



ESTUDIO DE IMPACTO DEL PROGRAMA DE SUSTITUCIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO POR VEHÍCULOS DE BAJAS

Contrato: NADBC-20-061

El presente trabajo, desarrollado por la empresa consultora CINPRO, bajo el contrato NADBC20061 para el Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN), forma parte de los insumos de la evaluación de impacto del Programa de Adquisición de Autobuses de Bajas Emisiones en la Región Fronteriza del Norte de México (2021). Para más información, consultar:

https://www.nadb.org/uploads/files/evaluacin_de_impacto_ia_transporte_pblico_julio_2021_final.pdf.

CONSULTORÍA EN INGENIERÍA DE PROYECTOS S DE RL

CINPRO

Campeños 296 Col. Minerva, Alcaldía Iztapalapa. Ciudad de México

Contenido

Acrónimos	6
Resumen Ejecutivo	8
1. Introducción	15
2. Antecedentes	17
3. Definiciones conceptuales	18
3.1. Conceptualización de monitoreo de exposición personal	18
3.2. Experiencias nacionales e internacionales del monitoreo de exposición personal	18
3.3. Sistemas de monitoreo de calidad del aire (SMCA)	22
3.4. Mediciones satelitales de parámetros de calidad el aire (NASA-Giovanni)	23
3.5. Servicio Meteorológico Nacional (SMN)	24
3.6. Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiente (NOM-SSA1)	25
3.7. Índice de Calidad del Aire y Salud	26
3.8. Tecnología vehicular y emisiones vehiculares (Inventario de Emisiones)	27
4. Monitoreo a exposición de contaminantes en Cd. Juárez, Chihuahua	28
4.1. Metodología	28
4.1.1. Diseño de la campaña de monitoreo	28
4.1.2. Sitios de muestreo	34
4.1.3. Descripción del equipo de monitoreo	36
4.2. Resultados de la campaña	37
4.2.1. Partículas PM _{2.5} y PM ₁₀	37
4.2.2. Gases CO, CO ₂ y HCHO	39
4.2.3. Condiciones climáticas	41
4.3. Discusión de resultados y conclusiones del capítulo	42
5. Comportamiento y tendencia del monitoreo de la calidad del aire	44
5.1. Metodología	44
5.1.1. Manejo de datos de calidad del aire y meteorología	44
5.1.2. Indicadores del comportamiento temporal y tendencia	44
5.2. Resultados del comportamiento y tendencias del monitoreo de la calidad del aire	45
5.2.1. Comportamiento temporal y tendencia de la calidad del aire	45
5.2.2. Tendencia de mediciones satelitales	50
5.2.3. Comportamiento temporal y tendencia de variables meteorológicas	53
5.2.4. Indicadores de calidad del aire	62

5.2.5.	Evaluación del cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiente	62
5.2.6.	Estado de la calidad del aire (Índice de Calidad del Aire y Salud)	64
5.2.7.	Análisis comparativo entre las 4 ciudades del programa del BDAN	68
5.3.	Discusión de resultados y conclusiones del capítulo	71
6.	Línea base de inventarios de Emisiones antes de la intervención	72
6.1.	Metodología Inventario de emisiones	72
6.1.1.	Crecimiento del transporte público en México y en la frontera norte del país	73
6.1.2.	Herramienta de inventario de emisiones para fuentes móviles	75
6.2.	Resultados de la línea base de inventarios de Emisiones	75
6.2.1.	Crecimiento del padrón vehicular de autobuses	75
6.2.2.	Edad vehicular del padrón de autobuses en el periodo de tiempo 2008- 2019 de las 4 ciudades del PROGRAMA del BDAN.....	76
6.2.3.	Comparación de la contribución nacional por contaminante en el periodo 2008- 2013	80
6.2.4.	Comparación de la contribución porcentual por fuentes móviles de 2008- 2016 ...	81
6.2.5.	Comparación de la contribución porcentual local de fuentes móviles.....	81
6.3.	Discusión de resultados y conclusiones del capítulo.	82
7.	Modelación con MOVES	83
7.1.	Antecedentes	83
7.2.	Metodología	83
7.2.1.	Modelo de emisiones MOVES	83
7.2.2.	Calibración del modelo MOVES para autobuses.....	84
7.3.	Resultados de la modelación con MOVES y la comparación entre las 4 ciudades del PROGRAMA del BDAN.....	85
7.3.1.	Comportamiento en el tiempo de los estratos tecnológicos y comparación entre las 4 ciudades del PROGRAMA del BDAN.....	85
7.3.2.	Reducción de emisiones y comparación entre las 4 ciudades del PROGRAMA del BDAN para PM _{2.5} , NO _x y CO mediante el uso del modelo MOVES.....	87
7.4.	Discusión de resultados y conclusiones del capítulo	92
8.	Conclusiones y hallazgos finales del estudio	93
9.	Referencia.....	95
10.	Anexos.....	99

