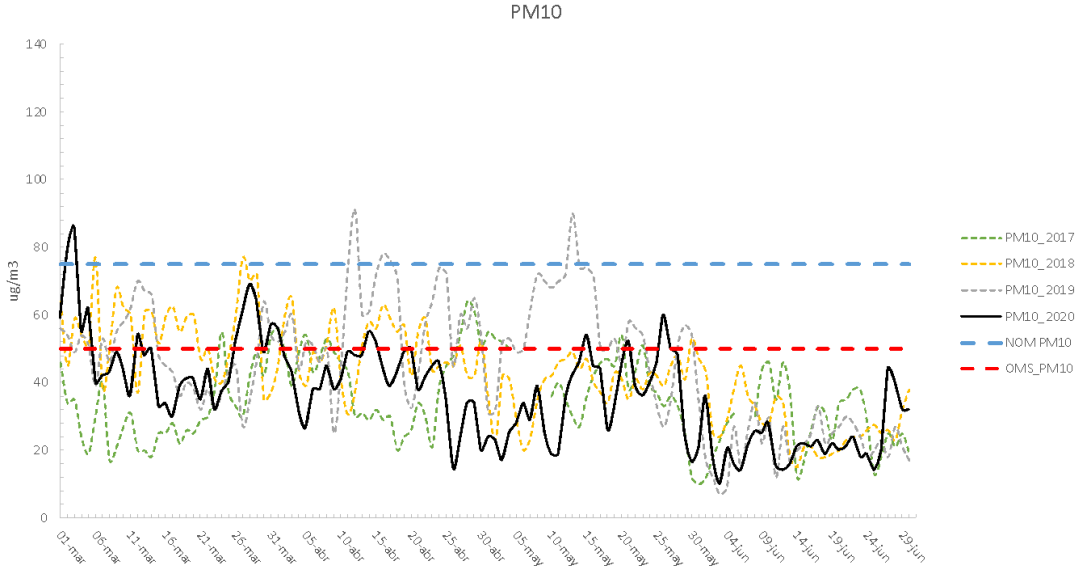


Figura 6 Tendencia de los valores máximos de las concentraciones promedio de 24 horas de PM10 en la cuenca atmosférica de Pachuca.

En el caso de las concentraciones de PM2.5, durante el periodo de marzo a junio del periodo 2017 al 2020, se consideró información de ocho estaciones, a partir de la cual se calcularon los promedios de 24 horas y al comparar con el límite normado de 45 µg/m³ (NOM-025-SSA1-2014), se observó que la mayoría de los datos no se rebasó los límites establecidos, las estaciones donde se registraron las mayores concentraciones fueron Atitalaquia para el año 2017, mientras que en el años 2020 no se rebasó la norma mexicana en ninguna estación de monitoreo. En la figura 7, se presenta el periodo sobre la tendencia de los máximos de los promedios de 24 horas por estación del 2017 al 2020. ***"La cuenca atmosférica de Tula no tiene datos disponibles de los años 2019 y 2020 para realizar la comparación de las tendencias de PM2.5."***

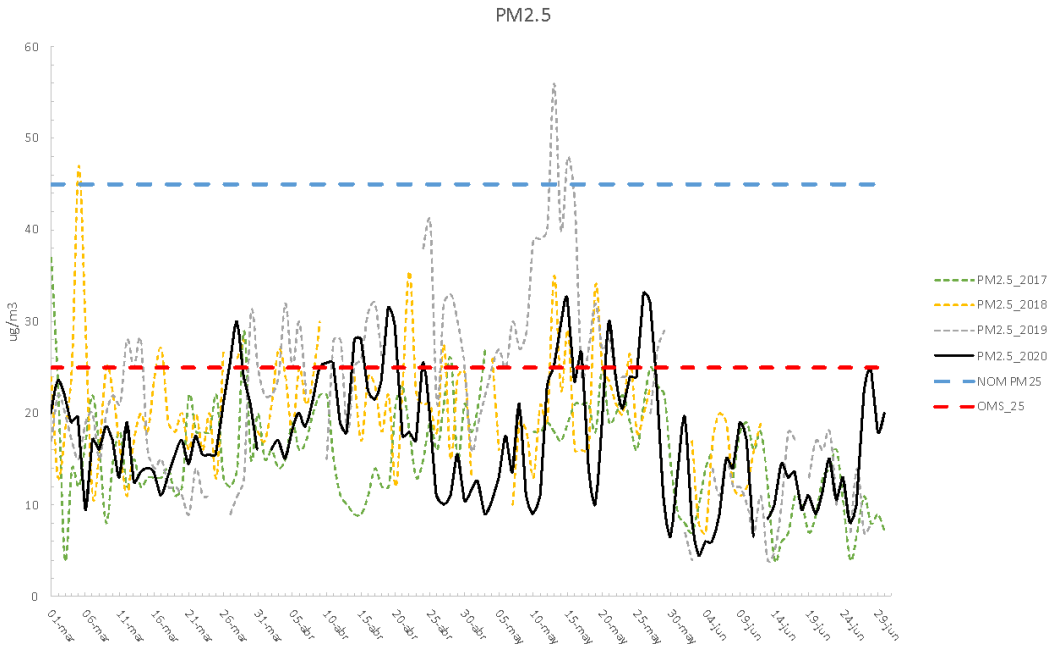


Figura 7 Tendencia de los valores máximos de las concentraciones promedio de 24 horas de PM2.5 en la cuenca atmosférica de Pachuca.

3. ANÁLISIS COMPARATIVO MENSUAL POR CUENCAS ATMOSFÉRICAS

3.1 DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE OZONO

Con el objetivo de identificar el impacto debido a la implementación de la Jornada Nacional de Sana Distancia —que estableció la reducción de actividades no esenciales en los sectores público, privado y social—, durante el periodo del 23 de marzo al 30 de junio del 2020, y posteriormente el plan de la "nueva normalidad" que incluye la reapertura parcial de algunas actividades, a continuación, se presentan las distribuciones de las concentraciones de los contaminantes monitoreados.

Las distribuciones mensuales de las medias horarias de las concentraciones de ozono en ambas cuencas atmosféricas presentan la misma distribución con una mayor concentración de ozono en los meses de abril y mayo, y una menor concentración de ozono en el mes de junio. Esta reducción de concentración puede estar relacionada con el tiempo de vida del ozono en la atmósfera, ya que esta varia significativamente dependiendo de la altitud, latitud y estación del año. Los tiempos de vida del O_3 son más cortos en el verano que en el invierno como resultado de una mayor intensidad solar en el verano (Pandis, 2006), además de coincidir con el inicio de la temporada de lluvias en el país.

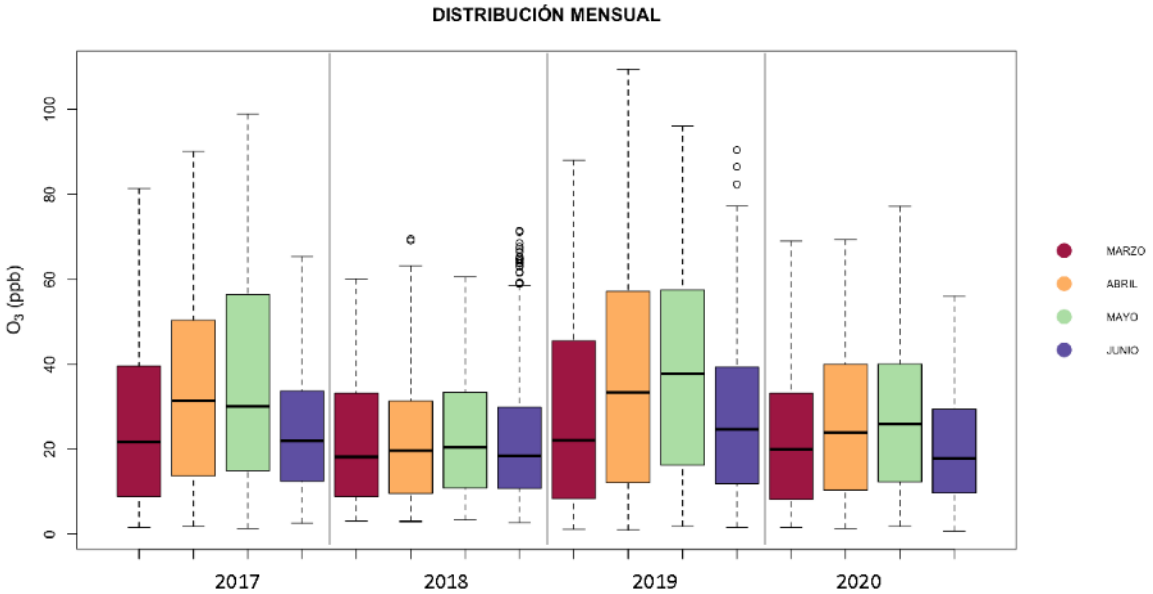


Figura 8 Comparación de la distribución mensual de O_3 en la cuenca de Tula, en los meses de marzo a junio durante 2017 al 2020

En la figura 8 se muestra la distribución mensual de las concentraciones de ozono registradas para las estaciones de la CA-T visualizándose una reducción en las concentraciones de ozono en todas las estaciones, con un porcentaje máximo de reducción del 14%. En general porcentaje de reducción del año 2019 al año 2020 fue de 19%.

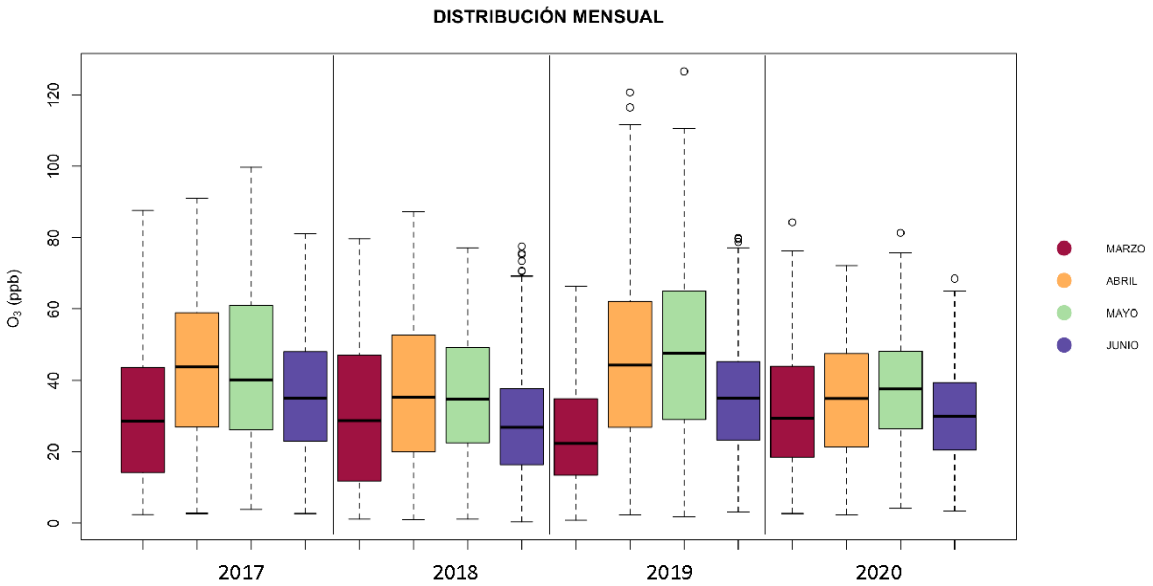


Figura 9 Comparación de la distribución mensual de O_3 en la cuenca de Pachuca, en los meses de marzo a junio durante 2017 al 2020

En la figura 9 se observa las concentraciones de ozono registradas para las estaciones de la CA-P con una reducción en las concentraciones de ozono en todas las estaciones en el año 2020, con un porcentaje máximo de reducción del 17%. En general se redujeron los días en los cuales se rebasa el límite máximo normado de 0.095 ppm, como promedio de 1 hora (NOM-020-SSA1-2014) con excepción del año 2019. El porcentaje de reducción del año 2019 al año 2020 fue de 28%.

3.2 DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE MATERIAL PARTICULADO

Respecto al PM10, durante los meses de marzo a junio del periodo 2017 al 2020, las estaciones tienen registros que rebasaron el límite máximo normado (75 µg/m^3). En comparación con el periodo 2017 al 2020 en la CA-T (Fig. 10) se observa una reducción máxima del 27%. Los meses de mayor generación de PM10 son los meses de abril para los años 2017 y 2019, mientras que para los años 2018 y 2020 el mes de mayor generación de PM10 fue marzo.

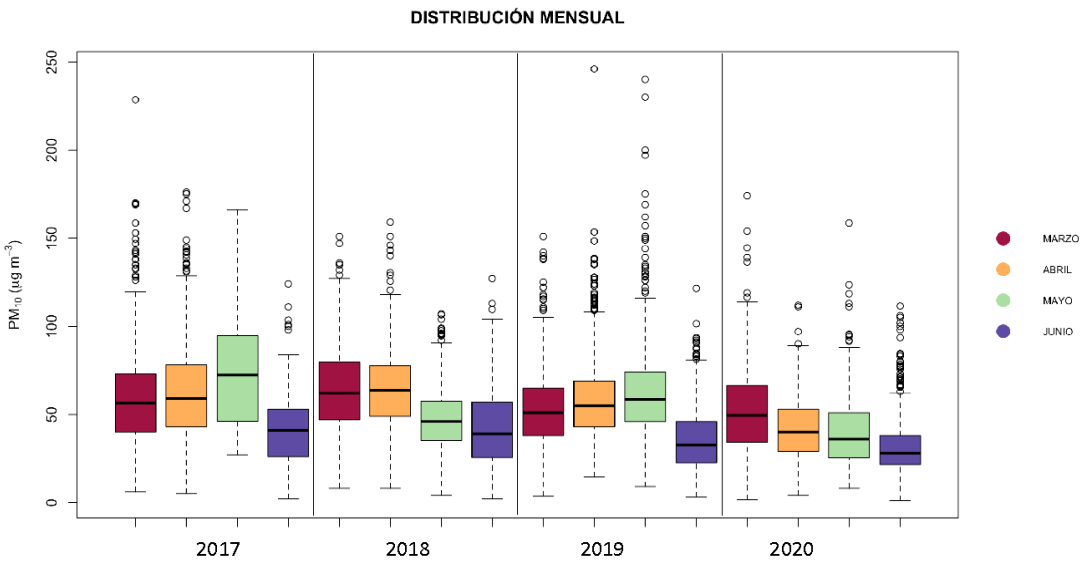


Figura 10 Distribución mensual de PM10 en la cuenca de Tula en los meses de marzo a junio del 2017 al 2020.
Fuente: INECC

Las PM10, durante los meses de marzo a junio del periodo 2017 al 2020, las estaciones tuvieron registros que rebasaron el límite máximo normado (75 µg/m^3). Durante este periodo 2017 al 2020 en la CA-P se observó una reducción máxima de 20% en las concentraciones, con excepción del año 2019 al 2020 que existió un incremento en las concentraciones del año 2019.

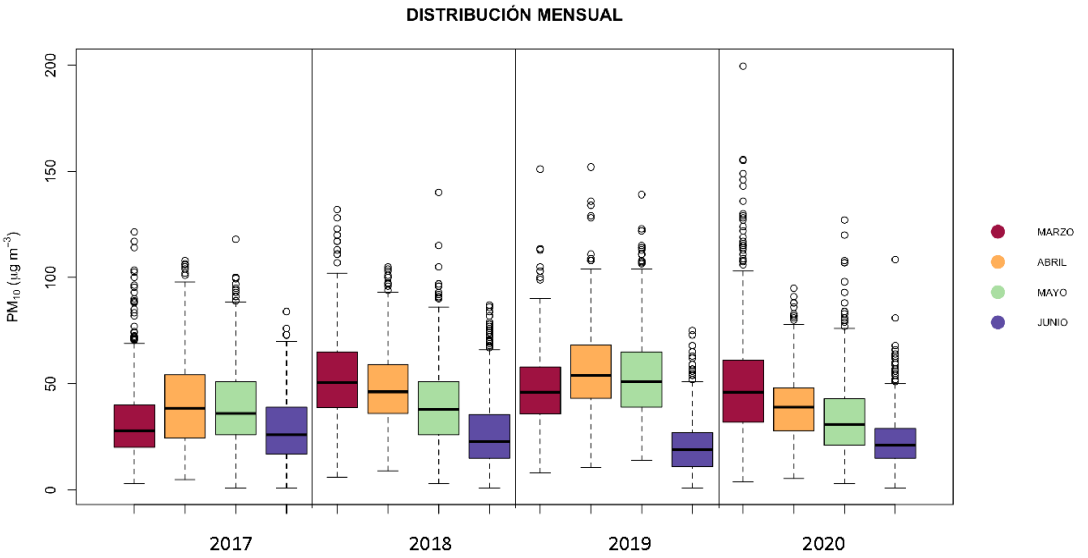


Figura 11 Distribución mensual de PM10 en la cuenca de Pachuca en los meses de marzo a junio del 2017 al 2020.
Fuente: INECC

Durante los meses de marzo a junio del periodo 2017 al 2020 respecto a las PM2.5, las estaciones tuvieron registros que rebasaron el límite máximo normado (45 µg/m^3). Durante este periodo 2017 al 2020 en la CA-P se observó un aumento de 11% en las concentraciones.

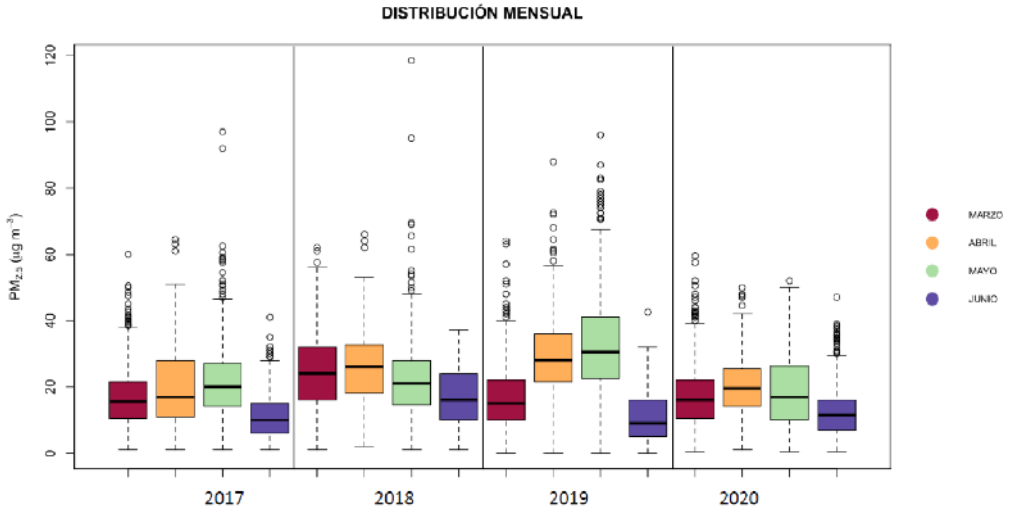


Figura 12 Distribución mensual de PM2.5 en la cuenca de Pachuca en los meses de marzo a junio del 2017 al 2020.
Fuente: INECC

3.3 DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO

Para la distribución mensual de NO_2, la mayor concentración la presenta la CA-T (Fig. 13) en el año 2018 en el mes de abril con 58 ppb.

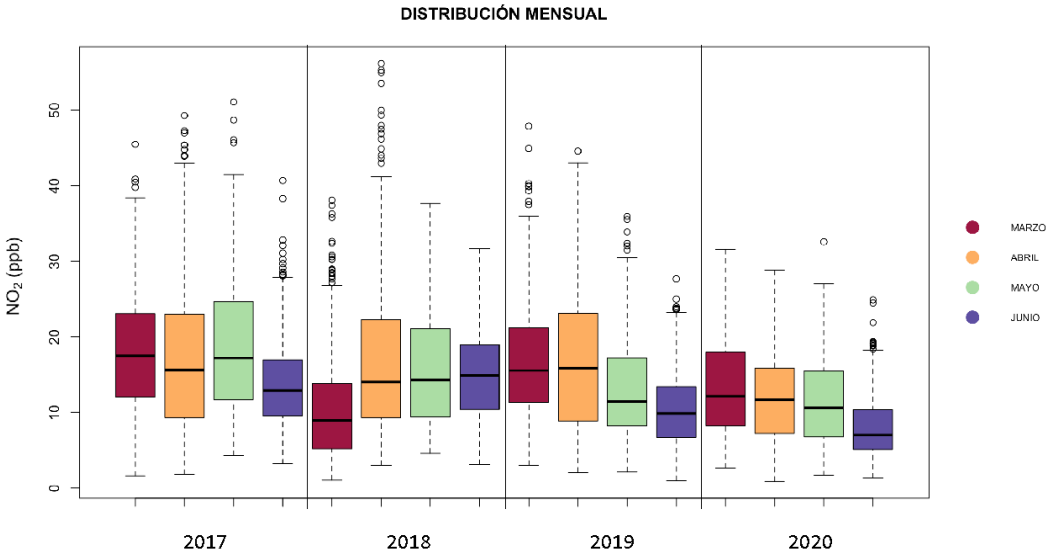


Figura 13 Distribución mensual de NO_2 en la cuenca de Tula en los meses de marzo a junio del 2017 al 2020.
Fuente: INECC

Al comparar los meses de los años previos con el año 2020 (Fig. 13) se observa una disminución en la concentración media para todos los meses de marzo a junio, con la excepción del mes de marzo del año 2018 el cual presenta una concentración media inferior

con respecto al mismo mes en el año 2020, por lo que en comparación de marzo del año 2018 y 2020 presenta un aumento de NO_2 del 26.68%.