Contenido de Figuras

Figura 0-1: Resultados de las concentraciones promedio durante la campaña de Cd. Juárez, Chih comparado con las guías de calidad del aire en interiores (microambientes) aplicables.	9
Figura 2-1: Línea de tiempo del Programa de Sustitución de Transporte Público por Vehículos de Bajas Emisiones en la Zona Norte de México del BDAN	17
Figura 3-1: Estudios de exposición personal en medios de transporte realizados en México	20
Figura 3-2: Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire en estados del norte del país.....	22
Figura 3-3: Satélites de la NASA	23
Figura 3-4: Mapa del área seleccionada en cada ciudad para los datos satelitales (NASA Giovanni)	24
Figura 3-5: Normas Oficiales Mexicanas, Salud Ambiente (2020)	25
Figura 3-6: índice de Calidad del Aire y Salud (2019).....	26
Figura 3-7: Distribución de fechas en el mosaico de calidad del aire y salud (enero-febrero, 2010)27	
Figura 4-1: Normales climatológicas en Ciudad Juárez, Chihuahua.....	29
Figura 4-2: Medias de 2010 a 2019 en Ciudad Juárez, Chihuahua.	30
Figura 4-3: Descripción de los tipos de paradas y rutas analizadas.....	31
Figura 4-4: Parámetros para un día hábil en la situación base (2018).....	31
Figura 4-5: Matriz de dispersión	33
Figura 4-6: Ejemplo de resultados del análisis de clúster	33
Figura 4-7: Comparación de equipos	34
Figura 4-8. Ejemplo de usuarios y transeúntes	34
Figura 4-9: Rol de muestras obtenidas por día.	35
Figura 4-10: Recorridos y paradas.....	35
Figura 4-11: Rutas de muestreo	36
Figura 4-12: Estadística descriptiva de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en $\mu g/m^3$, medidas en los distintos microambientes	37
Figura 4-13: Concentraciones de $PM_{2.5}$ en $\mu g/m^3$ determinada en los distintos microambientes....	37
Figura 4-14: Mapeo de los recorridos de las rutas de las concentraciones de $PM_{2.5}$	38
Figura 4-15: Concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ medidas en la estación UACJ en $\mu g/m^3$	38
Figura 4-16: Estadística descriptiva de las concentraciones de CO_2 (ppm) y HCHO (mg/m^3), medidas en los distintos microambientes	39
Figura 4-17: Concentraciones de CO_2 en ppm determinada en los distintos microambientes	40
Figura 4-18: Concentraciones promedio de partículas CO_2 en ppm.....	40
Figura 4-19: Concentraciones ambientales de CO medidas en la estación UACJ en ppm.....	41
Figura 4-20: Condiciones climáticas durante la campaña en Cd. Juárez.....	41
Figura 4-20: Concentración promedio medidos en los diferentes durante la campaña en Cd. Juárez comparado con las guías de calidad del aire en interiores (microambientes) aplicables	43
Figura 5-1: Comportamiento de CO por ciudad (2010-2019)	46
Figura 5-2: Comportamiento de NO_2 por ciudad (2010-2019)	47
Figura 5-3: Comportamiento de $PM_{2.5}$ por ciudad (2010-2019)	48
Figura 5-4: Comportamiento de PM_{10} por ciudad (2010-2019).....	49
Figura 5-5: Comportamiento de PM_{10} muestreos por ciudad (2010-2019).....	49
Figura 5-6: Serie mensual de CO, datos satelitales por ciudad (2010-2019)	50