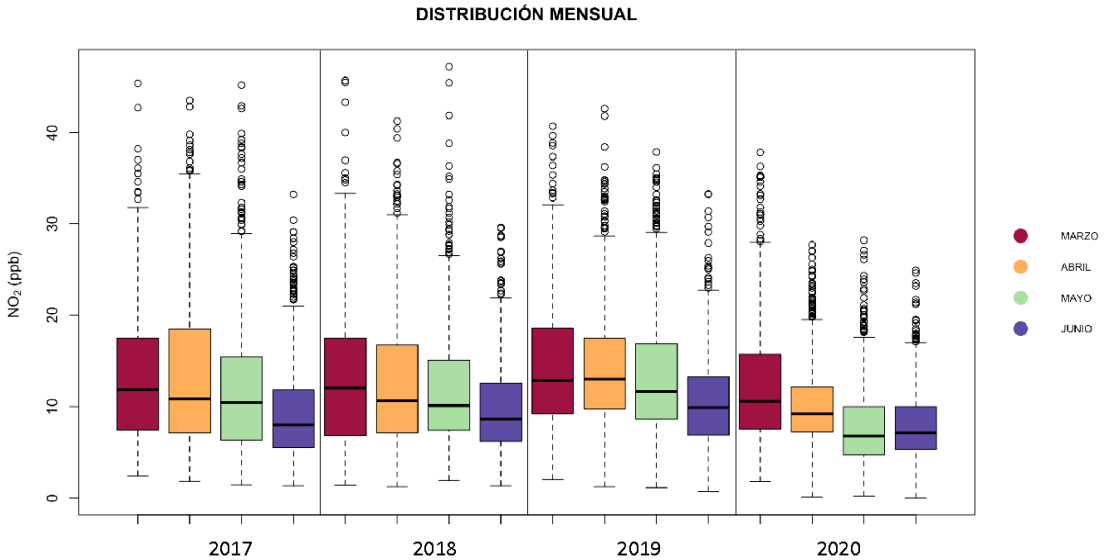


Figura 14 Distribución mensual de NO_2 en la cuenca de Pachuca en los meses de marzo a junio del 2017 al 2020.
Fuente: INECC

El NO_2 en la CA-P (Fig. 14) presenta la misma distribución de NO_2 con mayores concentraciones en los meses de marzo y abril para todos los años (2017-2020), los años 2017, 2018 y 2019 se observa menor concentración NO_2 en el mes junio; para el año 2020 la concentración de NO_2 en el mes de mayo presentó también un descenso.

3.4 DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE MONÓXIDO DE CARBONO

En el análisis de distribución por cuencas atmosféricas de CO, la CA-T (Fig. 15) presenta una mayor concentración media en el mes de junio del 2020 (0.7 ppm) en comparación con el mismo mes de años anteriores.

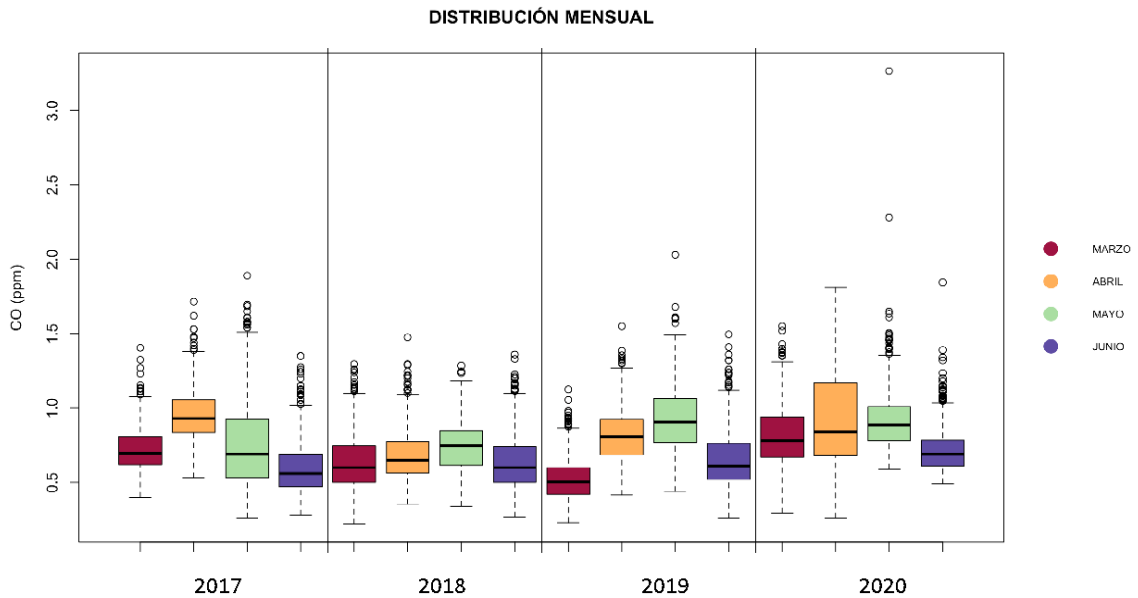


Figura 15 Distribución mensual de CO en la cuenca de Tula en los meses de marzo a junio del 2017 al 2020.
Fuente: INECC

La CA-P (Fig. 16) presenta la menor concentración media en el mes de junio del 2020 (0.5 ppm) en comparación con el mismo mes de años anteriores, también se observa un descenso mensual progresivo de la concentración en el 2020; en años previos la distribución de la concentración media tiene un comportamiento donde aumenta la concentración media desde marzo con un aumento progresivo de la concentración hasta llegar a una concentración mayor en mayo y un descenso de la concentración en junio.

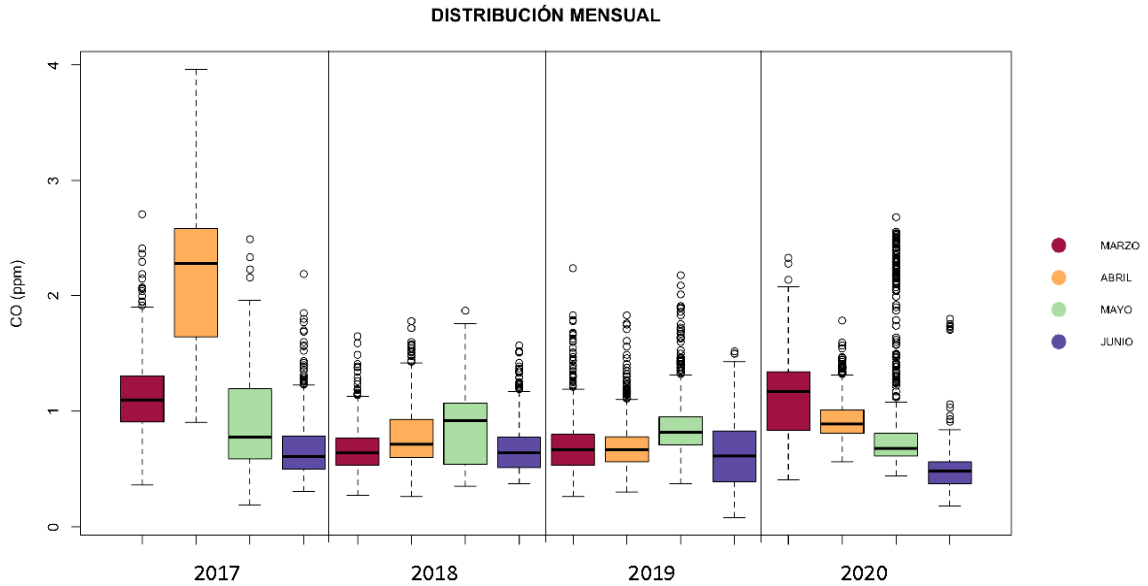


Figura 16 Distribución mensual de CO en la cuenca de Pachuca en los meses de marzo a junio del 2017 al 2020.
Fuente: INECC

En marzo la mayor concentración media se presenta en el 2020 respecto a los años previos con 0.75 ppm para la CA-T (Fig. 15) y 1.1 ppm para la CA-P (Fig. 16), mientras que el mes de abril del 2017 es el que tiene mayor concentración media respecto a abril de los otros años con 0.8 ppm para la CA-T y 2.3 ppm para la CA-P.

4. ANÁLISIS COMPARATIVO POR CUENCA ATMOSFÉRICA POR PROMEDIO HORARIO

Con base al cálculo del promedio horario por cuencas atmosféricas se observa un patrón similar de comportamiento en la generación de ozono en ambas cuencas atmosféricas (Fig. 17), con un inicio de formación de ozono a las 6 am, la concentración máxima de ozono en la CA-T se observa entre las 2 pm y 3 pm, mientras que en la CA-P el pico máximo de concentración se mantiene por más horas, por lo que el máximo de concentración se encuentra entre las 11 am y 3 pm, la concentración de ozono en la CA-P sí es menor en el año 2020 para el periodo de marzo a junio, mientras que en la CA-T el año 2018 entre marzo y junio se formó menos ozono en comparación con los años 2017, 2019 y 2020.

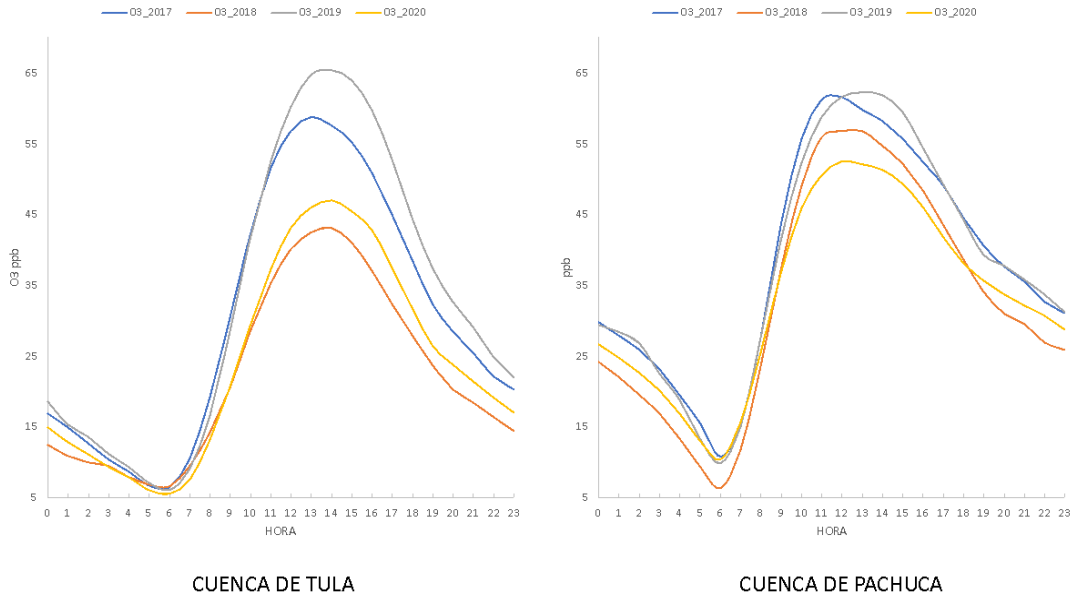


Figura 17 Promedio horario de ozono

En la figura 18 se observa un patrón de concentración de NO_2 para la CA-T y la CA-P con un inicio de emisión a las 4 am, y al compararlas con el patrón de formación de ozono, se puede ver claramente la formación de ozono posterior al pico máximo de NO_2. La CA-T presenta los máximos de concentración de NO_2 entre a las 5 am y 10 am, mientras que la CA-P presenta sus máximas concentraciones entre 6am y 7am (un pico más delgado). En ambas cuencas atmosféricas se presenta una disminución de la concentración de NO_2 en el año 2020 para el periodo de marzo a junio, aunque la concentración de NO_2 fue mayor en la CA-P en

comparación con la CA-T para el año 2020, las concentraciones de NO_2 en la CA-P también son mayores que en la CA-T en los años 2018 y 2019.

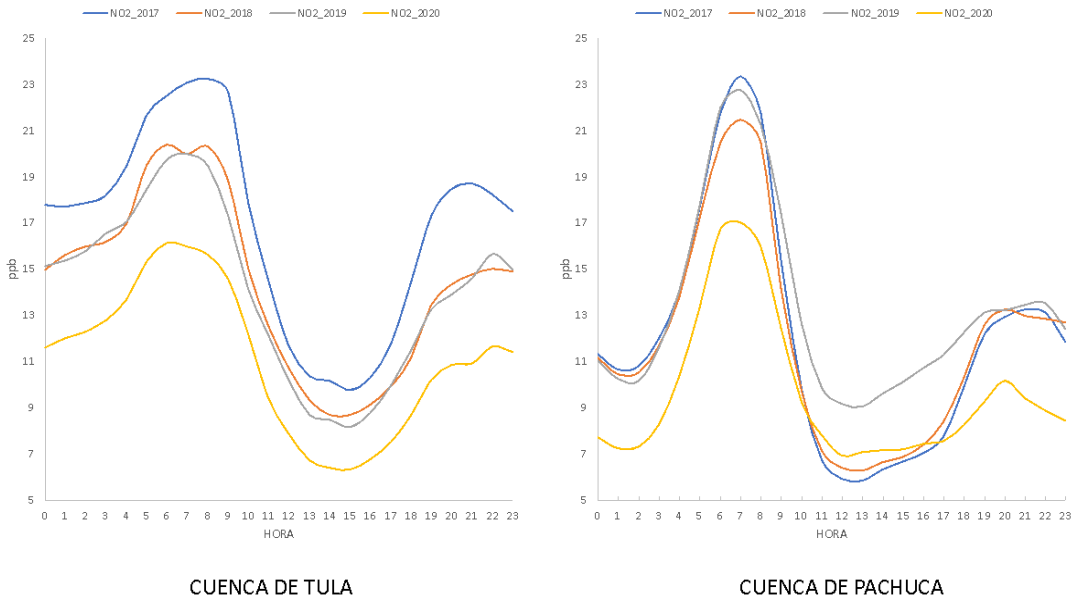


Figura 18 Promedio horario de NO_2

La CA-T presenta la mayor concentración de PM10 (Fig. 19). En ambas cuencas atmosféricas el año 2020 en el periodo de marzo a junio, es el año de menor emisión en comparación con el mismo periodo de los años previos, las cuencas presentan un patrón similar de emisión, empezando a las 5 am, presentando máximos a las 7 am con un descenso a las 9 am y presentando un segundo pico máximo a las 5 pm.

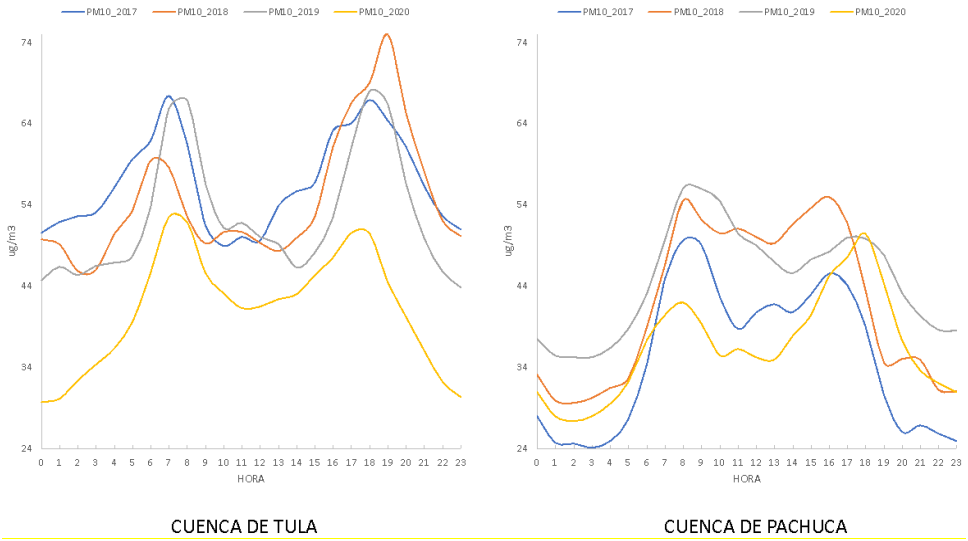


Figura 19 Promedio horario de PM 10

En la gráfica de promedio horario para CO (Fig. 20), se observa el mismo patrón de emisión para las dos cuencas atmosféricas, un pico máximo de las concentraciones de CO entre las 6 am y 8 am y un segundo pico de concentraciones de CO en la tarde entre las 6pm y 8pm, estos picos de concentración coinciden con los picos de actividades diarias de la población, el pico de la mañana está relacionado al inicio de actividades (transporte y actividad industrial), mientras que el segundo pico de concentraciones coincide con la disminución de actividades y corresponde a la emisión de CO de medios de transporte. En el año 2020, la concentración de promedio horario de CO fue similar en ambas cuencas, con una concentración aproximada de 1.1 ppm, aunque en años previos las concentraciones de promedio horario de CO reportan valores más altos en la CA-P que en la CA-T. El consumo de gas licuado de petróleo, que incrementó su uso en el área residencial debido a la emergencia sanitaria del 2020, se ve reflejado en la figura 20, la concentración de CO incrementó en el año 2020 en ambas cuencas, ya que la población se encontraba más tiempo en sus hogares e incrementaron el uso de gas LP.

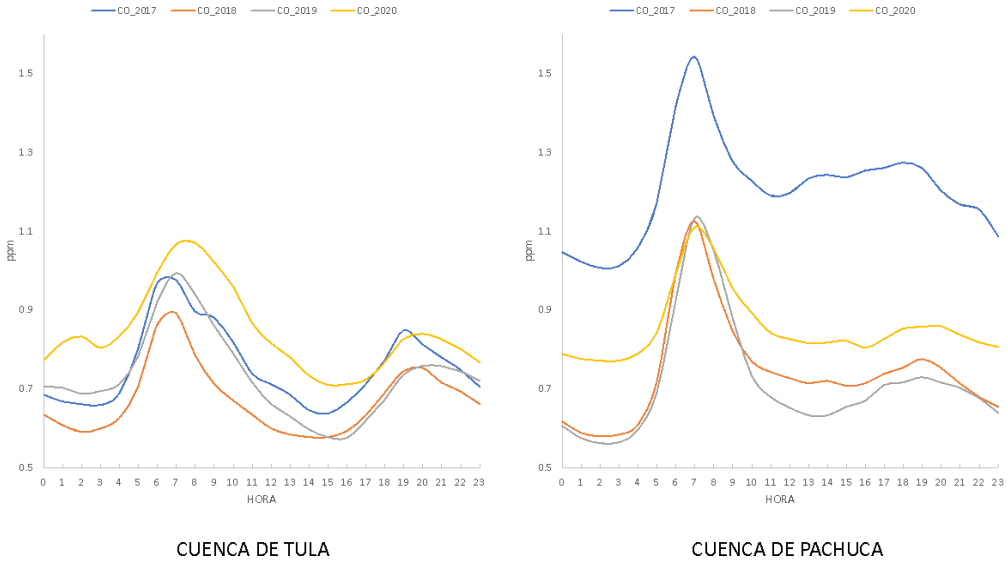


Figura 20 Promedio horario de CO

Para el SO_2 (Fig. 21), la CA-T presenta las mayores concentraciones de promedio horario al comparar estos valores respecto a la CA-P, la presencia de mayor concentración en la CA-T se puede deber a la actividad industrial en esta zona, en ambas cuencas atmosféricas se observa un patrón de emisión de SO_2, se puede relacionar a un inicio de actividades, la emisión empieza a las 6 am y empieza a disminuir a las 2 pm.

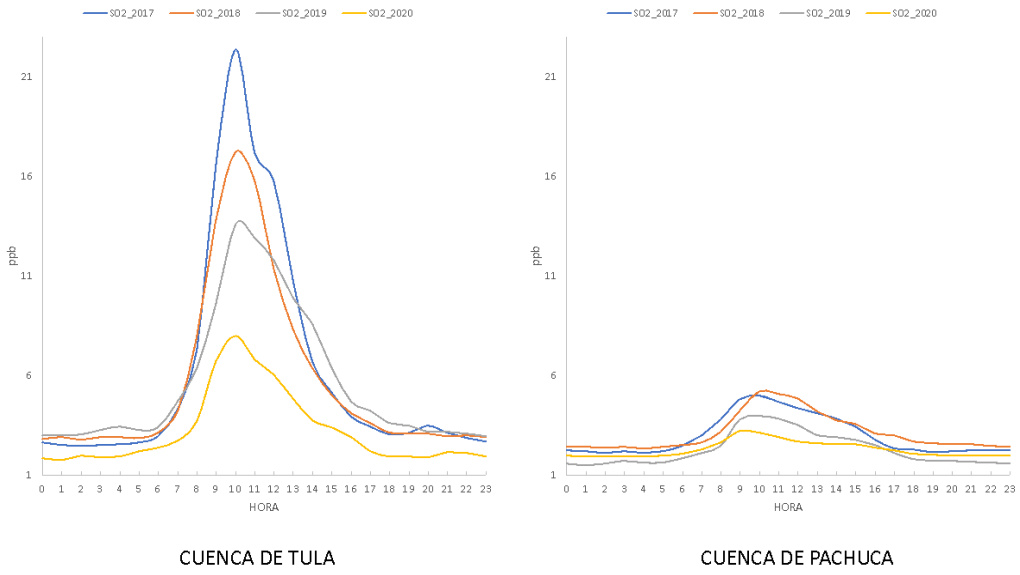


Figura 21 Promedio horario de SO_2

5. PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO

El análisis estadístico descriptivo corresponde al análisis horario de la mediana de los datos provenientes de las diez estaciones atmosféricas del sistema de monitoreo de la calidad del aire (SIMAEH) de Hidalgo para para cada contaminante en el periodo estudiado de los años 2017, 2018, 2019 y 2020 (tabla 8, 9, 10, 11, 12 y 13).

Tabla 8 Estadística descriptiva del análisis horario, PM2.5.

Parámetro PM2.5 (ug/m3)	2017	2018	2019	2020
Mínimo	1.00	1.00	1.00	1.00
Máximo	62.00	59.00	70.00	53.00
Mediana	17.00	19.00	20.00	15.00
Media	18.34	19.11	20.61	15.99
Desv. Estan.	8.76	6.95	10.69	8.40
1er Qu.	12.00	14.25	12.91	10.00
3er Qu.	23.00	23.00	27.00	21.00
Rango	61.00	58.00	70.00	53.00

Tabla 9 Estadística descriptiva del análisis horario, PM10.