Figura 5-7: Serie mensual de NO ₂ , datos satelitales por ciudad (2010-2019)	51
Figura 5-8: Serie mensual de PM _{2.5} , datos satelitales por ciudad (2010-2019)	51
Figura 5-9: Evaluación de tendencia (Mann Kendall test) y pendiente (Sen test) para datos satelitales por ciudad y contaminante (2010-2019)	52
Figura 5-10: Comportamiento de velocidad del viento por ciudad (2013-2019)	53
Figura 5-11: Comportamiento de la temperatura ambiente por ciudad (2013-2019)	54
Figura 5-12: Comportamiento de la humedad relativa por ciudad (2013-2019).....	55
Figura 5-13: Comportamiento de la precipitación pluvial por ciudad (2013-2019).....	56
Figura 5-14: Comportamiento de la radiación solar por ciudad (2013-2019)	57
Figura 5-15: Evaluación de tendencia (Mann Kendall test) y pendiente (Sen test) para meteorología en Cd. Juárez (2013-2019).....	58
Figura 5-16: Evaluación de tendencia (Mann Kendall test) y pendiente (Sen test) para meteorología en Hermosillo (2013-2019)	59
Figura 5-17: Evaluación de tendencia (Mann Kendall test) y pendiente (Sen test) para meteorología en la ZMM (2013-2019).....	60
Figura 5-18: Evaluación de tendencia (Mann Kendall test) y pendiente (Sen test) para meteorología en Tijuana (2013-2019)	61
Figura 5-19: Indicadores de las NOM mexicanas de Salud Ambiente por ciudad (2010-2019).....	63
Figura 5-20: Mensajes asociados a las categorías de calidad del aire y riesgos a la salud (2019)	64
Figura 5-21: Mosaico de calidad del aire por PM _{2.5} en Tijuana (2015-2019)	65
Figura 5-22: Mosaico de calidad del aire por PM _{2.5} en Cd. Juárez (2014-2018).....	66
Figura 5-23: Mosaico de calidad del aire por PM _{2.5} en la ZMM (2010-2018).....	67
Figura 5-24: Comparativo de promedios de contaminantes entre los periodos 2010-2013 y 2014-2019.....	68
Figura 5-25: Comparativo del porcentaje de días por nivel de riesgo de PM _{2.5} (2010-2018).....	70
Figura 5-26: Comparativo del porcentaje de días por nivel de riesgo de PM ₁₀ (2010-2018).....	70
Figura 5-27: Comparativo del porcentaje de días por nivel de riesgo de PM ₁₀ en Cd. Juárez con equipo automático y manual (2014 y 2016)	71
Figura 6-1: Tasa de crecimiento anual en base a 2010 del transporte público urbano en los estados de la frontera norte de México y a nivel nacional de 2011 a 2019.....	74
Figura 6-2: Tasa de crecimiento anual basado en 2008 para los periodos 2008 a 2013, 2013 a 2016 y 20016 a 2018 de los autobuses de transporte urbanos para Cd. Juárez, Hermosillo, Tijuana y ZMM	76
Figura 6-3: Antigüedad vehicular promedio de autobuses de transporte público urbano en Cd. Juárez, Tijuana, Hermosillo y ZMM 2008 a 2019	77
Figura 6-4: Estratos tecnológicos por año modelo de autobuses en México	77
Figura 6-5: Estándares de Emisión EPA para Autobuses Urbanos y Camiones y tractocamiones	78
Figura 6-6: Comportamiento por estrato tecnológico de autobuses en Ciudad Juárez, Hermosillo, Tijuana y ZMM de 2008 a 2018	79
Figura 6-7: Porcentaje de contribución de la emisión a nivel nacional de los estados de Baja California, Chihuahua, Nuevo León y Sonora de PM _{2.5} , NO _x y COV en los años 2008, 2013 y 2016	80
Figura 6-8: Porcentaje de contribución de la emisión por fuentes móviles a nivel nacional de los estados de Baja California, Chihuahua, Nuevo León y Sonora de PM _{2.5} , NO _x y COV en los años 2008, 2013 y 2016	81

Figura 6-9: Porcentaje de contribución de la emisión por fuentes móviles a nivel nacional de Tijuana, Ciudad Juárez, ZMM y Hermosillo de PM _{2.5} , NO _x y COV en los años 2008, 2013 y 2016....	82
Figura 7-1: Edad vehicular (fracciones) “antigüedad”	84
Figura 7-2: Número de autobuses Sustituídos o ampliados en el PROGRAMA del BDAN en Ciudad Juárez, Hermosillo, Tijuana y ZMM	85
Figura 7-3: Equivalencias de Estrato Tecnológico de EPA y EURO y la normatividad Nacional	85
Figura 7-4: Evolución del padrón vehicular de autobuses de transporte público en Ciudad Juárez	86
Figura 7-5: Comparación porcentual por estrato tecnológico del padrón de autobuses de transporte en Cd. Juárez, Hermosillo, Tijuana y ZMM en 2018	86
Figura 7-6: Emisiones con y sin renovar a Diésel en el PROGRAMA para Tijuana de CO, COV, PM _{2.5} y NO _x . Por año.....	87
Figura 7-7: Emisiones de escape de autobuses de transporte público, EMBARQ	89
Figura 7-8: Reducción de emisiones en las cuatro ciudades.....	91
Figura 7-9: Reducción total de emisiones por contaminante para las 4 ciudades	92