Parámetro PM10 (ug/m3)	2017	2018	2019	2020
Mínimo	2.50	4.00	3.00	4.50
Máximo	125.50	122.00	125.50	127.00
Mediana	34.50	43.50	43.50	36.50
Media	36.51	43.94	44.38	38.24
Desv. Estan.	17.04	17.83	19.20	16.36
1er Qu.	24.00	32.00	30.00	26.00
3er Qu.	46.00	55.00	57.00	48.00
Rango	123.00	118.00	122.50	122.50

Tabla 10 Estadística descriptiva del análisis horario, O_3.

Parámetro O_3 (ppb)	2017	2018	2019	2020
Mínimo	3.00	3.30	2.00	2.30
Máximo	94.30	74.90	96.05	72.50
Mediana	30.70	27.03	34.55	28.15
Media	34.02	28.97	36.27	29.20
Desv. Estan.	19.47	15.64	20.11	14.78
1er Qu.	18.50	16.20	19.04	17.05
3er Qu.	47.12	40.50	51.70	40.00
Rango	91.30	71.60	94.05	70.20

Tabla 11 Estadística descriptiva del análisis horario, NO_2.

Parámetro NO_2 (ppb)	2017	2018	2019	2020
Mínimo	2.40	1.40	1.00	0.70
Máximo	39.80	36.25	38.70	26.60
Mediana	10.40	9.68	10.40	7.90
Media	12.16	10.86	11.73	8.94
Desv. Estan.	6.32	5.28	5.53	4.38
1er Qu.	7.30	6.80	7.60	5.7
3er Qu.	15.80	14.05	14.90	11.15
Rango	37.40	34.85	37.70	25.90

Tabla 12 Estadística descriptiva del análisis horario, SO_2.

Parámetro SO_2 (ppb)	2017	2018	2019	2020
Mínimo	1	1.30	1.00	0.8
Máximo	19.9	25.45	38.20	9
Mediana	2.3	2.55	2.40	2.05
Media	2.77	3.02	2.73	2.31
Desv. Estan.	1.55	1.55	1.67	0.89
1er Qu.	2.00	2.15	1.90	1.70
3er Qu.	3.00	3.40	2.95	2.60
Rango	18.9	24.15	37.20	8.2

Tabla 13 Estadística descriptiva del análisis horario, CO.

Parámetro CO (ppm)	2017	2018	2019	2020
Mínimo	0.28	0.32	0.14	0.30
Máximo	1.79	1.55	1.85	1.38
Mediana	0.67	0.63	0.63	0.66
Media	0.71	0.65	0.66	0.68
Desv. Estan.	0.19	0.16	0.21	0.16
1er Qu.	0.57	0.55	0.51	0.56
3er Qu.	0.82	0.73	0.77	0.77
Rango	1.51	1.22	1.71	8.2

Para determinar si existe una diferencia estadística significativa en la comparativa del periodo marzo a junio (2017 al 2020), se calculó el valor de P para cada año con su respectiva comparación con el año 2020, sabiendo que si el tamaño de la muestra es igual en ambos periodos y el valor de p calculado es menor a un p=0.05, la diferencia en los valores es estadísticamente significativa (tabla 14).

Tabla 14 valor de P para cada año con su respectiva comparación con el año 2020.

Valor P	PM2.5	PM10	O_3	NO_2	CO	SO_2
2017-2020	3.40E-02	7.27E-09	2.82E-08	1.00E-49	1.34E-04	2.01E-02
2018-2020	4.68E-34	9.07E-35	*1.37E-01	9.28E-04	7.45E-78	1.42E-47
2019-2020	2.78E-26	2.75E-16	2.75E-15	1.01E-59	1.78E-68	8.57E-04

$p < 0.05$ la diferencia es estadísticamente significativa

Dentro de este análisis también se realizó el cálculo de los porcentajes de reducción de los contaminantes en el Estado de Hidalgo considerando la mediana de las tres cuencas atmosféricas: Cuenca de Tula, Cuenca de Pachuca y Cuenca de Tulancingo (tabla 15, 16 y 17), en el periodo marzo a junio de los respectivos años en comparación con el año 2020.

Tabla 15 Porcentajes de reducción por contaminantes del Estado de Hidalgo.

Estado de Hidalgo

Año / *% Reducción*	O_3	NO_2	CO	SO_2	PM10	PM2.5
2017-2020	14.17	26.47	4.14	16.45	4.75+	12.79
2018-2020	0.80*	17.63	4.19†	23.46	12.97	16.32
2019-2020	19.49	23.75	3.77+	15.38	13.84	22.40

Al observar la importancia del análisis por cuenca atmosférica se calculó los porcentajes de reducción de los contaminantes de la CA-T (tabla 16) y la CA-P (tabla 17) en el periodo marzo a junio de los respectivos años en comparación con el año 2020, ya que la CA-T es el área con mayor industria de jurisdicción federal del Estado de Hidalgo, mientras que la CA-P es mas de uso residencial y se puede observar la diferencia de concentración de contaminantes emitidos en las diferentes cuencas atmosféricas.

Para la CA-T (tabla 16) en comparación con los demás años y el 2020 el CO no disminuyó, lo mismo sucede para la CA-P a diferencia del año 2017 que en la comparación si existe una reducción del 29% para CO. Los demás contaminantes si presentan una reducción al comparar los años previos con el año 2020, de manera general los mayores porcentajes de reducción se presentan en la CA-T, los mayores porcentajes de reducción lo presentan para el SO_2 y el PM10 en la CA-T para los tres años comparados, el promedio de reducción oscila el 40% y el 24% respectivamente.

* Estadísticamente no significativo
† Aumento de porcentaje

Tabla 16 Porcentajes de reducción por contaminantes en la cuenca atmosférica de Tula.

Cuenca de Tula

Año / *% Reducción*	O_3	NO_2	CO	SO_2	PM10	PM2.5
2017-2020	20.09	34.11	11.42⁺	48.84	27.54	
2018-2020	8.95⁺	22.97	25.46⁺	43.67	24.89	
2019-2020	26.75	21.29	15.39⁺	42.96	21.79	

Tabla 17 Porcentajes de reducción por contaminantes en la cuenca atmosférica de Pachuca.

Cuenca de Pachuca

Año / *% Reducción*	O_3	NO_2	CO	SO_2	PM10	PM2.5
2017-2020	12.40	19.72	29.06	22.72	4.06⁺	0.20
2018-2020	1.81⁺	18.83	15.34⁺	26.79	12.57	27.48
2019-2020	12.40	27.42	19.87⁺	1.07⁺	18.35	24.92

6. ANÁLISIS DE OBSERVACIONES SATELITALES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN DOS CUENCAS ATMOSFÉRICAS DEL ESTADO DE HIDALGO (TULA Y PACHUCA)

Durante la contingencia sanitaria, se analizaron los contaminantes en las cuencas atmosféricas de Tula y Pachuca del Estado de Hidalgo, mediante el uso de imágenes satelitales generadas a través del instrumento de percepción remota TROPOMI que se encuentra a bordo de la plataforma satelital Sentinel-5, el cual tiene una resolución espacial de 3.5 km x 5.5 km.

En las figuras 22 a la 25 se presentan las imágenes con las distribuciones espaciales de las columnas de NO_2 y de HCHO, este último como un proxy de la emisión de COV.

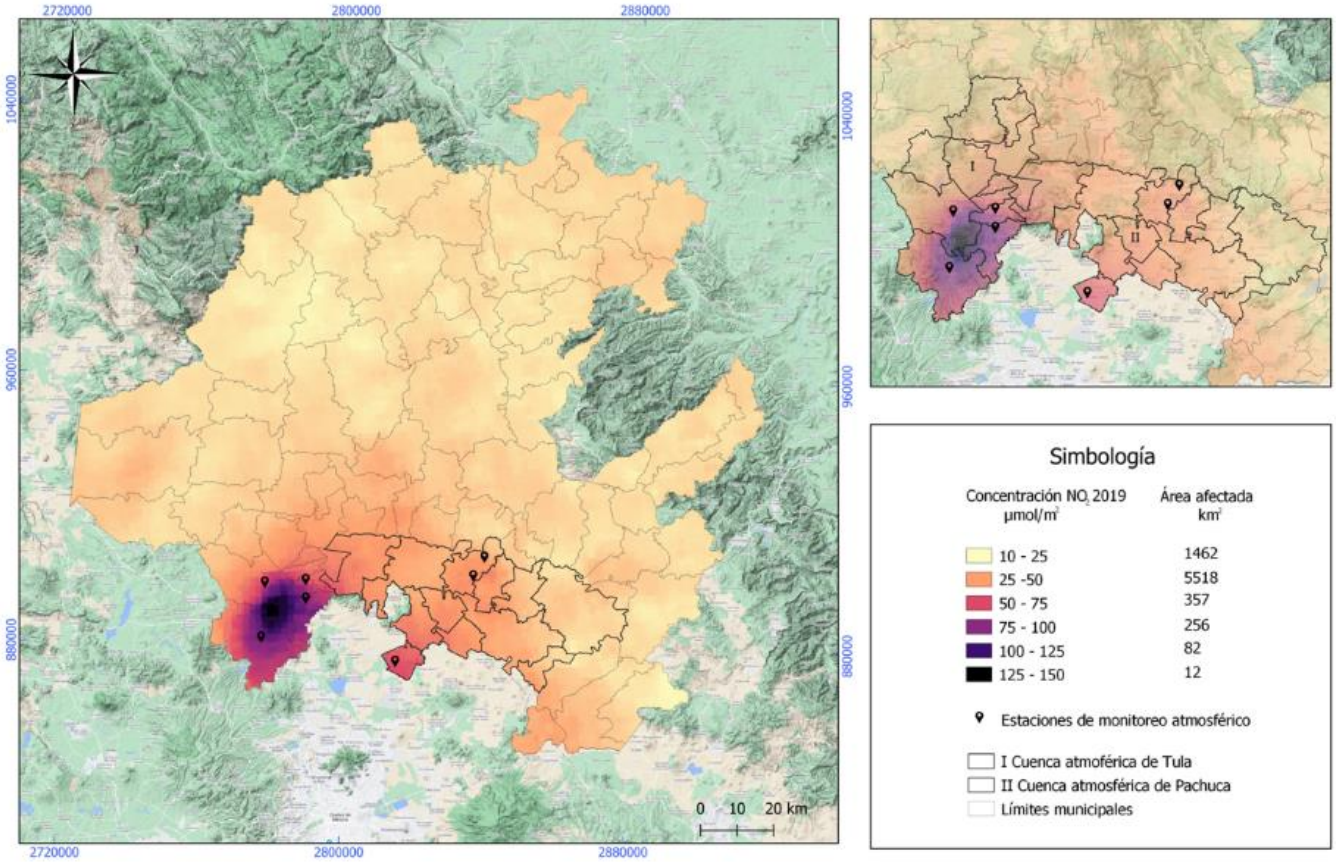


Figura 22 Distribución espacial de las columnas promedio de NO_2 para el periodo de marzo a junio del 2019.

La figura 22 corresponde a la imagen satelital de la columna NO_2 en el año 2019, se observa una columna de densidad atmosférica en Tula de 131 umol/m^2, en el año 2020 la columna NO_2 presenta un descenso en todo el Estado de Hidalgo (Fig. 23); pero se observa un mayor descenso en Tula que es el área industrial del Estado de Hidalgo. El descenso de la densidad de columna en el año 2020 en Tula tiene una columna de densidad atmosférica de 91 umol/m^2, esto representa una reducción del 27% para el año 2020. En el año 2019 el área afectada por valores entre 25 y 150 umol/m^2 en la CA-T fue de aproximadamente 710 km2, mientras que en el 2020 el área afectada disminuyó a aproximadamente 500 km^2. En esta cuenca la columna de HCHO también disminuye en un 25% respecto al año 2019.

La CA-P también presenta un descenso en la densidad de la columna atmosférica de NO_2 en el año 2020 donde se alcanzaron valores entre 10 y 50 umol/ m^2 mientras que los valores del año 2019 fueron de entre 10 y 75 umol/m^2, por lo tanto, se observa una disminución del 33% en la en esta cuenca atmosférica.

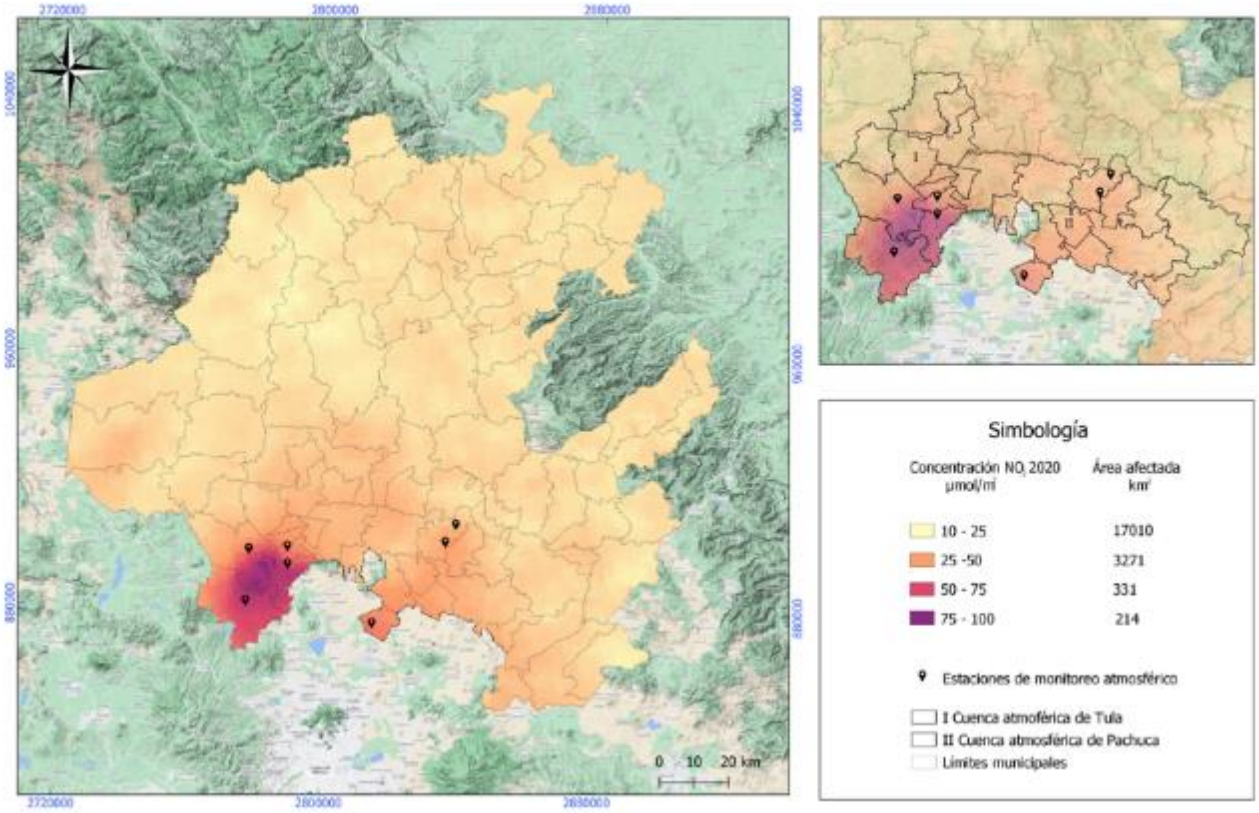


Figura 23 Distribución espacial de las columnas promedio de NO_2 para el periodo de marzo a junio del 2020.

En las imágenes satelitales del periodo de marzo a junio del año 2019 y 2020 se observa una disminución de la concentración de NO_2 en el año 2020, lo que concuerda con la disminución de la actividad industrial y movilización y se ve reflejado en la concentración de contaminantes hacia la atmósfera. Como se ha mencionado anteriormente el NO_2 es un contaminante emitido en el proceso de combustión por lo tanto está relacionado a procesos industriales, movilidad, uso de gas LP, etc., por lo cual se observa un mayor descenso de este contaminante en la zona industrial y de vivienda en el Estado. Del análisis de las concentraciones de NO_2 de las redes de monitoreo atmosférico que se encuentran en las CA-T y CA-P, se registró una disminución entre al año 2019 y 2020 del 26.75%, del análisis de la columna de NO_2 del Sentinel-5p entre los años 2019 y 2020 para las mismas cuencas atmosféricas se registró una disminución del 27.16%, lo que indica una concordancia de los datos evaluados in situ de la red de monitoreo atmosférico.

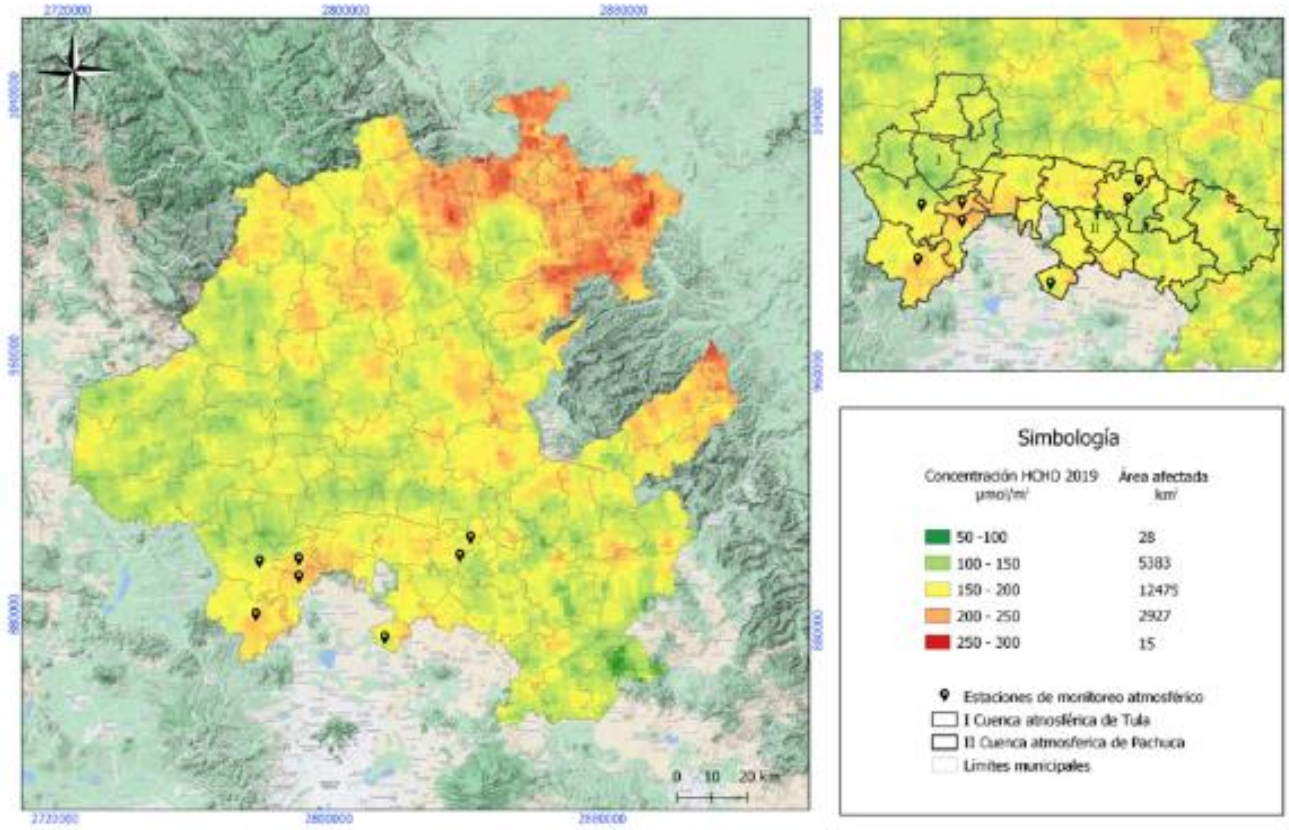


Figura 24 Distribución espacial de las columnas promedio de HCHO para el periodo de marzo a junio del 2019.

La figura 24 presenta la densidad de la columna de HCHO para el Estado de Hidalgo en el año 2019, se observa mayor densidad de HCHO en la Sierra de Hidalgo, con una densidad de columna entre 250 y 300 umol/m^2, también se aprecia en la CA-T rangos de 150 a 250 umol/m^2 de HCHO, cabe recordar que el formaldehído es un producto metabólico de las plantas por lo que se encuentra en áreas rurales de forma natural. También es un gas intermedio en casi todas las cadenas de oxidación de los COV, incluyendo los de origen biogénico, que eventualmente conducen a CO_2.

Los COV y NOx son los mayores precursores de ozono troposférico, de acuerdo con las mediciones in situ de la red de monitoreo atmosférico, el ozono troposférico disminuyó un 15% al comparar el año 2019 con el 2020, por lo que al disminuir las actividades de movilidad e industrial si desencadenó un descenso en la concentración de contaminantes hacia la atmosfera.

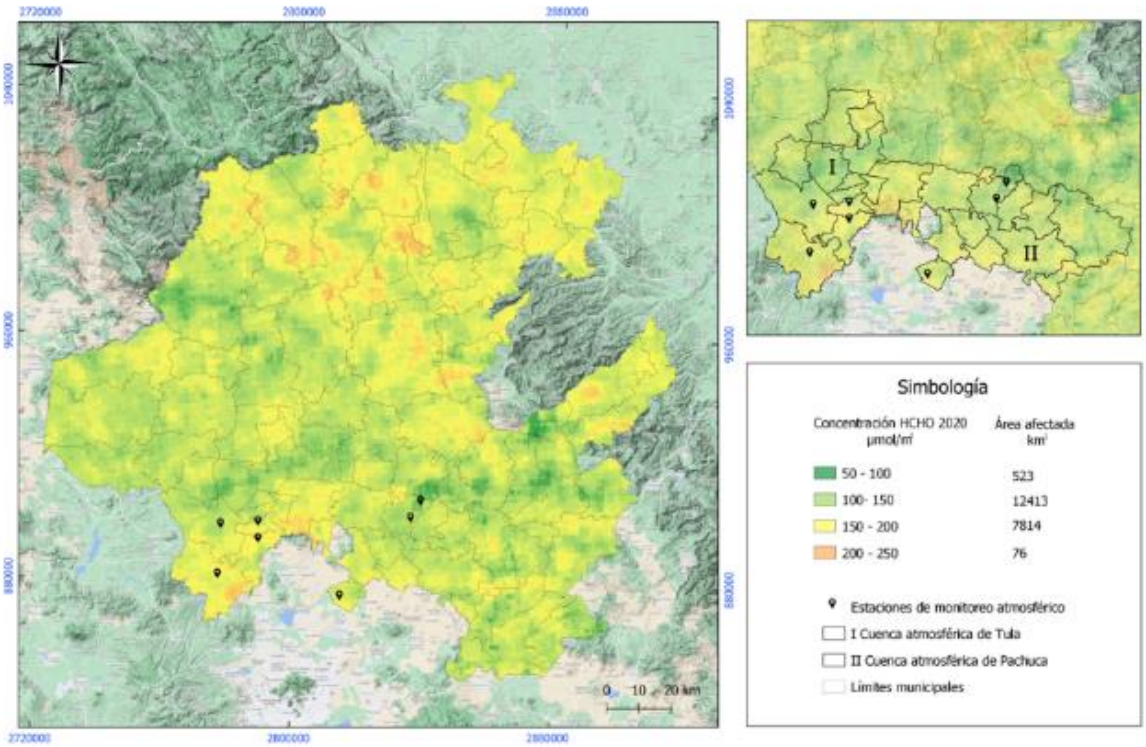


Figura 25 Distribución espacial de las columnas promedio de HCHO para el periodo de marzo a junio del 2020.

La figura 25 muestra la densidad de columna de HCHO en el año 2020, con rango de densidades de columna máximas de 200 a 250 umol/m^2, estos valores representan un 17% de reducción de HCHO en el Estado de Hidalgo en bases a las imágenes provenientes del Sentinel-5p.

7. ANÁLISIS DE VIENTOS Y DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LAS CUENCAS ATMOSFÉRICAS DEL ESTADO DE HIDALGO (TULA Y PACHUCA).

Las cuencas atmosféricas de Hidalgo presentan diferentes escenarios respecto a la emisión de contaminantes atmosféricos según en el inventario de emisiones del 2016 (Fig. 26 y 27).

La CA-T, la más industrializada, aporta la mayor concentración de contaminantes hacia la atmosfera siendo la Central Termoeléctrica de Tula y la Refinería Miguel Hidalgo de Tula, los mayores emisores de contaminantes.

La industria cementera del Estado de Hidalgo también se encuentra en Tula y aporta concentraciones de CO similares a la aportación de CO de la termoeléctrica y a la refinería aproximadamente 2280 toneladas.

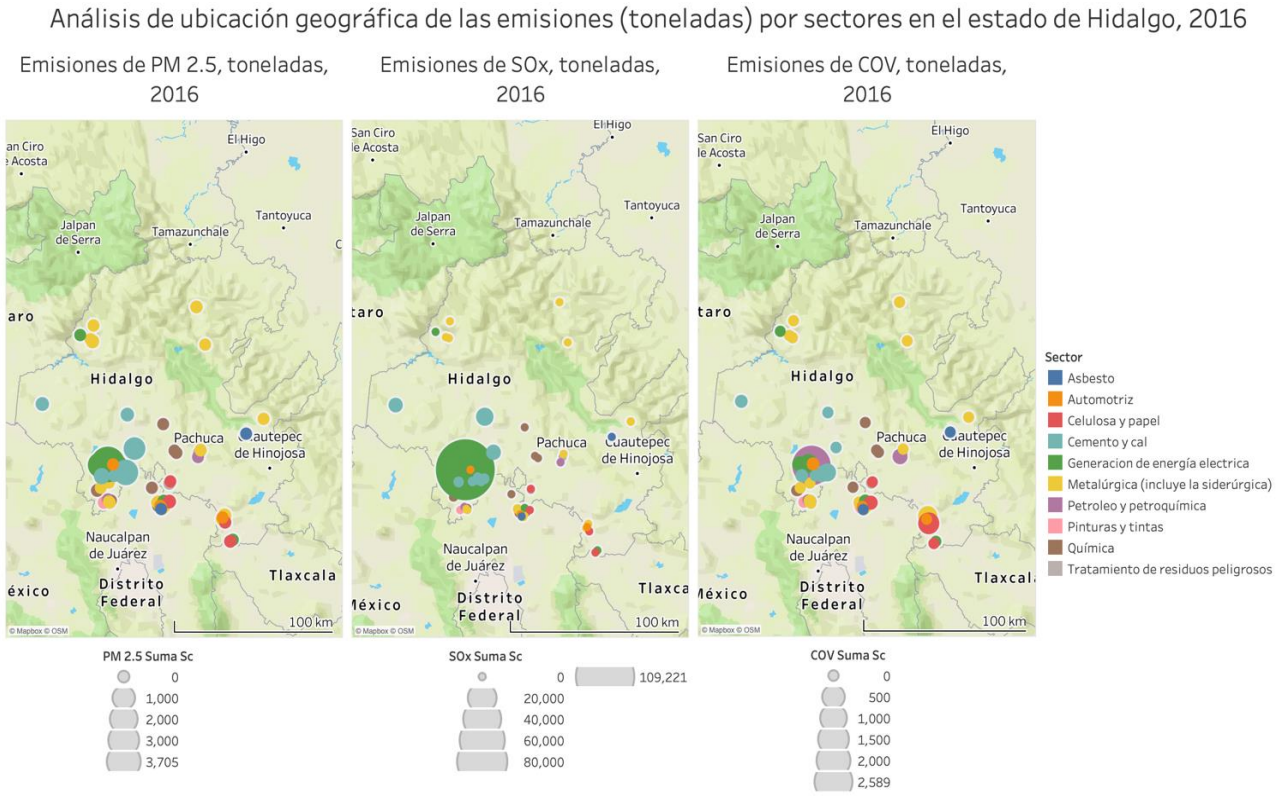


Figura 26 Contribución de PM2.5, SOx y COV de la industria en el Estado de Hidalgo.
Fuente: Inventario de emisiones 2016.

Para observar la emisión de contaminantes y sus posibles fuentes de emisión en cada cuenca atmosférica, se ubicó geográficamente a los sectores industriales en Hidalgo, así como los contaminantes hacia la atmósfera según el inventario de emisiones del 2016.

En el análisis de promedio horario (Fig. 21), la concentración de SO_2 es mucho mayor en la CA-T que en la CA-P, esto coincide con la emisión de SOx que se reporta en el inventario de emisiones donde la emisión de SOx proveniente de la termoeléctrica es de 109 221 toneladas.

Las mayores fuentes de emisión de NOx y PM2.5 también se encuentran en la CA-T y son la termoeléctrica, la refinería, las cementeras y las caleras. La mayor fuente de emisión de COV en Tula es la industria de petróleo y petroquímica. Para profundizar en el análisis y determinar si las concentraciones de los contaminantes medidos por la red de monitoreo son de generación local o son contaminantes que han sido transportados en la atmósfera, se utilizan rosas de vientos de las diferentes estaciones en ambas cuencas atmosféricas, datos meteorológicos, así como también gráficas polares de cada contaminante de todos los años analizados y su comparación con el año 2020 de los meses de marzo a junio para observar la disminución en la concentración de los compuestos.

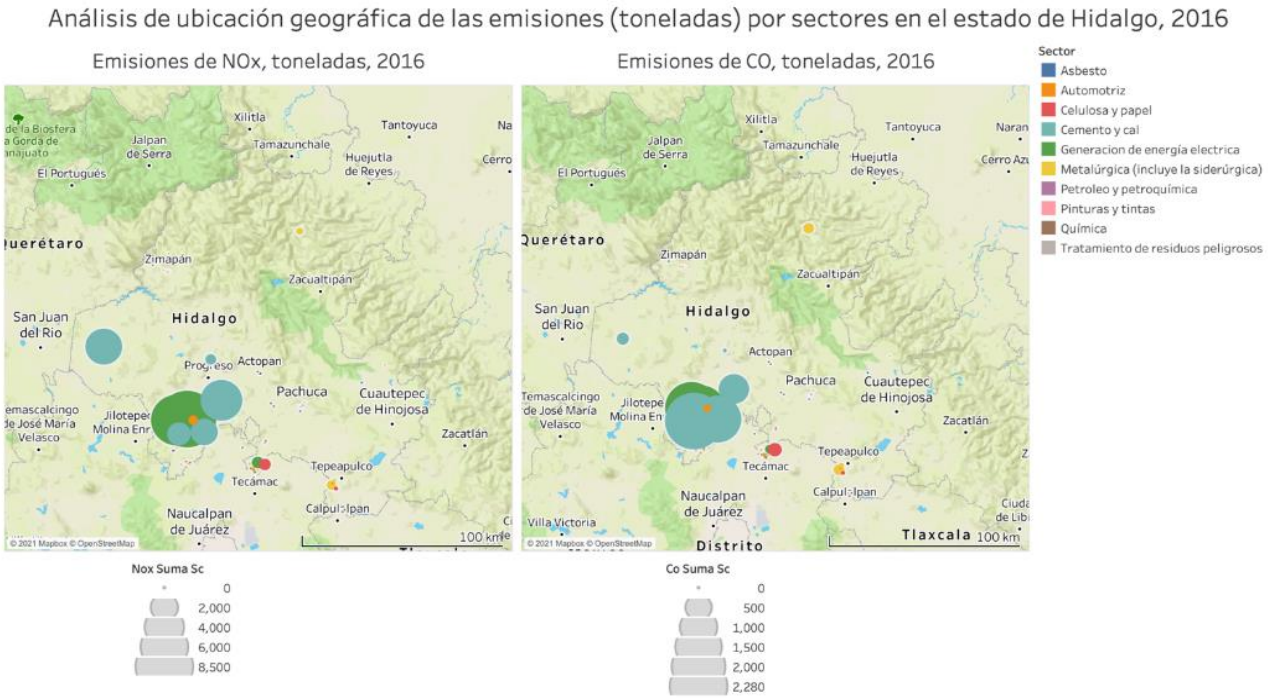


Figura 27 Contribución de NOx y CO de la industria en el Estado de Hidalgo.
Fuente: Inventario de emisiones 2016.

7.1 Cuenca atmosférica de Tula

En base al análisis de las rosas de viento, la mayor frecuencia de vientos que reciben las estaciones de Atitalaquia, Atotonilco, Centro de Salud y Tepeji proviene del norte, noreste y noroeste como se presenta en la figura 28.

Las estaciones de Atitalaquia y Atotonilco además de medir contaminantes de emisión local también miden contaminantes transportados en la atmósfera desde el norte y noreste, estos pueden provenir de las industrias cementeras, generación eléctrica y petróleo y petroquímica.

La estación de Tepeji también mide la emisión de contaminantes locales, pero también recibe emisiones provenientes de la termoeléctrica y refinería de Tula además de las emisiones de la industria cementera.

El análisis de viento se realizó para cada estación y su comparativa de los años 2017 al 2020, se observa que, en la comparación de los cuatro años, cada estación de monitoreo presenta el mismo patrón de dirección de vientos con frecuencias casi similares por lo que se realizó rosas de vientos generales para cada estación considerando los datos de los meses de marzo a junio de los 4 años (Fig. 28).

De manera general las cuatro estaciones reciben con mayor frecuencia vientos del norte, noreste y noroeste por los que las estaciones pueden recibir contaminantes mediante

transporte atmosférico que provienen de estas direcciones de viento (las rosas de vientos por año se presentan en el anexo).

La estación de Atitalaquia presenta vientos que provienen con mayor frecuencia del noroeste, norte y del sur.

La estación de Atotonilco presenta más vientos de menor intensidad que vienen con mayor frecuencia del noroeste y del norte.

La estación de Centro de Salud registra vientos más fuertes que llegan con mayor frecuencia del noreste y vientos menor intensidad del sureste y la estación de Tepeji presenta casi el mismo patrón de vientos para los cuatro años, con vientos más fuertes provenientes del norte, noroeste y noreste, así como también vientos menos intensos provenientes del suroeste.

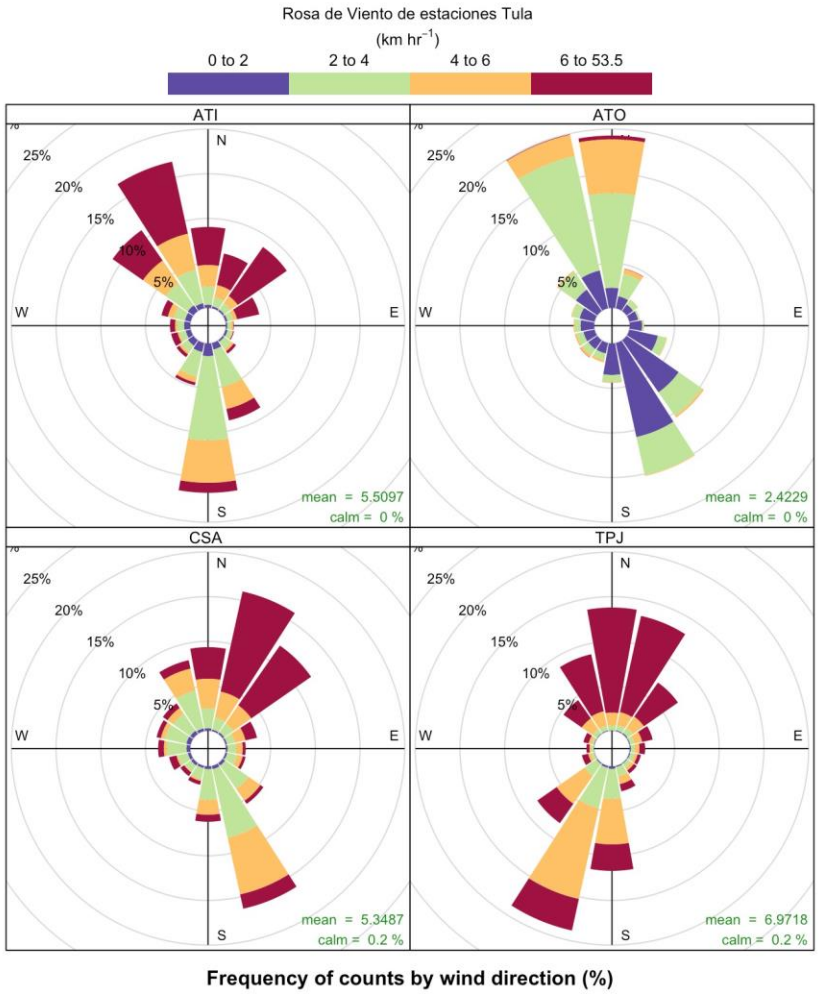


Figura 28 Rosas de viento (promedio de los cuatro años) para las estaciones de Atitalaquia (ATI), Atotonilco (ATO), Centro de Salud (CSA) y Tepeji (TPJ).

Para observar la influencia en la ubicación (estaciones de monitoreo) de las potenciales fuentes de emisión se realizaron gráficas polares de concentraciones, en estas gráficas se presenta la variación de las concentraciones en base a la dirección y velocidad del viento, esto con el propósito de identificar posibles fuentes de emisión.

Las cuatro estaciones de la CA-T, reciben concentraciones de SO_2 mediante el transporte de este contaminante de las fuentes de emisión fijas por combustión de combustibles fósiles como carbón y petróleo que contienen azufre (S); la generación de electricidad por vía térmica y en sitios puntuales como los provenientes de la industria cementera. En el análisis de tendencias de SO_2 se observa una disminución de la concentración en la CA-T, pero aun así la emisión de SO_2 es mucho mayor si se compara con la CA-P, como sabemos la CA-T tiene la mayor cantidad de industrias del Estado de Hidalgo, y se puede observar su impacto en la calidad del aire de las emisiones en esta cuenca (Fig. 29). Se observa el transporte de SO_2 desde el Oeste hacia Atitalaquia, las mayores concentraciones se observan para el año 2019, para el año 2020 se observa el mismo comportamiento con transporte de SO_2 de alrededor de 15 a 25 ppb.

Centro de Salud recibe SO_2 desde el noreste, se observa una mayor concentración de este contaminante en el año 2017. Tepeji recibe gran cantidad de SO_2 mediante transporte proveniente desde el norte, noreste y noroeste, la ubicación de esta estación en el sur de la CA-T hace que esta reciba el SO_2, que proviene de toda la industria recibiendo las emisiones provenientes del norte (Fig. 29).

En el año 2020, Atotonilco recibió menos SO_2 mediante el transporte de vientos, en los años 2017, 2018 y 2019 se observa el transporte de SO_2 hacia Atotonilco desde el noroeste.

Las emisiones de CO son emisiones de fuentes locales cercanas a las estaciones de medición, en las estaciones de Atitalaquia y Atotonilco, se observa una ponderación de emisiones locales, mientras que a la estación Centro de Salud llega CO del este y sureste, el año 2020 presenta mayor concentración de CO por transportación de este contaminante desde el este y sureste. La estación de Tepeji registra emisiones locales, presentando mayor emisión en el año 2020 (Fig. 30).

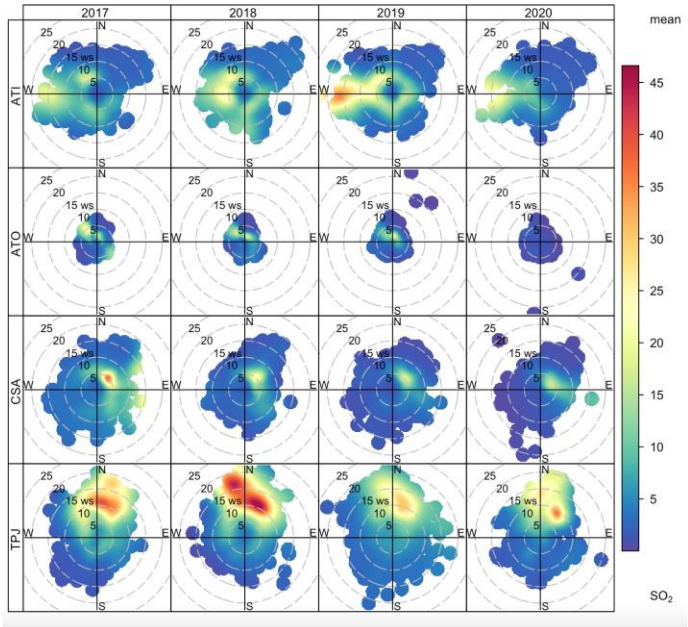


Figura 29 Gráficas polares de SO_2(ppb) de las cuatro estaciones de la cuenca atmosférica de Tula.

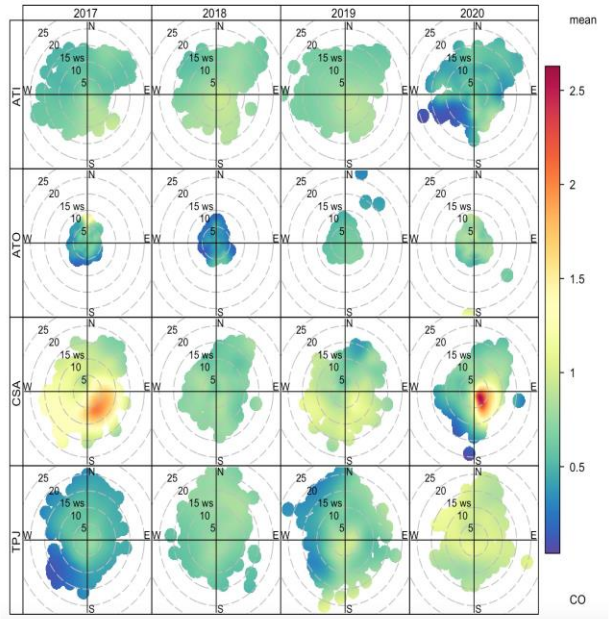


Figura 30 Gráficas polares de CO (ppm) de las cuatro estaciones de la cuenca atmosférica de Tula.

Las emisiones de NO_2 provienen del transporte (autos, autobuses, etc.) y emisiones provenientes de la industria como la central eléctrica de Tula, la refinería de Tula, las cementeras, etc., así como cualquier proceso donde tengan lugar reacciones de combustión entre el N_2 atmosférico y el O_2 a altas temperaturas.

Sabiendo que un mecanismo de formación de ozono es por reacción del NO_2 con luz UV, en las gráficas polares se observa la distribución de ozono (Fig. 31) que al comparar con las gráficas polares de NO_2 se puede ver como el ozono se formó y distribuyó en la CA-T. Aquí también, se observa el vínculo que mantienen el NO_2 y el O_3 en la química de la tropósfera, donde la generación de ozono está estrechamente vinculada a la concentración de la NO_2 en la tropósfera regional.

Las cuatro estaciones de la CA-T presentan en la mayoría de los casos emisiones locales a excepción de la estación Centro de Salud en la cual se observa en el año 2020 emisiones de NO_2 provenientes del Este (Fig. 32).

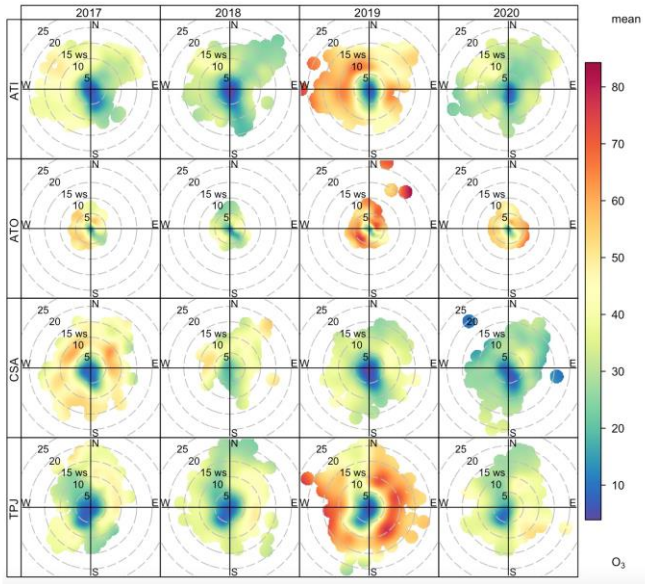


Figura 31 Gráficas polares de O_3 (ppb) de las cuatro estaciones de la cuenca atmosférica de Tula.