Acrónimos

app - application (aplicación informática para dispositivos móviles y tabletas)
BDAN - Banco de Desarrollo de América del Norte
BTEX - Benceno, Tolueno, Etileno, Xileno
CCA-UNAM - Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM
CCT - Consejo Ciudadano del Transporte Público Sustentable del Estado de Sonora
CENICA - Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental
CINPRO - Consultoría en Ingeniería de Proyectos S de RL
CH₄ - Metano
CO - Monóxido de Carbono
CO₂ - Dióxido de carbono
COV's - Compuestos Orgánicos Volátiles
DOF - Diario Oficial de la Federación
EL PROGRAMA - Programa de Sustitución de Transporte Público por Vehículos de Bajas Emisiones en la Zona Norte de México del BDAN
EMA - Estaciones Meteorológicas Automáticas
EPA - Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
ESIME - Estaciones Sinópticas Meteorológicas
EX - Gas Aire
g/m³ (gm⁻³) - gramos por metro cúbico
GEI - Gases de Efecto Invernadero
GES DISC - Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center
Giovanni - Geospatial Interactive Online Visualization AND aNalysis Infrastructure
h - horas
HCHO - Formaldehido
ICAyS - Índice de Calidad del Aire y Salud
INECC - Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
IPK - índice de pasajeros por kilómetro
KBD - kilómetros por bus por día
km - kilómetro
Km² - kilómetros cuadrados
mg/m³ - miligramos por metro cúbico
µg/m³ (µgm⁻³) - microgramos por metro cúbico
NASA - National Aeronautics and Space Administration
NO₂ - Dióxido de nitrógeno
NOM - Norma Oficial Mexicana
NOM-SSA1 - Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiente
NO_x - Óxidos de nitrógeno
O₂ - Oxígeno
O₃ - Ozono
OMS - Organización Mundial de la Salud
p - promedio
PBD - pasajeros por bus por día
pm - promedio móvil
PM₁₀ - aerosoles de partículas (material particulado menor a 10 micrómetros)

PM_{2.5} - aerosoles de partículas (material particulado menor a 2.5 micrómetros)
pmp - promedio móvil ponderado
ppb - partes por billón
ppbv - partes por billón volumen
ppm - partes por millón
RPD - recorrido promedio diario
SEDUE - Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología del Estado de Chihuahua
SEMARNAT - Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEST - Secretaría de Economía Sustentable y Turismo del Estado de Baja California
SMCA - Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire
SMN - Servicio Meteorológico Nacional
SO₂ - Dióxido de azufre
TP - Transporte Público
TUC o UTC - Tiempo Universal Coordinado
UACJ - Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
UFP - Partículas ultrafinas
UNE - Transporte urbano del Estado de Sonora
ZMM - Zona Metropolitana de Monterrey

Resumen Ejecutivo

El presente estudio está enfocado a evaluar los impactos en la calidad del aire de antes y después de la implementación del Programa de Sustitución de Transporte Público por Vehículos de Bajas Emisiones en la Zona Norte de México; “EL PROGRAMA” se ha implementado desde 2014 hasta 2019 por el BDAN. EL PROGRAMA ha facilitado la adquisición de vehículos con tecnología de bajas emisiones para el transporte público (TP), dentro de los 300 km de la franja fronteriza de México. El BDAN ha entregado de 2014 a 2019 722 unidades en Hermosillo, Sonora; Tijuana, Baja California; Ciudad Juárez, Chihuahua; Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), Nuevo León.

Para evaluar el impacto se realizaron y analizaron 3 aspectos:

1. Monitoreo a exposición de contaminantes en Cd. Juárez, Chihuahua
2. Comportamiento y tendencia del monitoreo de la calidad del aire
3. Línea base de inventarios de Emisiones antes de la intervención

Monitoreo a exposición de contaminantes en Cd. Juárez Chihuahua.

Los resultados muestran que, durante los recorridos al interior del autobús en promedio durante el horario vespertino y matutino, las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂), se clasifican como moderadas de acuerdo a las guías de calidad del aire en interiores de la EPA¹ que indica que concentraciones arriba de 700 ppm se considera una exposición moderada y arriba de 1,500 ppm es insalubre. Los resultados fueron: Unidades nuevas (774 ppm), Unidades mixtas (797 ppm) y Unidades Antiguas (1,031 ppm). La ruta antigua infiere a una mayor exposición de los usuarios a contaminantes atmosféricos.

Las concentraciones promedio durante los recorridos al interior del autobús (microambiente) de formaldehído (HCHO), de acuerdo a la recomendación de la OMS² en tiempo de exposición de 30 minutos es una concentración menor a 0.1 mg/m³, los resultados de las concentraciones promedio fueron: Ruta Nueva (0.107 mg/m³), Ruta mixta (0.098 mg/m³) y Ruta antigua (0.101 mg/m³).

Los resultados de partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) para las unidades nuevas del BRT durante el recorrido presentaron un valor promedio de 84.5 (µg/m³), el cual es superior a lo medido en las unidades mixtas y antiguas; debido a la influencia de las fuentes de emisión de partículas presentes a lo largo del recorrido de las unidades nuevas, entre las que destacan las obras de construcción que durante el periodo de muestreo se llevan en Cd. Juárez, así como la resuspensión de partículas por la presencia de suelos desprovistos de vegetación. Los resultados de las concentraciones de PM_{2.5} determinadas al interior de las unidades de la ruta troncal BRT (nueva), de Cd. Juárez, Chihuahua, son consistentes con estudios previos realizados por el INECC en corredores BRT como el Metrobús de la CDMX línea 1, con 112 (µg/m³) y línea 5 con 92 (µg/m³)³, en el BRT (Tuzobus) en Pachuca, Hidalgo con 82.4 (µg/m³)⁴.

Destaca el hecho que en los tres paraderos autobuses de Cd. Juárez, Chihuahua las concentraciones promedio fueron menores que las obtenidas en los recorridos, para las unidades nuevas el valor promedio obtenido fue de 14.5 (µg/m³), mixta 22.5 (µg/m³), y antigua 11.5 (µg/m³).

¹ ((EPA), 2021) IAQ Standards and Guidelines (EPA and ASHRAE Standard) (Estandares y guías de calidad del aire en interiores). <https://foobot.io/guides/iaq-standards-and-guidelines.php>

² (WHO, 2010) WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants (Directrices de la OMS para la calidad del aire interior: contaminantes seleccionados). https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf

³ (INECC-SEMARNAT-JICA, 2013). Exposición personal a carbonilos (aldehídos), CO, BTEX y PM_{2.5} en microambientes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). 2013.

⁴ (INECC-SEMARNAT, 2016a). Elaboración de la línea base de exposición personal a contaminantes atmosféricos en el corredor de transporte masivo Tuzobus en Pachuca, Hidalgo. 2016.

Figura 0-1: Resultados de las concentraciones promedio durante la campaña de Cd. Juárez, Chih comparado con las guías de calidad del aire en interiores (microambientes) aplicables.

Tipo de ruta	PM _{2.5} (µg/m ³)		CO ₂ (ppm)		HCHO (mg/m ³)	
	Valor Promedio	Norma	Valor Promedio	Norma	Valor Promedio	Norma
Mixta	46.0	EPA, 35.5-55.4 [Insalubre para grupos sensibles]	797.0	EPA, 701-1000 [Moderado]	0.098	OMS, ≤ 0.1 [Sano]
Antigua	40.0	EPA, 35.5-55.4 [Insalubre para grupos sensibles]	1,031.0	EPA, 1001-1500 [Insalubre para grupos sensibles]	0.101	OMS, >0.1 [Insalubre]
Nueva	84.5	EPA, 55.5-150.4 [Insalubre]	774.0	EPA, 701-1000 [Moderado]	0.107	OMS, >0.1 [Insalubre]

Comportamiento y tendencia del monitoreo de la calidad del aire

En términos de los **Indicadores de Calidad del Aire**, la norma oficial mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012 “Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire”⁵, es de observancia obligatoria para los gobiernos locales, muestran que Hermosillo, Sonora incumple con dicha norma al carecer de un sistema de Monitoreo.

La información anual que estuvo disponible indica que para monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂), ninguna de las ciudades analizadas, sale de la norma en los años donde se tiene información. En el caso de NO₂ (NOM-023-SSA1-1993)⁶ se encuentra en cumplimiento en todas las ciudades, así como el CO (NOM-021-SSA1-1993)⁷.

Las PM_{2.5} y las PM₁₀ no cumplen con la NOM (NOM-025-SSA1-2014)⁸ en ninguna ciudad. Especialmente PM_{2.5}, en la ZMM; durante el período de análisis de 2010-2019. Cabe aclarar que en Ciudad Juárez para PM_{2.5} solo se tiene información para 2017, esto es importante ya que para evaluar un periodo de tiempo es necesario contar con varios años de información.