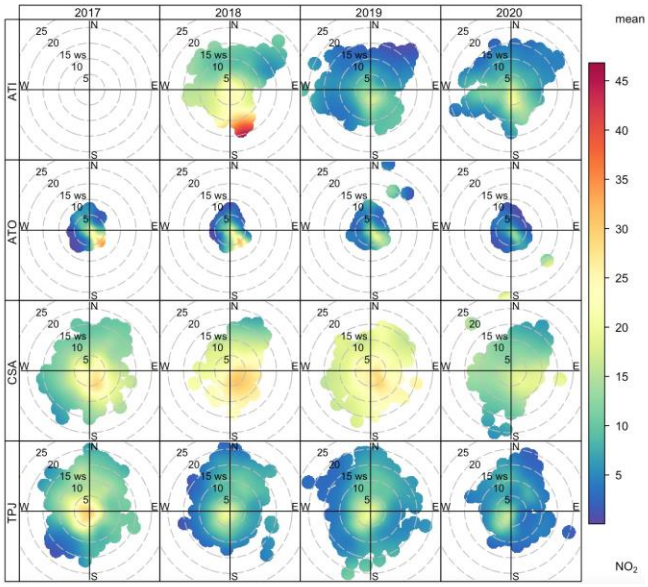


Figura 32 Gráficas polares de NO_2 (ppb) de las cuatro estaciones de la cuenca atmosférica de Tula.

Para el material particulado PM10 la estación de Atitalaquia presenta la mayor concentración en el año 2019, la estación de Atotonilco presenta PM10 transportado desde el Noreste y Este, mientras que en las estaciones de Centro de Salud y Tepeji se observan mediciones de PM10 locales (Fig. 33).

Para el material particulado PM2.5, las tres estaciones tienen datos del 2018 y 2019 y miden PM2.5 de emisiones transportadas y locales (Fig. 34).

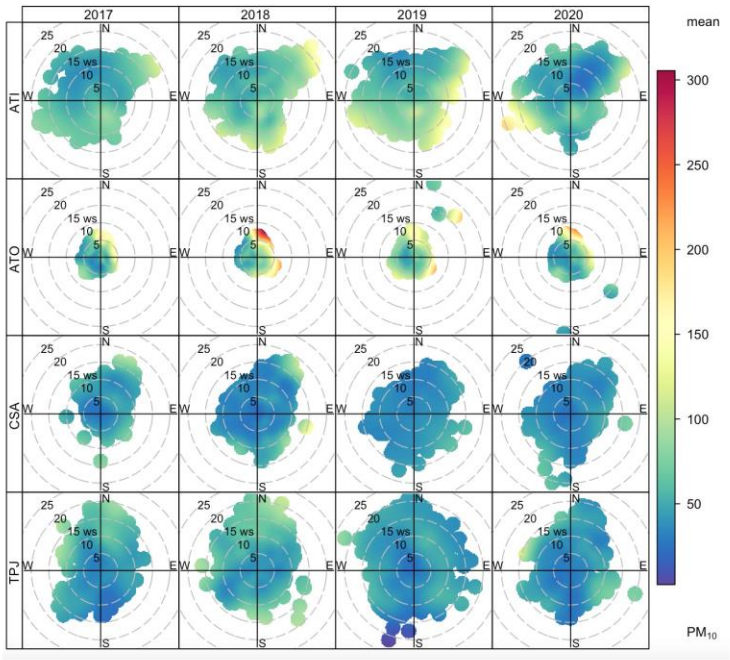


Figura 33 Gráficas polares de PM10 (ug/m^3) de las cuatro estaciones de la cuenca atmosférica de Tula.

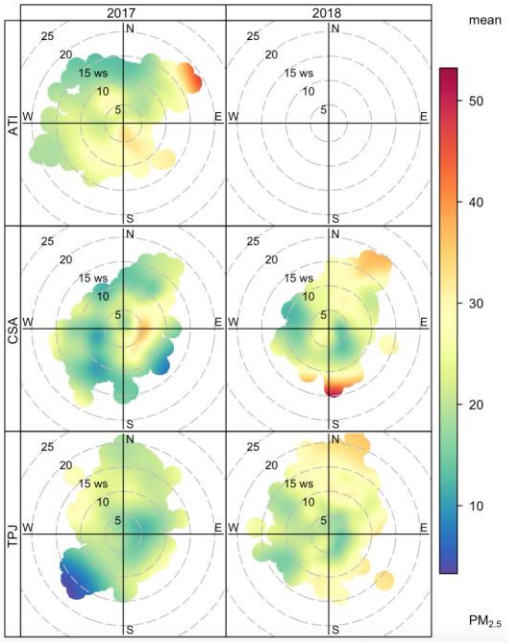


Figura 34 Gráficas polares de PM2.5 (ug/m^3) de las cuatro estaciones de la cuenca atmosférica de Tula.

7.2 Cuenca de Pachuca

En base a las rosas de viento, la mayor frecuencia de vientos que reciben las estaciones de Jardín y Tizayuca proviene del Noreste y Este, mientras que la estación de Rehilete recibe vientos del Suroeste como se presentan en la figura 35.

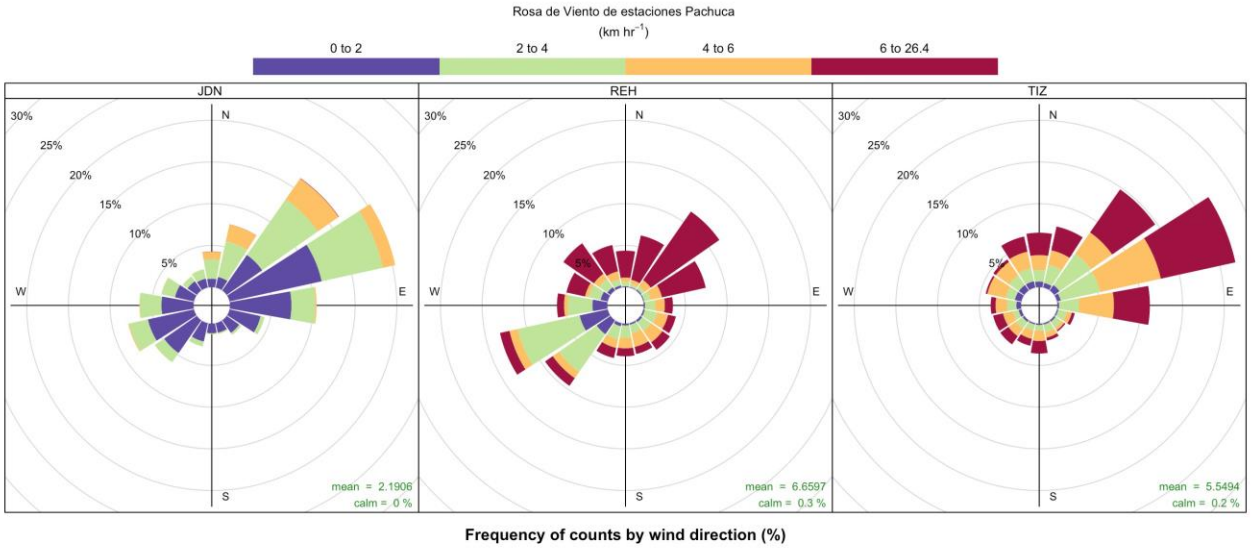


Figura 35 Rosas de viento (promedio de los cuatro años) para las estaciones de Jardín (JDN), Rehilete (REH) y Tizayuca (TIZ).

En las gráficas polares de SO_2 para las tres estaciones de la CA-P, se puede deducir que el SO_2 que miden las estaciones de Jardín y Rehilete es un SO_2 que es transportado desde el Oeste (Fig. 36), mientras que la estación de Tizayuca mide un SO_2 emitido localmente, las tres estaciones de monitoreo miden CO que es emitido localmente, mientras que la estación de Tizayuca indica que mide además de emisión de CO local también mide un CO que es transportado del Sur y Suroeste (Fig. 37), donde se ubican otras industrias así como también la Base Aérea de Santa Lucia y el Depósito de combustibles y lubricantes N°1, en el 2017 la estación de Tizayuca recibió CO proveniente del Suroeste, Sur y Suroeste en mayor cantidad que en los años 2018, 2019 y 2020, esto puede deberse a alguna actividad de las industrias antes mencionadas.

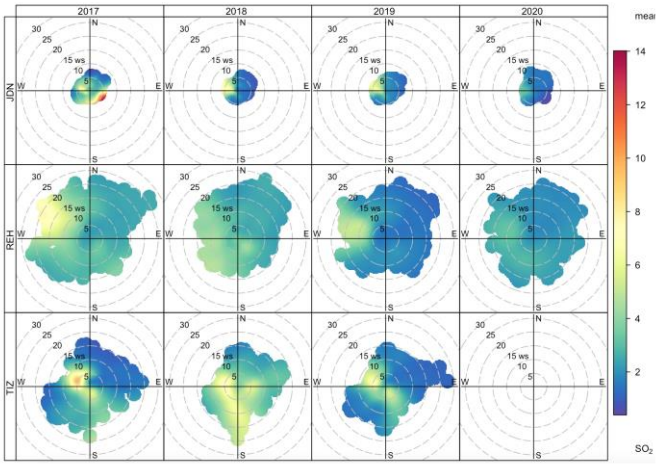


Figura 36 Gráficas polares de SO_2 (ppb) de las cuatro estaciones de la cuenca atmosférica de Tula.

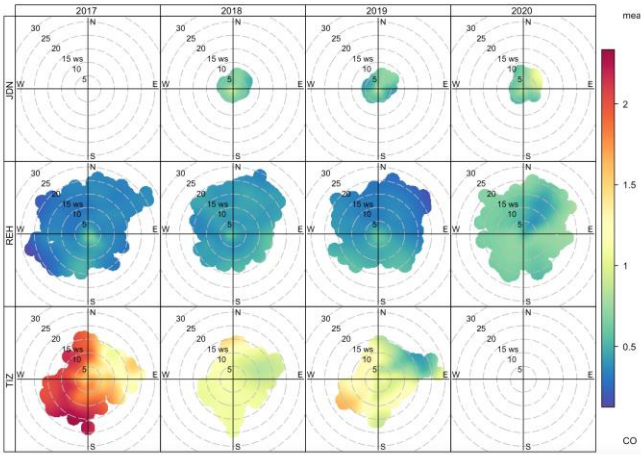


Figura 37 Gráficas polares de CO (ppm) de las cuatro estaciones de la cuenca atmosférica de Tula.

El ozono (Fig. 38) medido en la estación de Jardín y Rehilete es un ozono transportado desde el Oeste, Suroeste, la estación de Tizayuca mide ozono local y ozono transportado desde el Sur. El NO_2 (Fig. 39) para la estación Jardín es emisión local mientras que la estación de Rehilete y Tizayuca miden emisión local de NO_2 y también se observa transporte de NO_2 desde el Suroeste y Sur, esto coincide con las gráficas polares de CO donde se observa un CO que ha sido transportado desde la misma dirección, corroborando que las emisiones provienen de algún proceso de combustión.

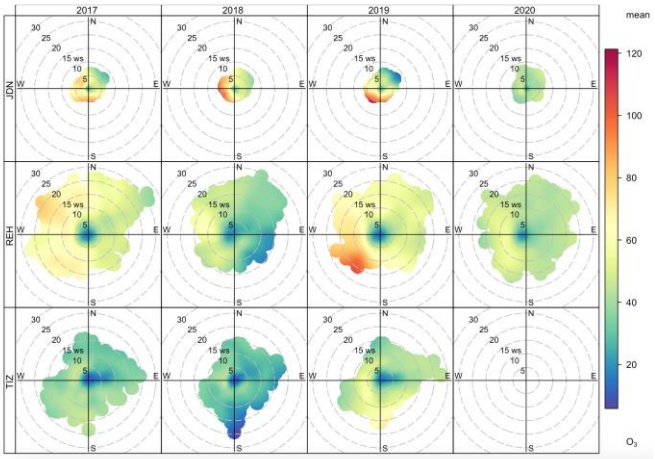


Figura 38 Gráficas polares de O_3 (ppb) de las cuatro estaciones de la cuenca atmosférica de Tula.

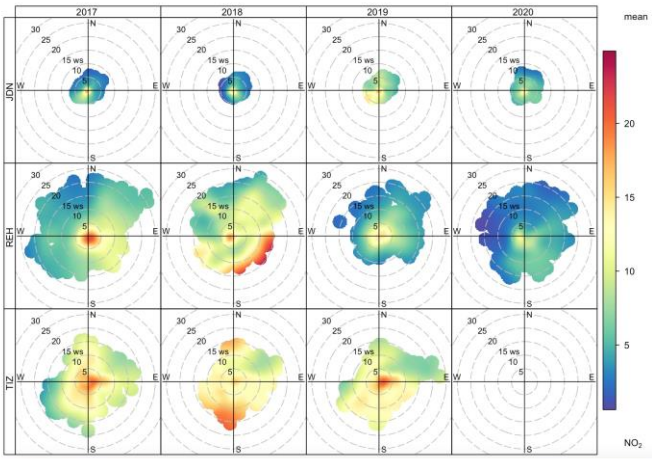


Figura 39 Gráficas polares de NO_2 (ppb) de las cuatro estaciones de la cuenca atmosférica de Tula.

Respecto a PM10 y PM2.5 (Fig. 40, Fig. 41), las estaciones de Jardín y Rehilete miden PM10 y PM2.5 que llega de varias direcciones, la estación Rehilete registra menos PM2.5 en el año 2020 en comparación con los años previos, la disminución de PM2.5 en la estación de Rehilete puede estar relacionada a la disminución de actividades en el año 2020 debido a la emergencia sanitaria por la pandemia.

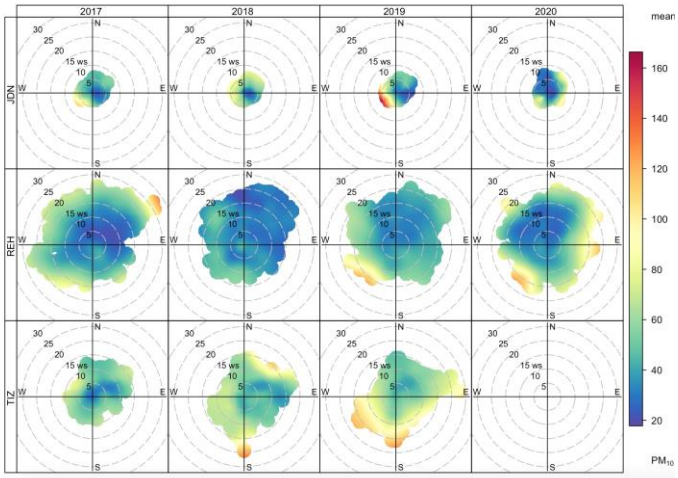


Figura 40 Gráficas polares de PM10 (ug/m^3) de las cuatro estaciones de la cuenca atmosférica de Tula.

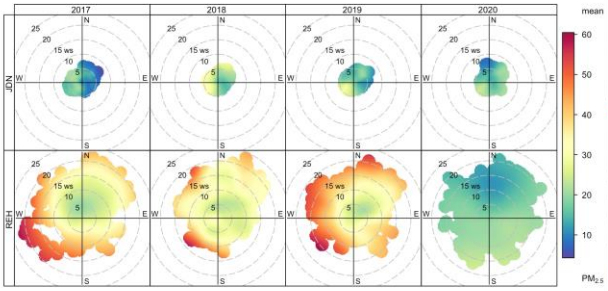


Figura 41 Gráficas polares de PM2.5 (ug/m^3) de las cuatro estaciones de la cuenca atmosférica de Tula.

8. CONCLUSIONES

En el presente estudio se utilizaron datos de monitoreo atmosférico e información satelital (Sentinel- 5p) con el objetivo de cuantificar la reducción o disminución de concentraciones de contaminantes atmosféricos y de la densidad de columna satelital en los meses de marzo a junio del año 2020 y su respectiva comparación con el mismo periodo de los años 2017, 2018, 2019 y 2020.

De las imágenes del satélite se estimó una disminución de NO_2 del 26.75% entre al año 2019 y 2020, para estos mismos años se calculó una disminución del 27.16% de NO_2 de los datos provenientes de las estaciones de monitoreo, lo que indica una concordancia con los datos evaluados in situ del SIMATH.

Se analizaron individualmente las dos principales CA (Tula y Pachuca) ya que ambas presentan diferencias en las principales fuentes de emisión, la CA-T forma parte del corredor industrial atribuido a la generación de energía, la Refinería Miguel Hidalgo de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), además cuenta con industria química, cementera, calera, metalúrgica, metal-mecánica, por su actividad económica, se cuantificó y observó que en la CA-T se emiten más contaminantes a la atmosfera con respecto a la CA-P, ya que esta última tiene su actividad más orientada a servicios y uso habitacional, donde se alberga el 26.17% de la población del Estado.

Lo observado no descarta la contribución de las emisiones de las cementeras ubicadas en la CA-P. Para mejorar el análisis y el diagnóstico es importante separar las CA y así apreciar las contribuciones de los contaminantes emitidos en cada CA.

De manera específica en la CA-T de los años 2017 al 2019 se observó en que el NO_2 se encuentra en altas concentraciones, derivado de la emergencia sanitaria se observó un descenso de la concentración de NO_2 y HCHO en el año 2020. Esta reducción de NO_2 y HCHO contribuyó a la reducción de la concentración de ozono troposférico, sin embargo, la disminución de la concentración de O_3 no fue proporcional a la de sus precursores.

Sabiendo que el ozono troposférico es un problema en la calidad del aire por ser un súper oxidante y que también es relevante para el cambio climático, se deben analizar otros factores como la fotoquímica de la cuenca atmosférica en donde se forma, así como también si son atmósferas altamente contaminadas. En condiciones de alta contaminación atmosférica la reducción de NO_2 por sí solo no garantiza la reducción de la formación de ozono, ya que los COV son parte fundamental del proceso fotoquímico y son precursores de ozono.

Un problema a nivel nacional de las redes de monitoreo atmosférico es que no miden COV, esto implica un impedimento en el entendimiento de la fotoquímica de estas cuencas atmosféricas y es importante conocer la concentración de COV generado principalmente en Tula-Tepeji (zonas industriales).

En este sentido una reducción de emisiones de NOx sin reducir las emisiones de COV no es suficiente. Los COV en presencia de luz UV forman aldehídos secundarios, por lo que se

utilizó las imágenes satelitales del Sentinel-5p de HCHO como un proxy para determinar posibles emisiones de COV en el Estado, se observó una gran concentración de HCHO en el noreste del Estado de Hidalgo, pero estos están relacionados a la emisión de COV biogénicos, que se ubican principalmente en la sierra de Hidalgo.

También es importante considerar que en áreas rurales el proceso predominante es la oxidación de metano (CH_4) y monóxido de carbono (CO) los cuales también son precursores de ozono.

La CA-T presenta los niveles más altos de concentración de contaminantes y por lo tanto se tienen condiciones de mala calidad del aire, los contaminantes generados afectan al área en donde se emiten y por la condiciones meteorológicas y dinámicas de la atmósfera se transportan principalmente al sur del Estado de Hidalgo y hacia la cuenca del Valle de México.

Finalmente, la CA-T también presenta mayores concentraciones de todos los contaminantes medidos en los años 2017, 2018 y 2019 y así mismo, se observa una reducción en las concentraciones de contaminantes en el año 2020, por lo tanto, la industria es el mayor contribuyente de contaminantes atmosféricos afectando directamente la calidad del aire en esta CA.

De este estudio se determinó que los contaminantes analizados disminuyeron su concentración en la atmosfera derivado de la reducción de actividades de antropogénicas e industriales, sabiendo que la situación del año 2020 fue una situación inédita o anormal, esto permitió establecer hasta que límite se pueden disminuir las emisiones provenientes de las actividades antropogénicas e industriales de ambas cuencas atmosféricas.

Este estudio se puede utilizar para establecer una línea base para el análisis y evaluación de las políticas públicas para mejorar la calidad del aire en el Estado de Hidalgo.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2019). Informe Nacional de Calidad del Aire 2018, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos.

2. J.P. Veefkind, I. Aben, K. McMullan, H. Förster, J. de Vries, G. Otter, J. Claas, H.J. Eskes, J. F. de Haan, Q. Kleipool, M. van Weele, O. Hasekamp, R. Hoogeveen, J. Landgraf, R. Snel, P. Tol, P. Ingmann, R. Voors, B. Kruizinga, R. Vink, H. Visser, P.F. Levelt (2012) TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications; Remote Sensing of Environment; 120; 70-83.

3. Carslaw, D. C. and K. Ropkins, (2012). openair —an-R package for air quality data analysis; Environmental Modelling & Software; 27-28; 52–61.

4. Carslaw, D. C. (2015). The openair manual —open-source tools for analyzing air pollution data. Manual for version 1.1-4, King's College London.

5. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2020). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. 343 pp.