En el caso de PM₁₀ se tiene que, Ciudad Juárez, y ZMM incumplen la norma todos los años analizados. No hubo ciudad que cubriera el periodo de análisis completo con datos de PM₁₀.

Figura 0-2: Indicadores anuales de las NOM mexicanas de Salud Ambiental por ciudad (2010-2019).

Año	NO2 Máximo: 0.210 ppm			CO Máximo 8hrs: 11ppm			PM2.5 Promedio: 12 µg/m ³			PM10 Promedio: 40 µg/m ³			
	Juárez	ZMM	Tijuana	Juárez	ZMM	Tijuana	Juárez	ZMM	Tijuana	Juárez Aut.	Juárez Man.	ZMM Aut.	Tijuana Man.
	2010	SD	0.126	0.087	SD	SD	4.1	SD	22	SD	SD	SD	100
2011	SD	0.124	0.178	SD	7.2	5.6	SD	31	SD	SD	113	112	37
2012	SD	0.143	0.169	SD	9.7	4.2	SD	25	SD	SD	102	92	32
2013	SD	0.147	SD	SD	7.3	5.2	SD	SD	SD	SD	119	83	SD
2014	0.082	0.109	SD	SD	5.7	3.2	SD	29	SD	SD	128	88	SD
2015	SD	0.099	0.087	1.3	5.9	SD	SD	26	SD	SD	SD	84	35
2016	SD	0.059	0.092	2.6	6.5	SD	SD	SD	26	56	129	75	SD
2017	0.054	SD	0.053	3.1	SD	SD	22	20	27	65	SD	SD	SD
2018	0.05	SD	0.101	SD	SD	SD	SD	23	21	55	SD	SD	SD
2019	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

Fuente: CINPRO con información SCICA – INECC⁹ / Nota: SD representa los años que no cuentan con información suficiente y los números en rojo valores por arriba de los límites de la NOM respectiva

⁵ (DOF, 2012) NOM-156-SEMARNAT-2012 “Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16/07/2012.

⁶ DOF. (23 de 12 de 1994b). Diario Oficial de la Federación. Recuperado el 10 de Septiembre de 2020, de NORMA Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO₂): https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4780125&fecha=23/12/1994

⁷ Diario Oficial de la Federación (DOF). (23 de 12 de 1994a). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire, monóxido de carbono (CO). Recuperado el 5 de Agosto de 2020, de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4780110&fecha=23/12/1994

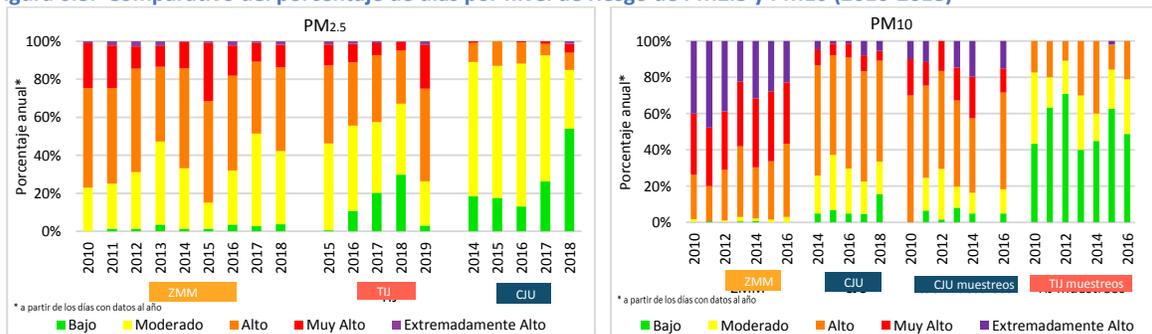
⁸ DOF. (20 de 08 de 2014). Diario Oficial de la Federación. Recuperado el 10 de Septiembre de 2020, de NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación.: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014

⁹ (INECC, 2021) <http://scica.inecc.gob.mx/exec/datadl> Recuperado en agosto 2020

Acerca del **Índice de Calidad del Aire y Salud**, en la Figura 0.3 se observa el porcentaje de días por nivel de riesgo para el periodo analizado (2010-2019). Para 2018, en el caso de PM_{2.5} se observa que el nivel de riesgo bajo se presentó con mayor frecuencia en Cd. Juárez llegando a representar hasta el 50% de los días y, en segundo lugar, se identifica a Tijuana con el 30% de días. El caso contrario es el de la ZMM, donde se aprecia que los niveles de riesgo desde alto a extremadamente alto se presentaron el 58% del año.