6. QGIS.org, 2021. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. http://www.qgis.org

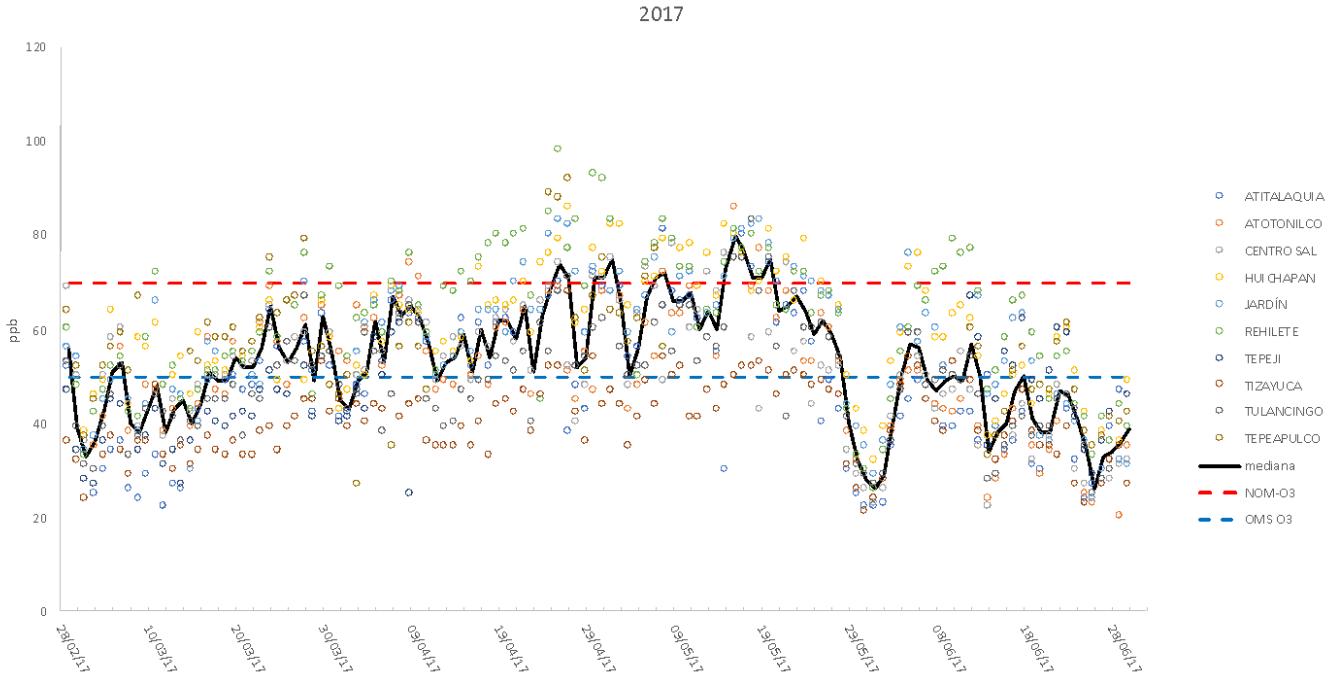
7. R core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https:// www.R-project.org/

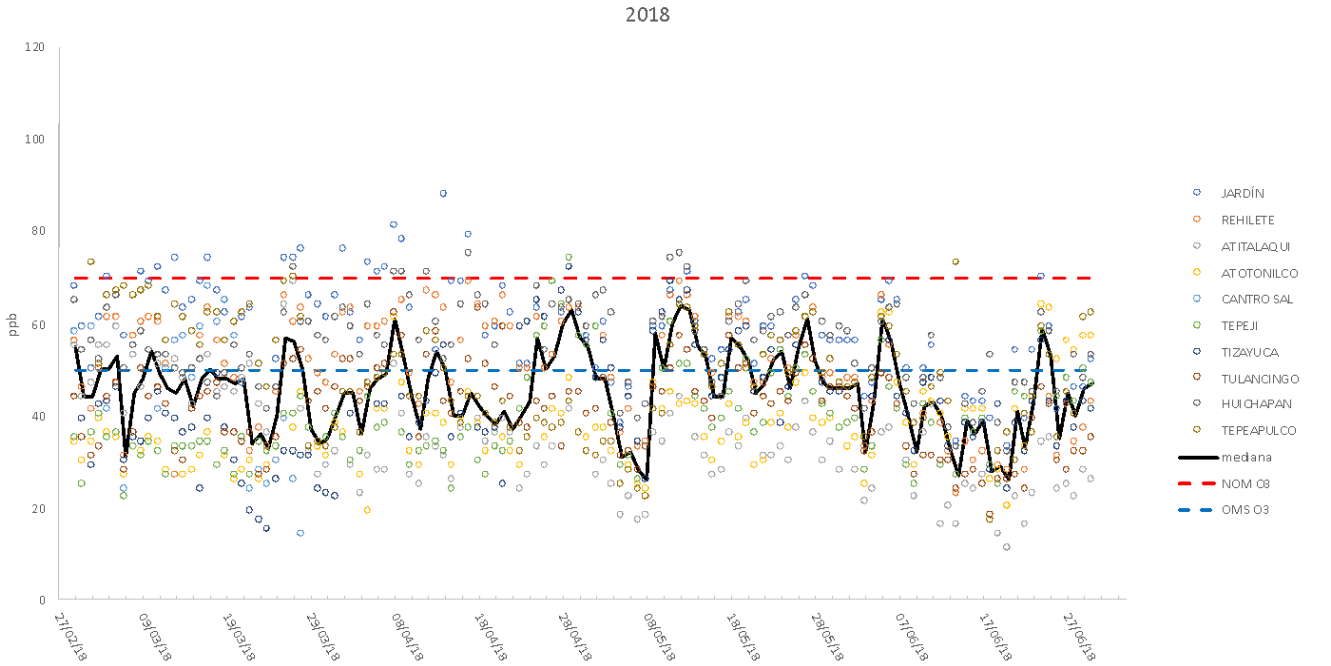
8. Seinfeld and Pandis (2006). Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change.

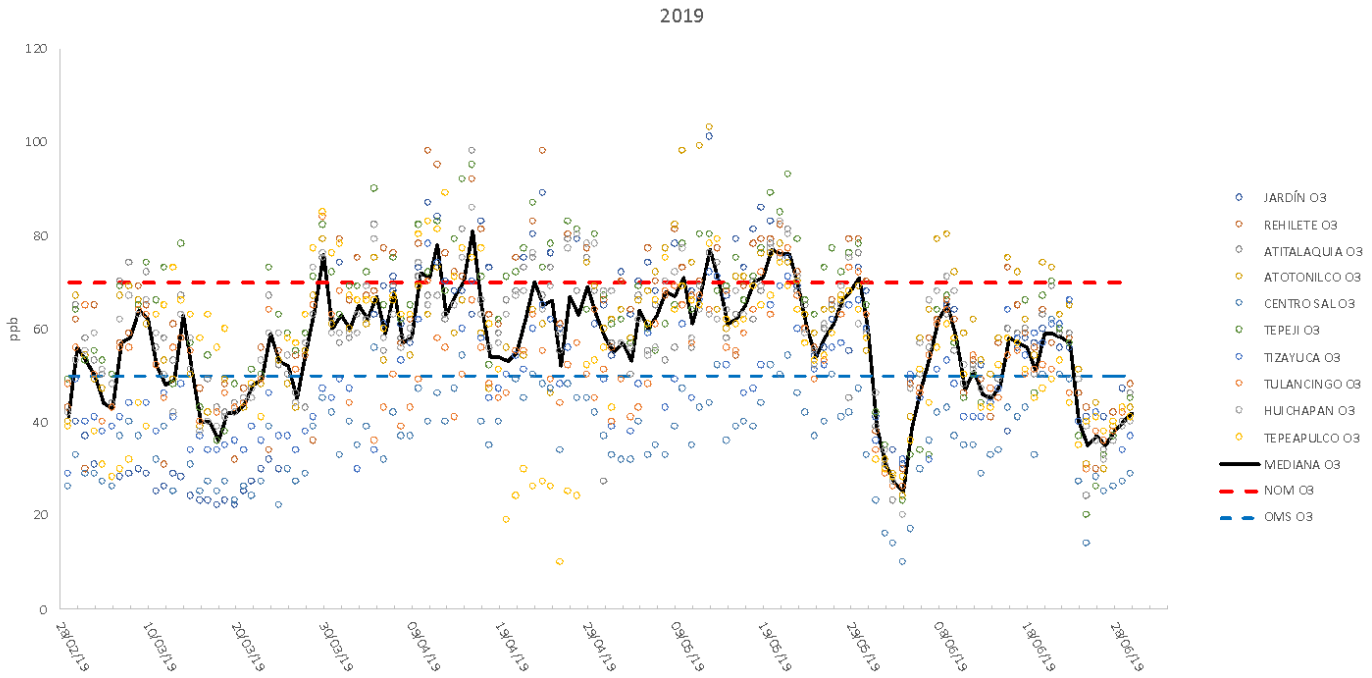
ANEXO 1

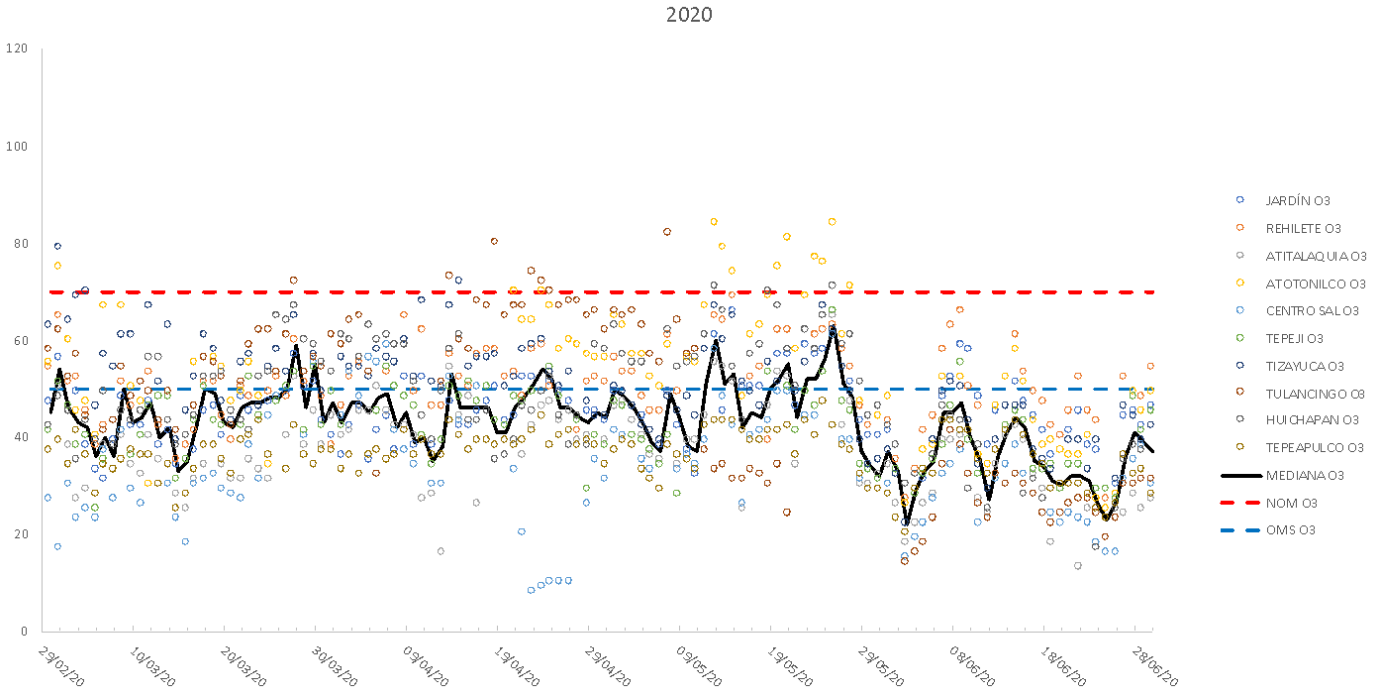
Concentraciones de Ozono, PM10 y PM2.5 por estación de la Cuenca atmosférica de Tula y Pachuca

Tendencia de las concentraciones de los valores máximos del promedio móvil de 8 horas de ozono en el **Estado de Hidalgo** en el periodo marzo a junio de 2017 al 2020

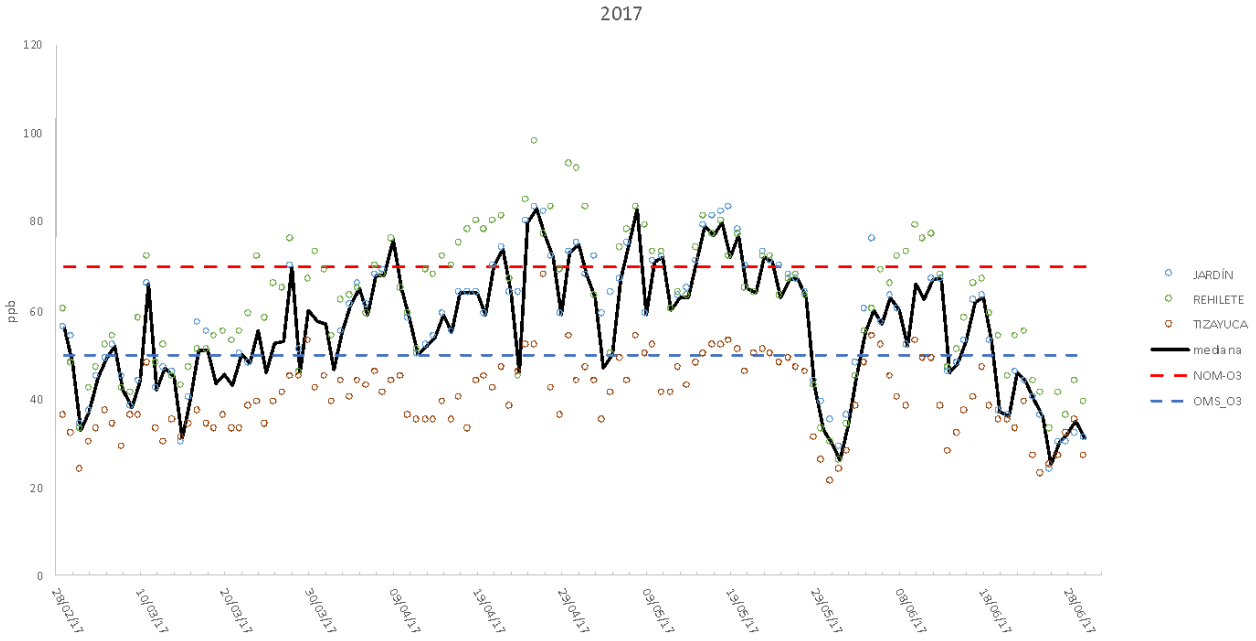


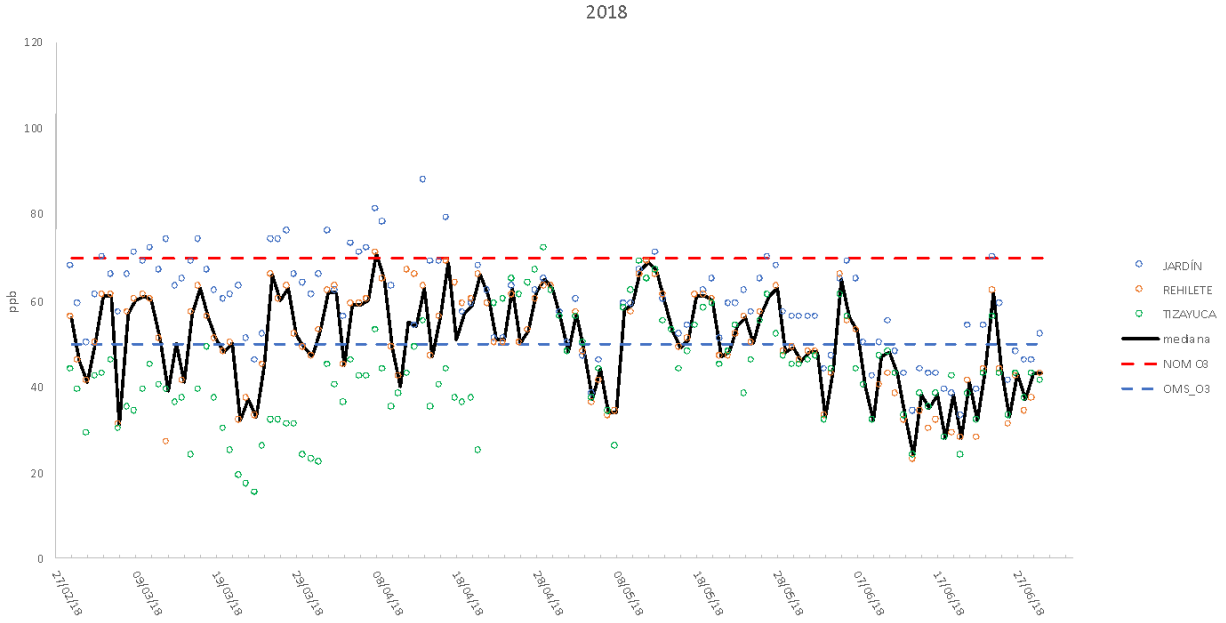


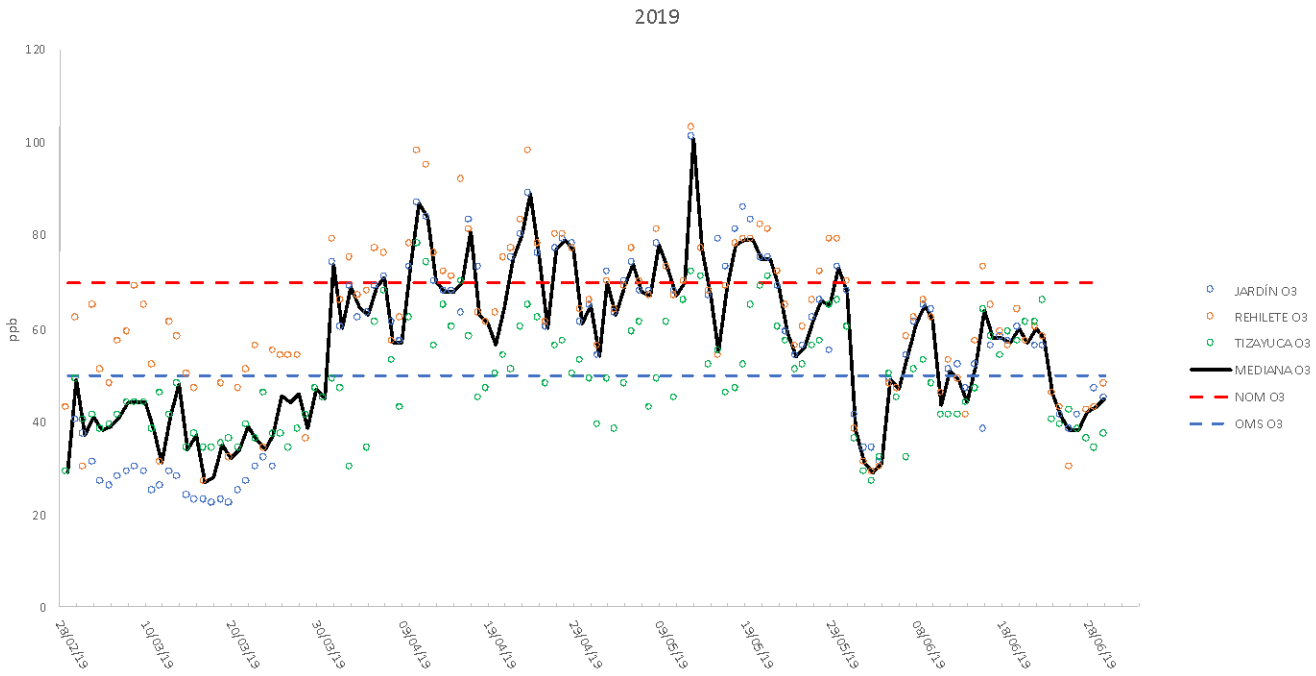

2019
ppb
120
100
80
60
40
20
0
28/02/19
10/03/19
20/03/19
30/03/19
09/04/19
19/04/19
29/04/19
09/05/19
19/05/19
29/05/19
08/06/19
18/06/19
28/06/19
JARDÍN O3
REHILETE O3
ATITALAQUIA O3
ATOTONILCO O3
CENTRO SAL O3
TEPEJI O3
TIZAYUCA O3
TULANCINGO O3
HUICHAPAN O3
TEPEAPULCO O3
MEDIANA O3
NOM O3
OMS O3

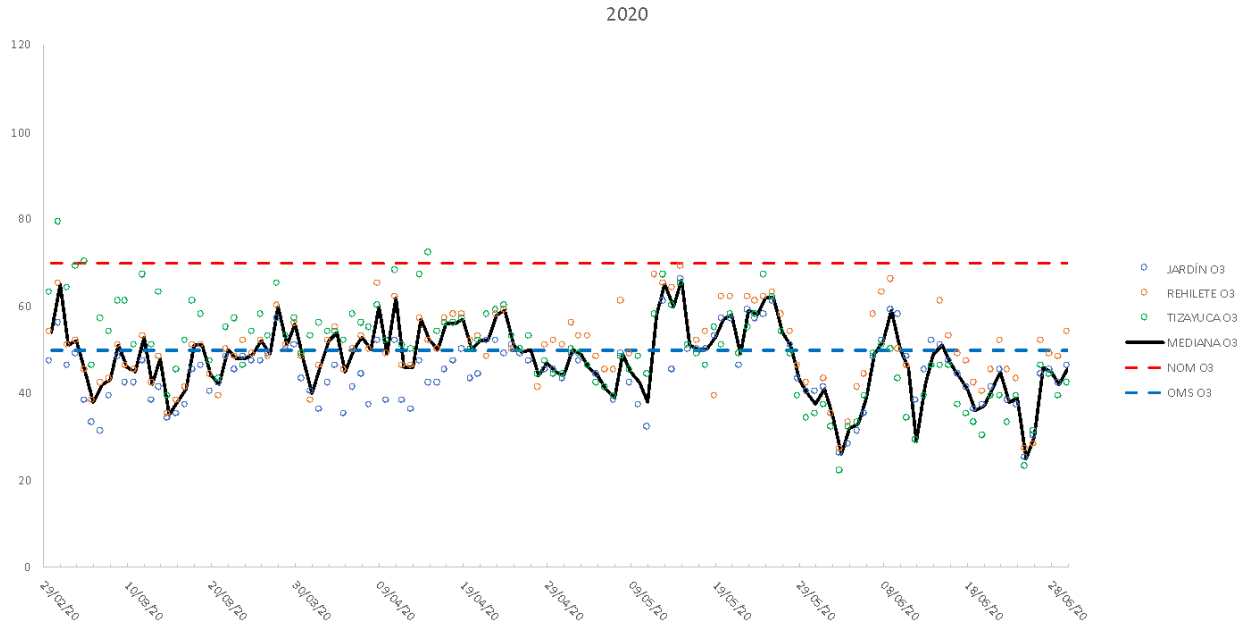

2020
120
100
80
60
40
20
0
28/02/20
10/03/20
20/03/20
30/03/20
09/04/20
19/04/20
29/04/20
09/05/20
19/05/20
29/05/20
08/06/20
18/06/20
28/06/20
JARDÍN O3
REHILETE O3
ATITALAQUIA O3
ATOTONILCO O3
CENTRO SAL O3
TEPEJI O3
TIZAYUCA O3
TULANCINGO O3
HUICHAPAN O3
TEPEAPULCO O3
MEDIANA O3
NOM O3
OMS O3

Tendencia de las concentraciones de los valores máximos del promedio móvil de 8 horas de ozono en la cuenca de **Pachuca** en el periodo marzo a junio de 2017 al 2020

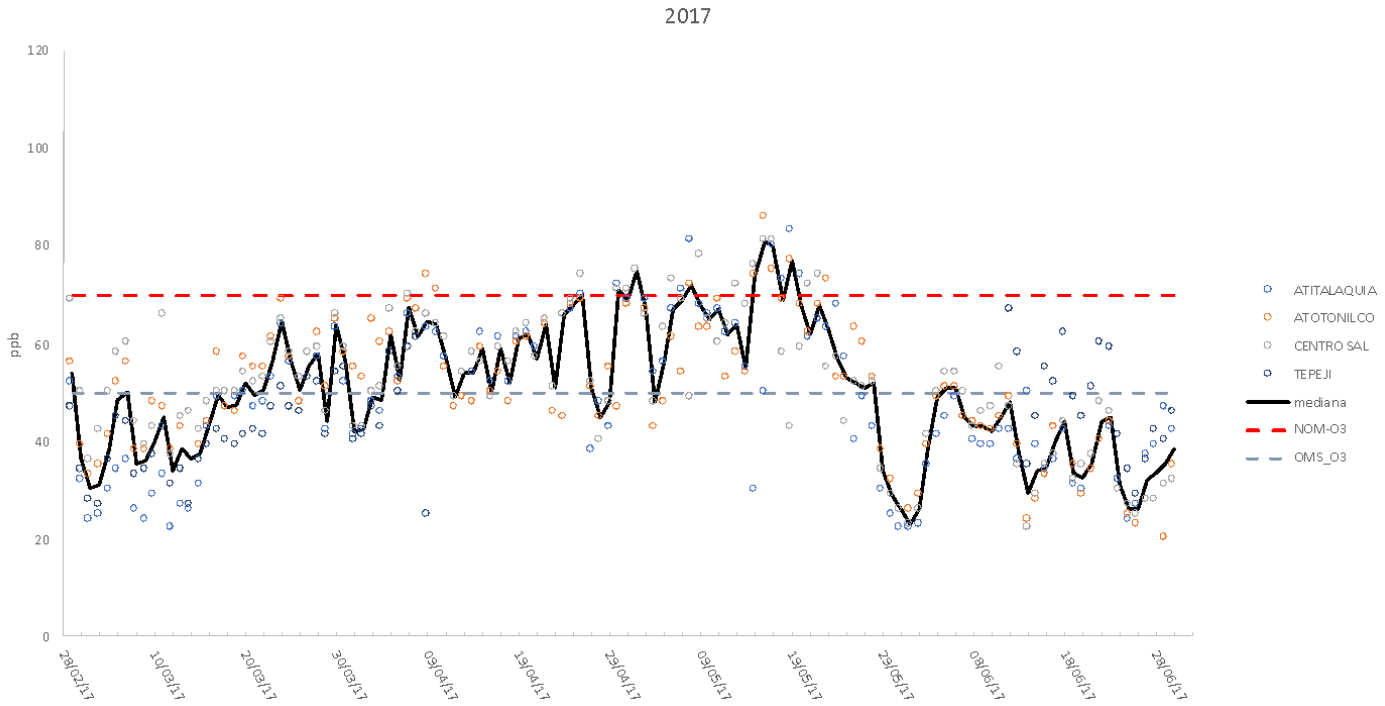


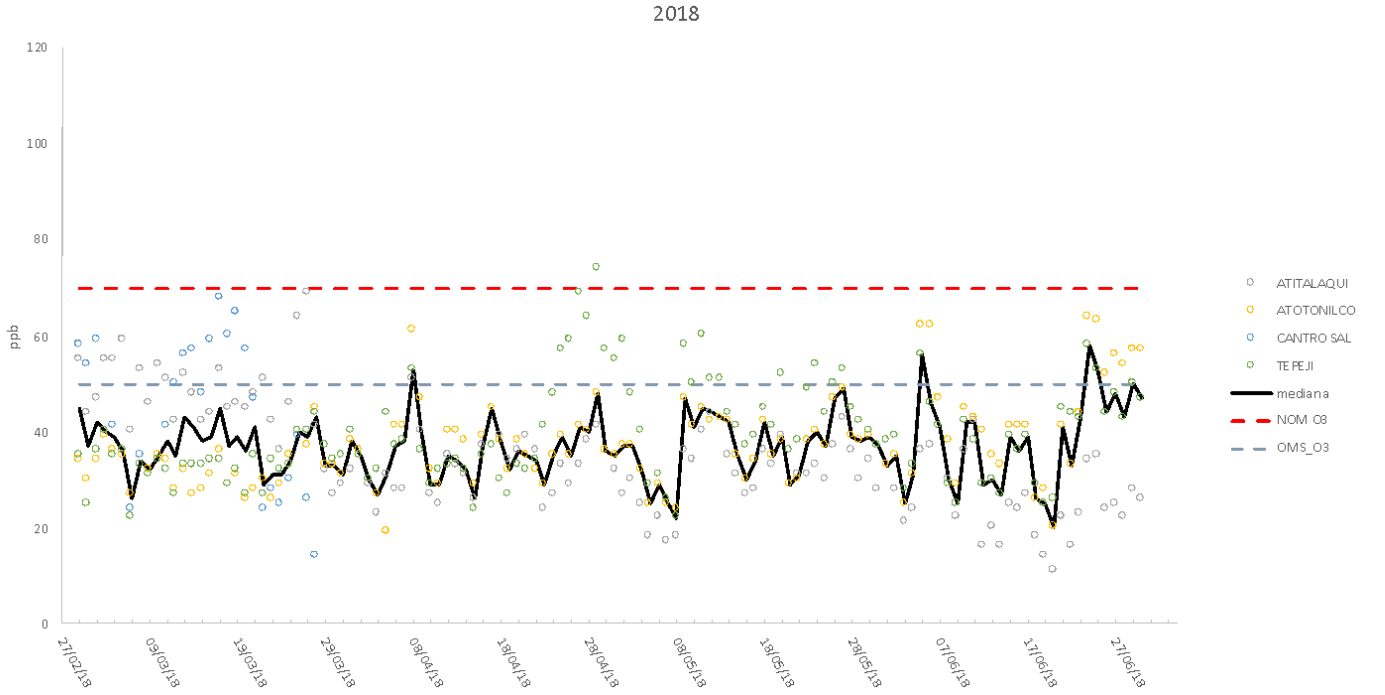


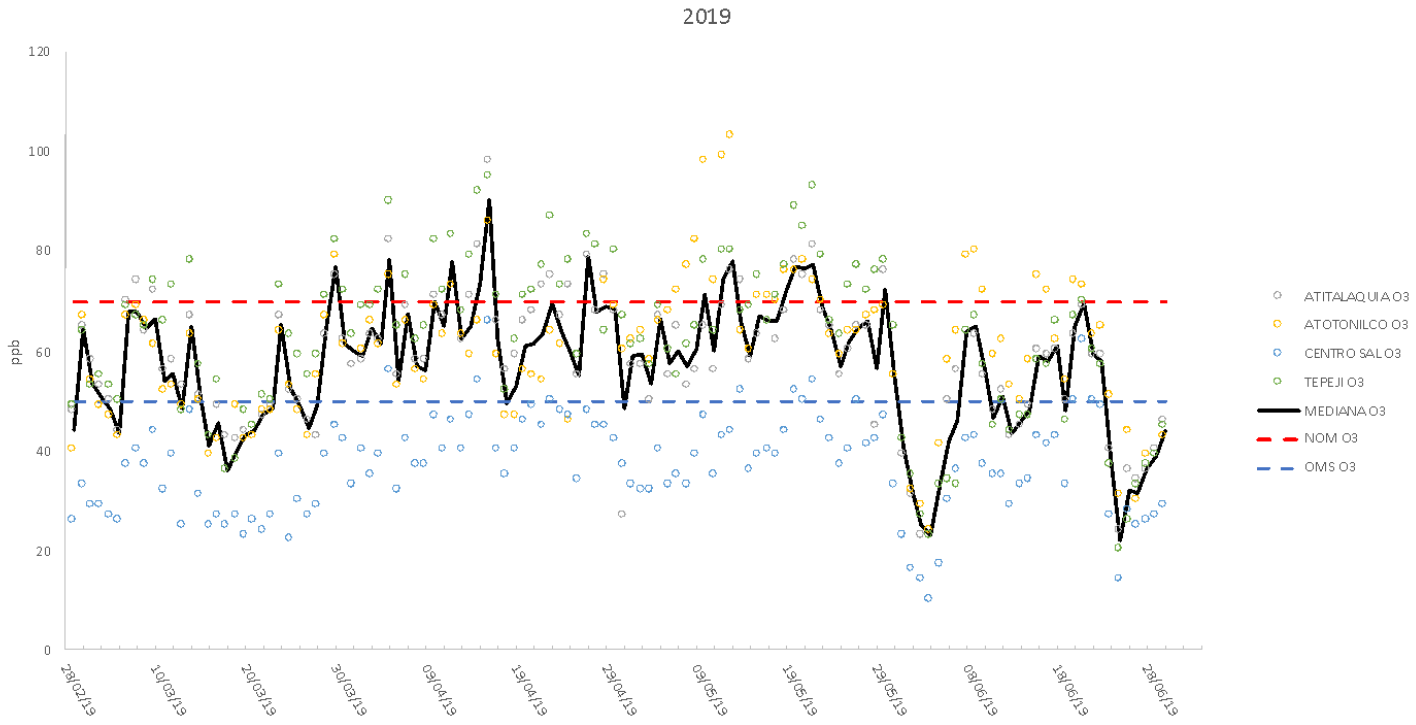

2019
ppb
120
100
80
60
40
20
0
28/02/19
10/03/19
20/03/19
30/03/19
09/04/19
19/04/19
29/04/19
09/05/19
19/05/19
29/05/19
08/06/19
18/06/19
28/06/19
JARDÍN O3
REHILETE O3
TIZAYUCA O3
MEDIANA O3
NOM O3
OMS O3

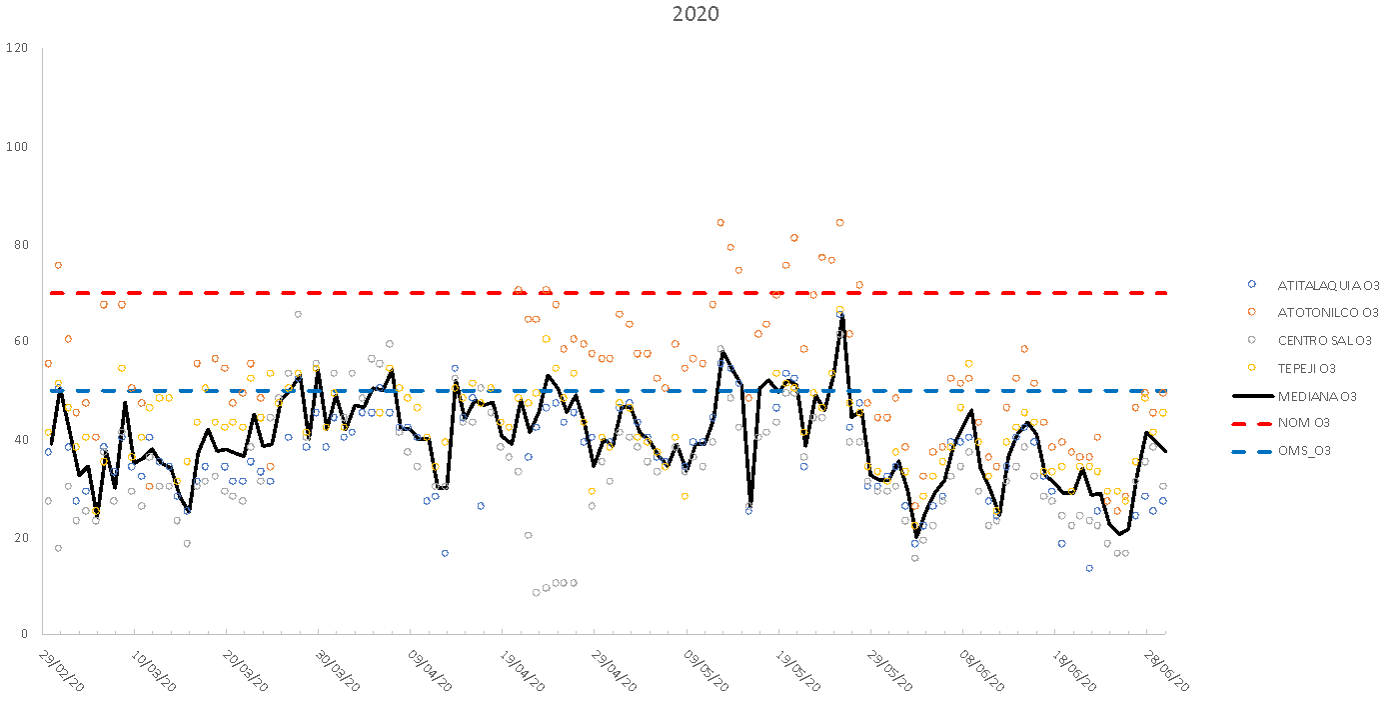

2020
120
100
80
60
40
20
0
29/02/20
10/03/20
20/03/20
30/03/20
09/04/20
19/04/20
29/04/20
09/05/20
19/05/20
29/05/20
08/06/20
18/06/20
28/06/20
JARDÍN O3
REHILETE O3
TIZAYUCA O3
MEDIANA O3
NOM O3
OMS O3

Tendencia de las concentraciones de los valores máximos del promedio móvil de 8 horas de ozono en la cuenca de **Tula** en el periodo marzo a junio de 2017 al 2020

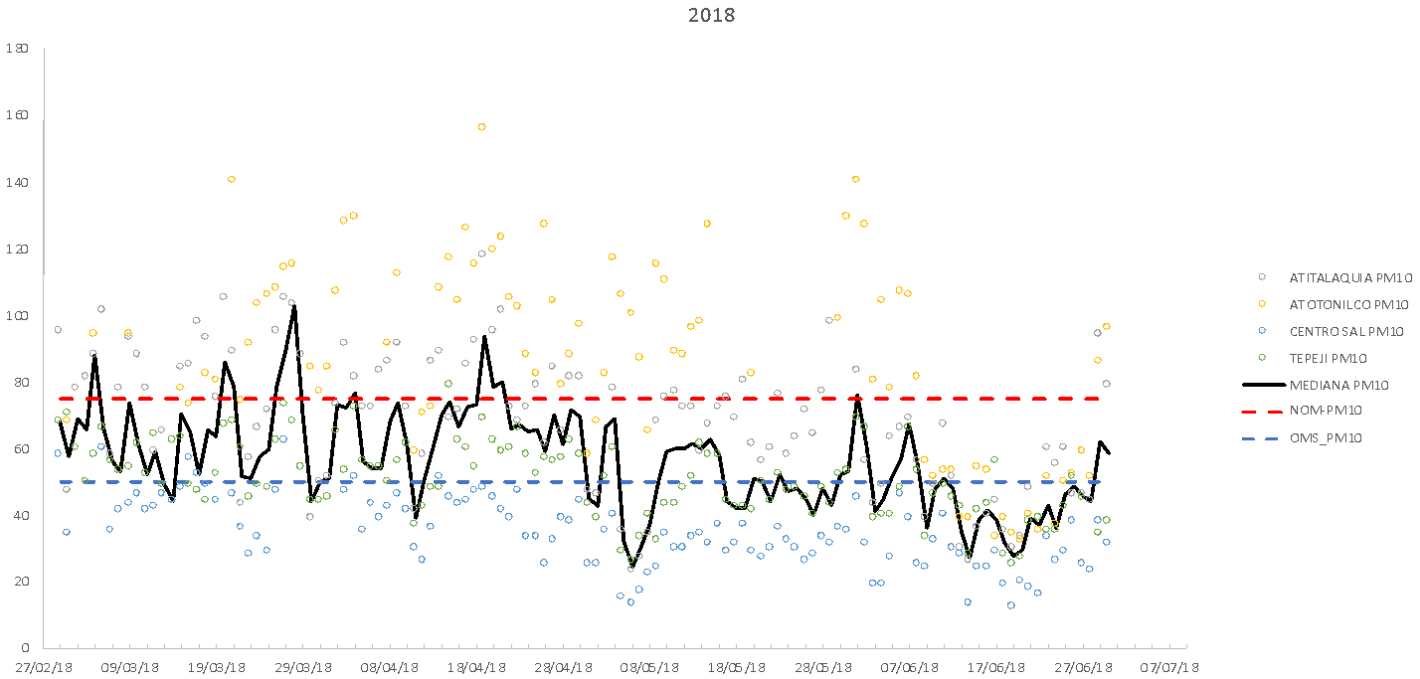


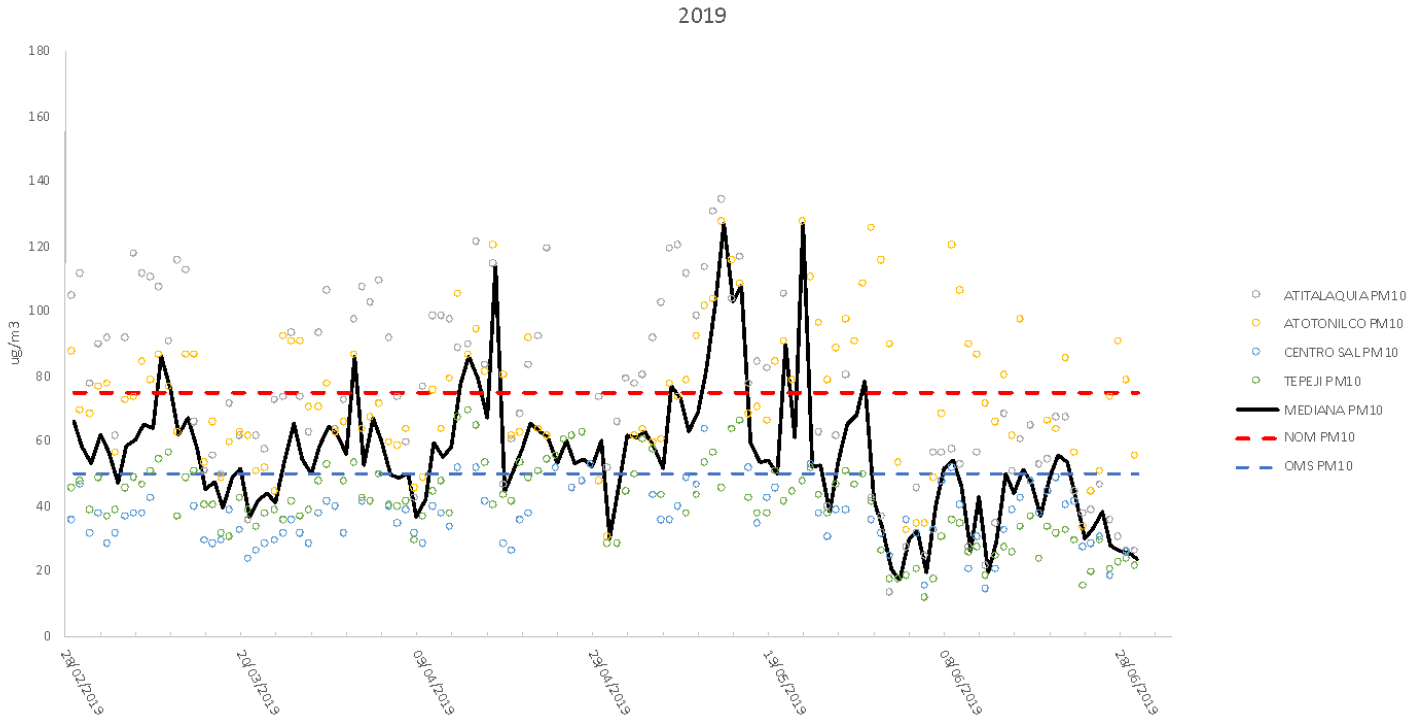


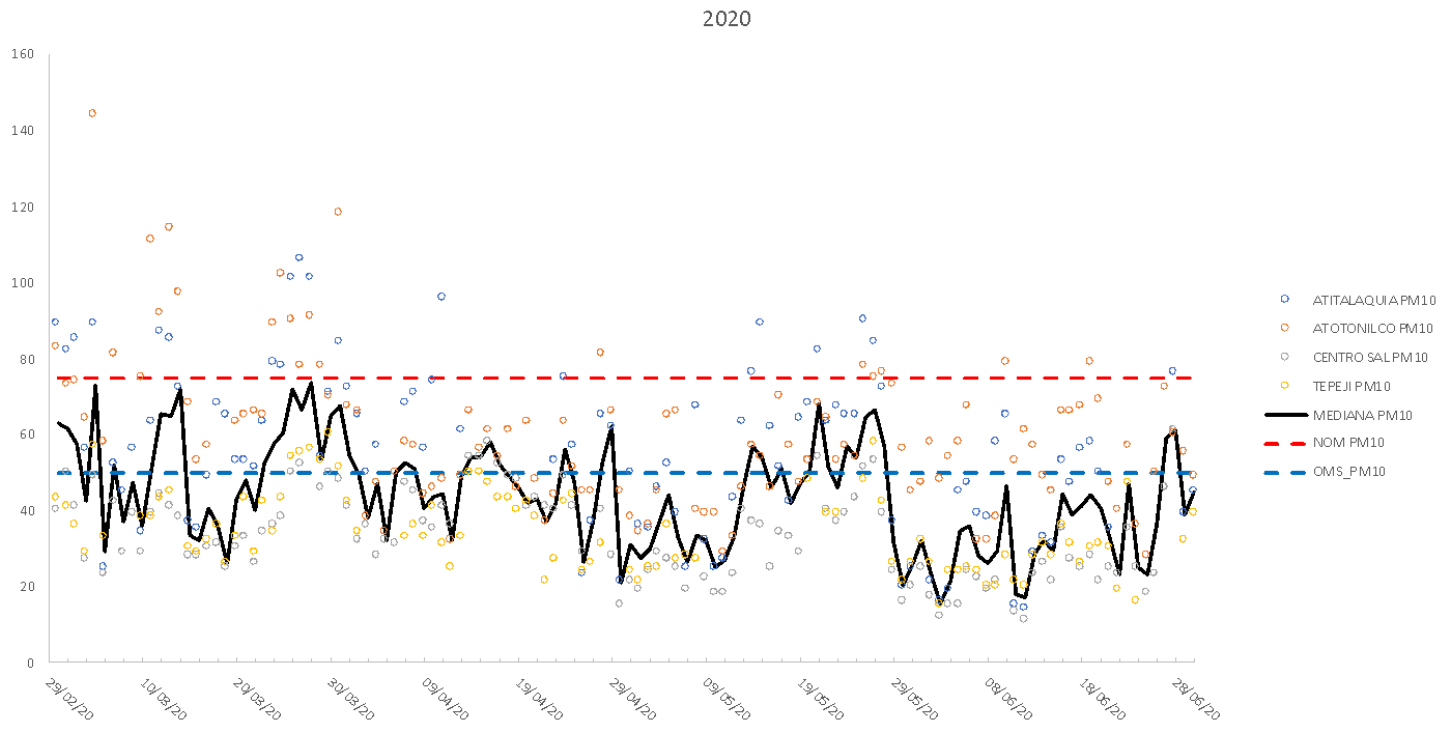

2019
ppb
120
100
80
60
40
20
0
28/02/19
10/03/19
20/03/19
30/03/19
09/04/19
19/04/19
29/04/19
09/05/19
19/05/19
29/05/19
08/06/19
18/06/19
28/06/19
ATITALAQUIA O3
ATOTONILCO O3
CENTRO SAL O3
TEPEJI O3
MEDIANA O3
NOM O3
OMS O3