En el caso de PM₁₀, Tijuana registra más del 40% de casos por año con nivel de riesgo Bajo. El caso contrario es la ZMM es la que presenta mayor riesgo para la salud de la población ya que los niveles de riesgo muy alto y extremadamente alto se registran entre el 57% al 80% de los días.

Figura 0.3. Comparativo del porcentaje de días por nivel de riesgo de PM2.5 y PM10 (2010-2018)

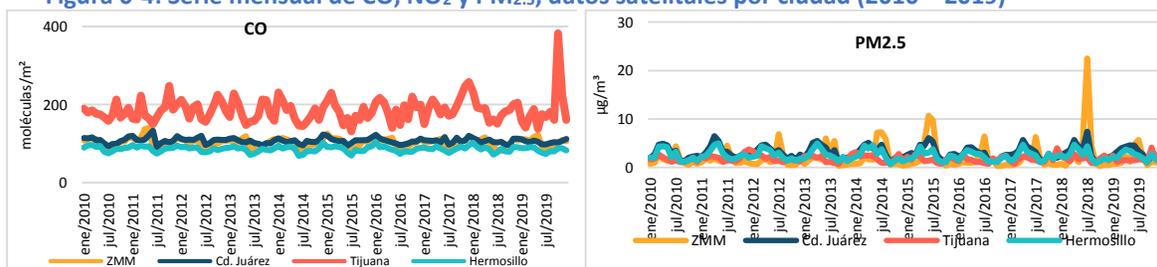


CINPRO con información del SCICA-INECC y SEST para generar el ICAYs con fundamento en la NOM-172-SEMARNAT-2019¹⁰

En términos de los **Parámetros de calidad el aire y tendencias (NASA-Giovanni)**¹¹, los promedios mensuales de CO muestran que Tijuana se encuentra por arriba del resto de las ciudades; Hermosillo presenta las menores concentraciones, y Cd. Juárez y la ZMM se mantienen en niveles similares. De acuerdo con las pruebas de los análisis estadísticos Cd. Juárez y Hermosillo, presentan una tendencia a la baja de CO, durante el periodo de análisis.

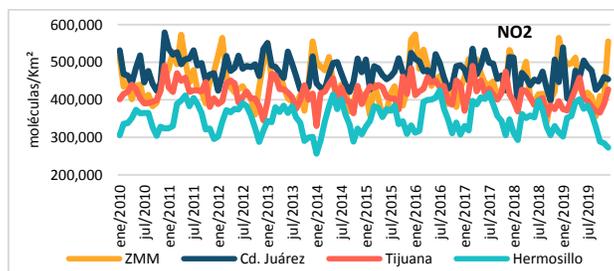
En el caso de NO₂, los promedios mensuales muestran que Cd. Juárez y la ZMM se encuentran por arriba del resto de las ciudades, mientras que Hermosillo es la de menores concentraciones. De acuerdo con el análisis estadístico Cd. Juárez y Tijuana presentan tendencia a la baja en cuanto a este contaminante. Para PM_{2.5} los promedios mensuales muestran que Cd. Juárez y Hermosillo registran las mayores concentraciones, de acuerdo con el análisis estadístico Hermosillo es la única ciudad con una tendencia a la baja, con un decaimiento mensual de 0.025 µg/m³ de PM_{2.5}.

Figura 0-4: Serie mensual de CO, NO₂ y PM_{2.5}, datos satelitales por ciudad (2010 – 2019)



¹⁰ (DOF, 2019) *NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019

¹¹ (Giovanni, 2021) <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>



Línea base de inventarios de Emisiones antes de la intervención

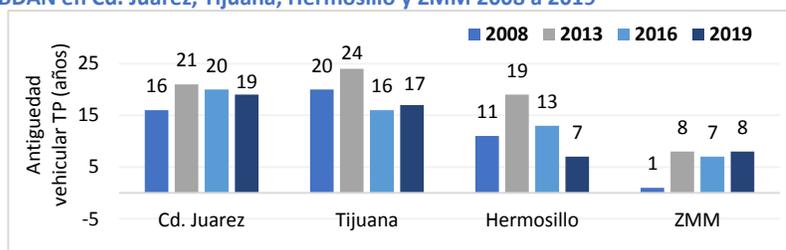
Relación de emisiones por fuentes móviles en los Inventarios y su relación con las características de las flotas de transporte público en las 4 ciudades.

En términos de la **edad promedio vehicular**, destaca el caso de Hermosillo, dado que, en tan solo un periodo de 6 años, logro mejorar la edad promedio de su flota de autobuses de transporte público, al pasar de una antigüedad de 19 años en 2013 a 7 años en 2019. Lo anterior se logró mediante un cumulo de programas y políticas públicas lo que permitió emigrar a sistemas de transporte masivo y semi-masivo.

Para el año 2019, Ciudad Juárez tiene la flota de transporte público más antigua de las cuatro ciudades analizadas en los cuatro estados con 19 años de antigüedad promedio, y le sigue Tijuana con una edad promedio de 17 años, lo que implica una mayor cantidad de emisiones.

Con la incorporación de las unidades del programa de sustitución del BDAN entre 2015 y 2019, se puede inferir cierta mejoría en cuanto a la antigüedad vehicular promedio, en dichas ciudades.

Figura 0- 5: Antigüedad vehicular promedio de autobuses de transporte público urbano y de la flota incorporada por el BDAN en Cd. Juárez, Tijuana, Hermosillo y ZMM 2008 a 2019



EL PROGRAMA, indica que para 2019 se tiene una edad promedio de los autobuses sustituidos o incorporados por el BDAN:

- ZMM de 1.1 años.
- Ciudad Juárez de 2.9 años.
- Tijuana de 3.0 años.
- Hermosillo de 3.4 años.

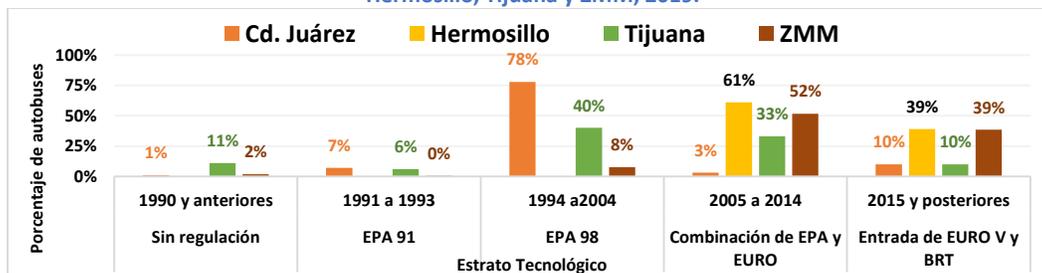
CINPRO con información de SEMARNAT, SEDUE Chihuahua, UACJ, SEST Baja California, CCT y UNE¹².

En términos de la **Tecnología de la flota vehicular de acuerdo con el estrato tecnológico**, tal como se señaló Cd. Juárez, Chihuahua para el año 2019, tiene la flota de transporte público más antigua con un promedio de 19 años, lo anterior se refleja en que el 86% de sus unidades no cuentan con regulación o en el mejor de los casos se ubican bajo la regulación de EPA 98. La ZMM y Hermosillo

¹² (SEMARNAT a, 2019). Bases de datos de los Inventarios Nacional de Emisiones 2005, 2008, 2013 y 2016. 2019. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>. (Secretaria de desarrollo urbano y ecología (SDUE) y Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), 2019). Diseño operacional de las rutas troncales 1 y 2 del sistema integrado de transporte Ciudad Juárez. (Secretaria de economía del gobierno del estado de Baja California, 2020). Padrón vehicular 2019 (Consejo Ciudadano del Transporte Público Sustentable del Estado de Sonora (CCT), 2019). ESTUDIO TÉCNICO PARA LA DETERMINACIÓN DE TARIFAS DEL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO EN HERMOSILLO 2017. https://0201.nccdn.net/1_2/000/000/13b/762/ESTUDIO-T--CNICO-PARA-LA-DETERMINACI--N-DE-TARIFAS-DEL-TRANSPORTE-P--BLICO-URBANO-EN-HERMOSILLO-2017.pdf (UNE transporte urbano del Estado de Sonora, 2020). Rutas de Hermosillo. <http://une.sonora.gob.mx/rutas/ubica-tu-camion.html>

presentan un 39% de su flota vehicular bajo a regulación de EURO V y BRT. En 2019, Tijuana es la ciudad que presenta la mayor cantidad de unidades sin ningún tipo de regulación con 11%.

Figura 0.6. Comparación porcentual por estrato tecnológico del padrón de autobuses de transporte en Cd. Juárez, Hermosillo, Tijuana y ZMM, 2019.