2020
120
100
80
60
40
20
0
29/02/20
10/03/20
20/03/20
30/03/20
09/04/20
19/04/20
29/04/20
09/05/20
19/05/20
29/05/20
08/06/20
18/06/20
28/06/20
ATITALAQUIA O3
ATOTONILCO O3
CENTRO SAL O3
TEPEJI O3
MEDIANA O3
NOM O3
OMS_O3

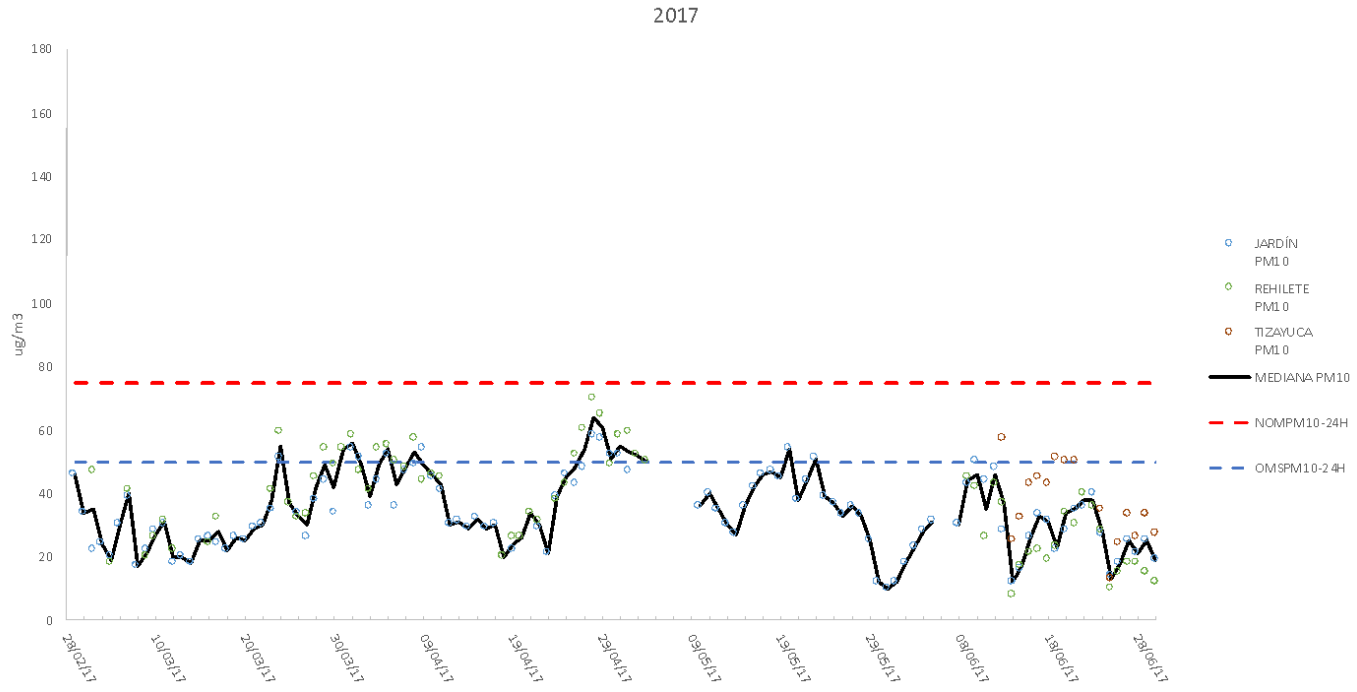
Tendencia de los máximos de los promedios de 24 horas de PM10 en la cuenca de **Tula** en el periodo marzo a junio de 2017 al 2020

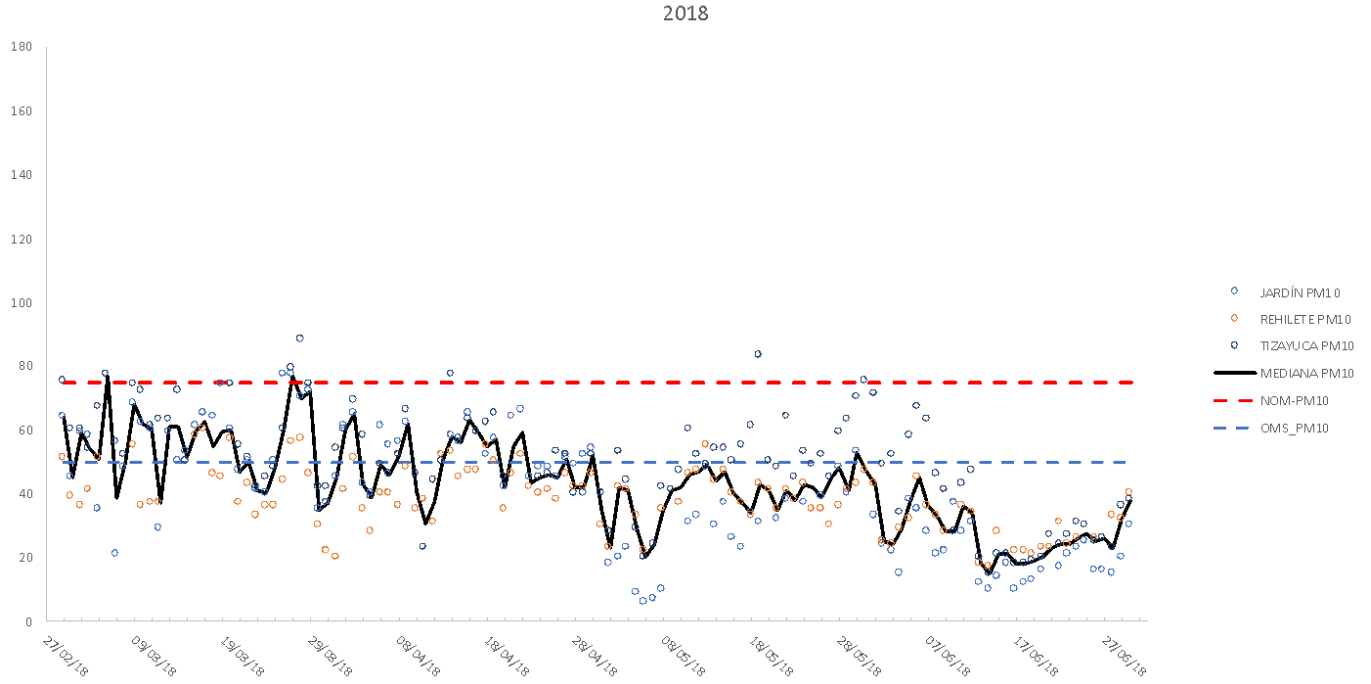


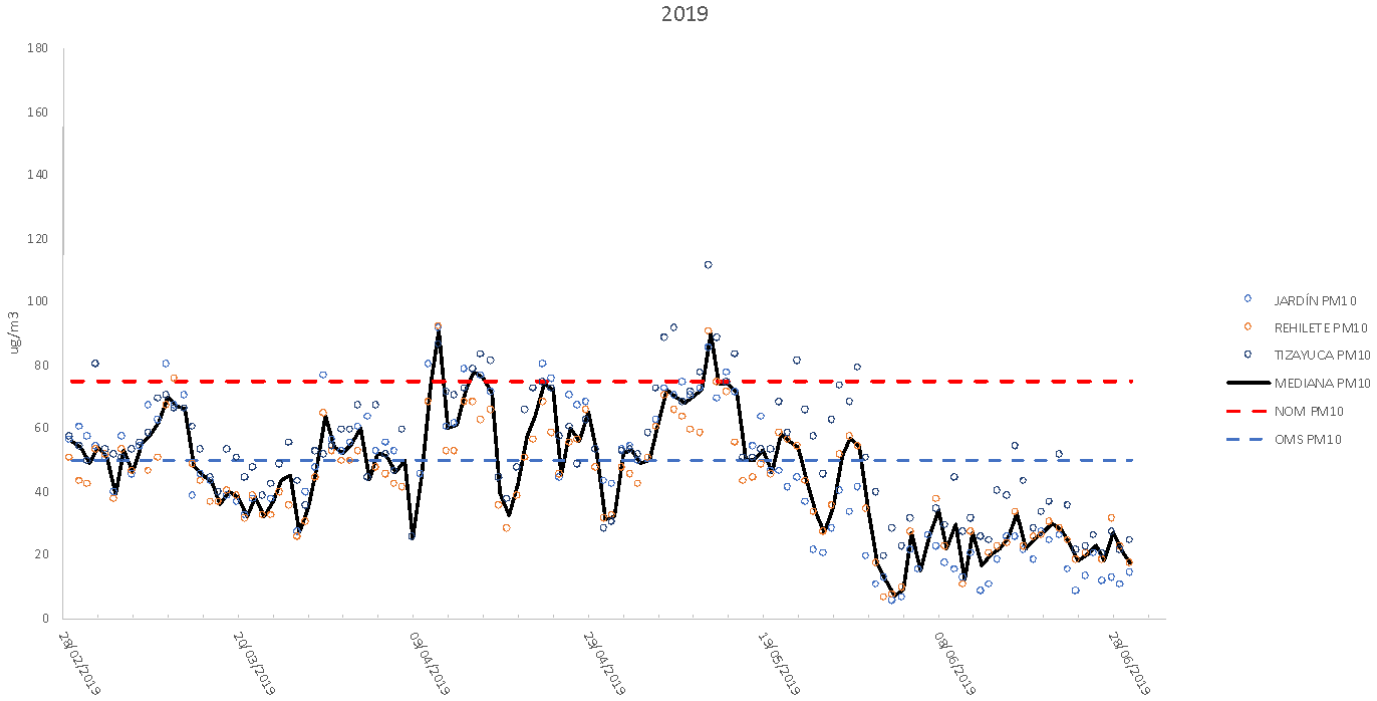


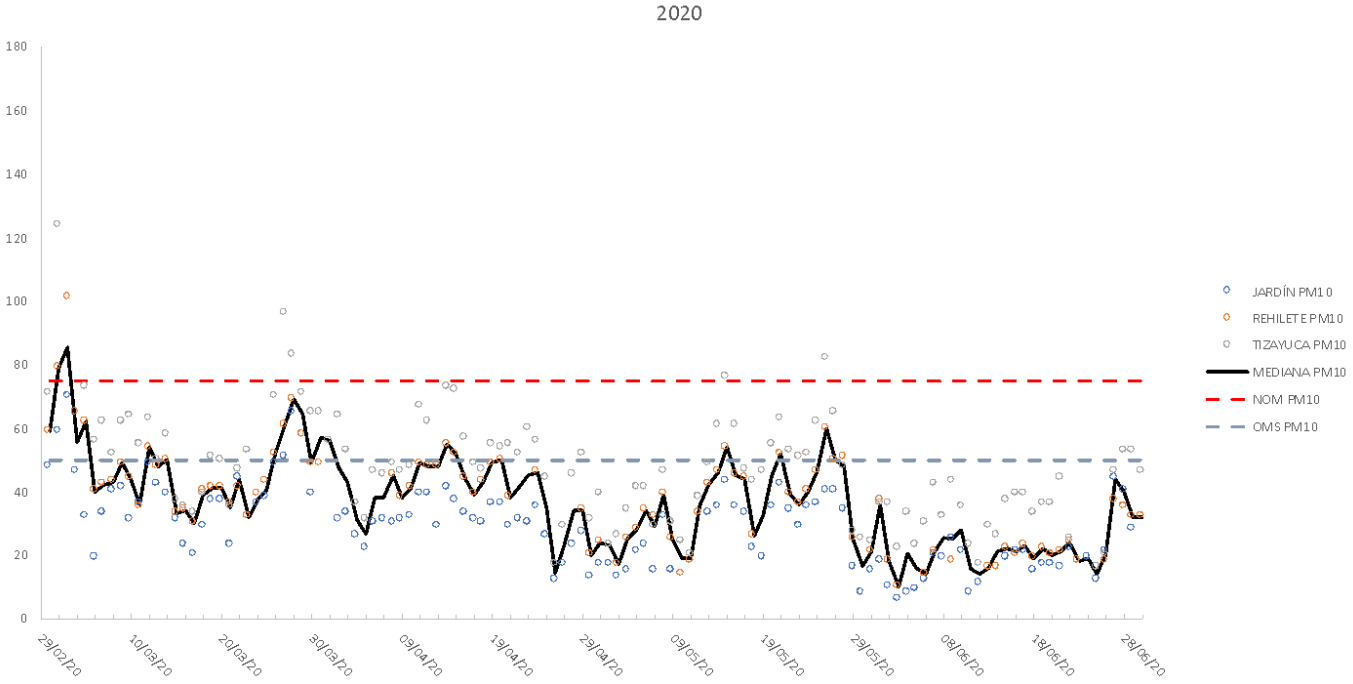

2020
160
140
120
100
80
60
40
20
0
29/02/20
10/03/20
20/03/20
30/03/20
09/04/20
19/04/20
29/04/20
09/05/20
19/05/20
29/05/20
08/06/20
18/06/20
28/06/20
ATITALAQUIA PM10
ATOTONILCO PM10
CENTRO SAL PM10
TEPEJI PM10
MEDIANA PM10
NOM PM10
OMS_PM10

Tendencia de los máximos de los promedios de 24 horas de PM10 en la cuenca de Pachuca en el periodo marzo a junio de 2017 al 2020






2019
ug/m3
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
20/02/2019
20/03/2019
09/04/2019
29/04/2019
19/05/2019
08/06/2019
28/06/2019
JARDÍN PM10
REHILETE PM10
TIZAYUCA PM10
MEDIANA PM10
NOM PM10
OMS PM10


2020
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
29/02/20
10/03/20
20/03/20
30/03/20
09/04/20
19/04/20
29/04/20
09/05/20
19/05/20
29/05/20
08/06/20
18/06/20
28/06/20
JARDÍN PM10
REHILETE PM10
TIZAYUCA PM10
MEDIANA PM10
NOM PM10
OMS PM10

ANEXO 2

Rosas de Viento por estación de la Cuenca atmosférica de Tula y Pachuca

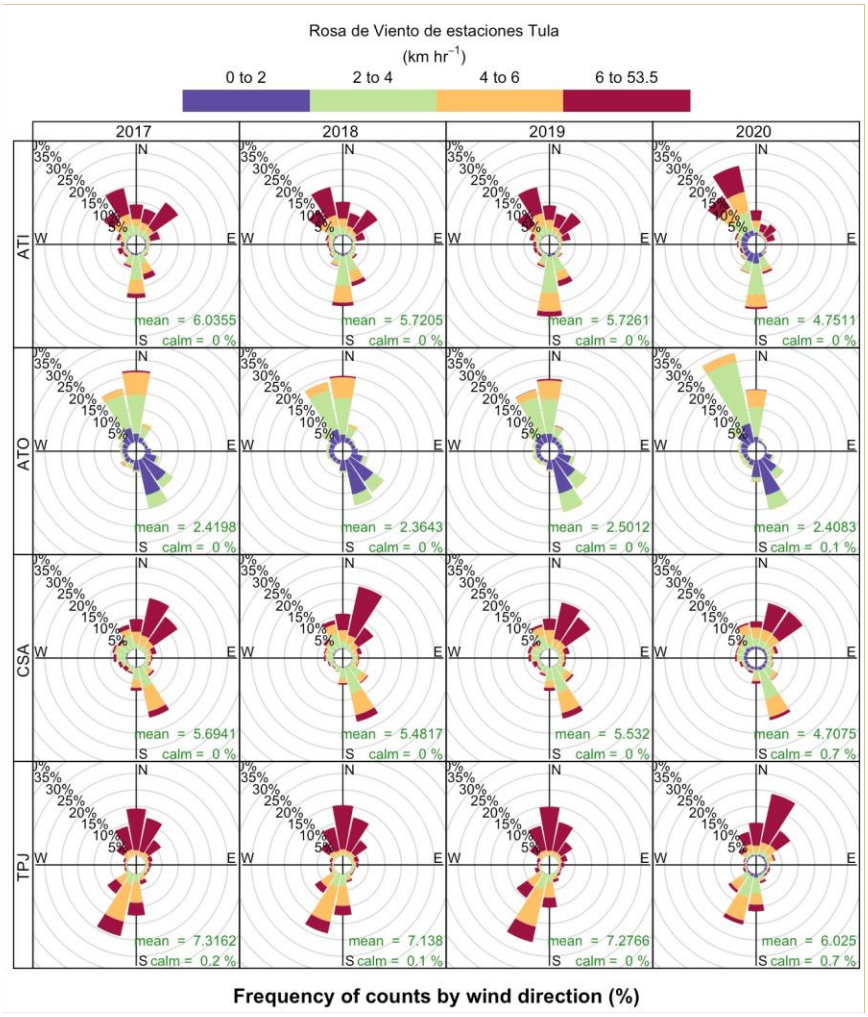


Figura 1 Rosas de viento para las estaciones de Atitalaquia (ATI), Atotonilco (ATO), Centro de Salud (CSA) y Tepeji (TPJ) para los años 2017, 2018, 2019 y 2020.

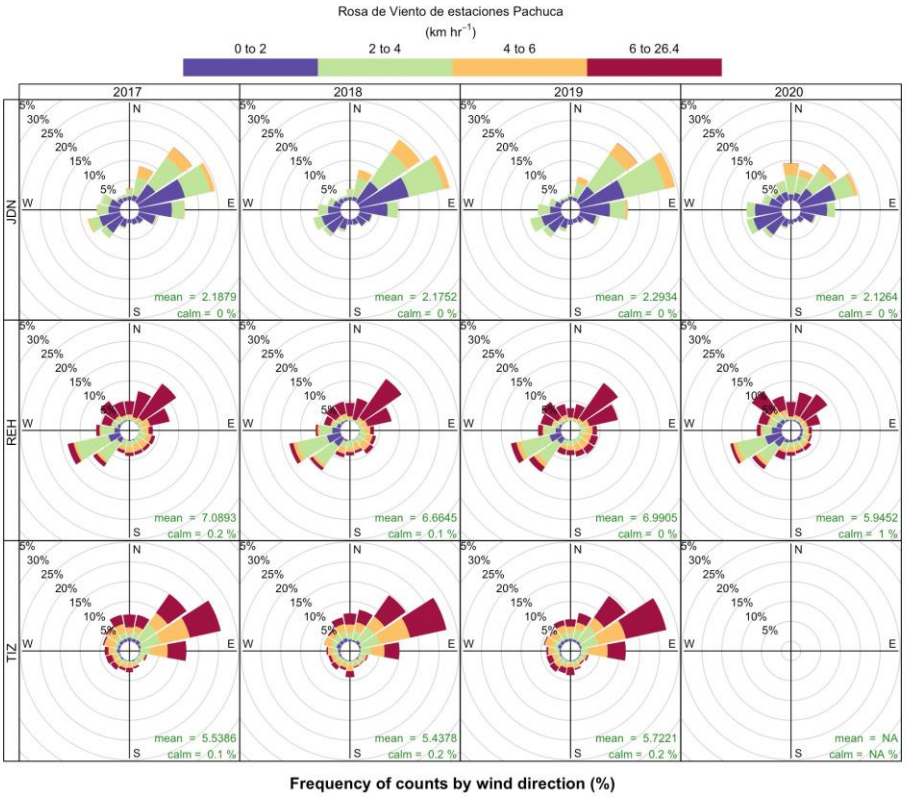


Figura 2 Rosas de viento para las estaciones de Jardín (JDN), Rehilete (REH) y Tizayuca (TIZ) para los años 2017, 2018, 2019 y 2020

MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

INECC

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO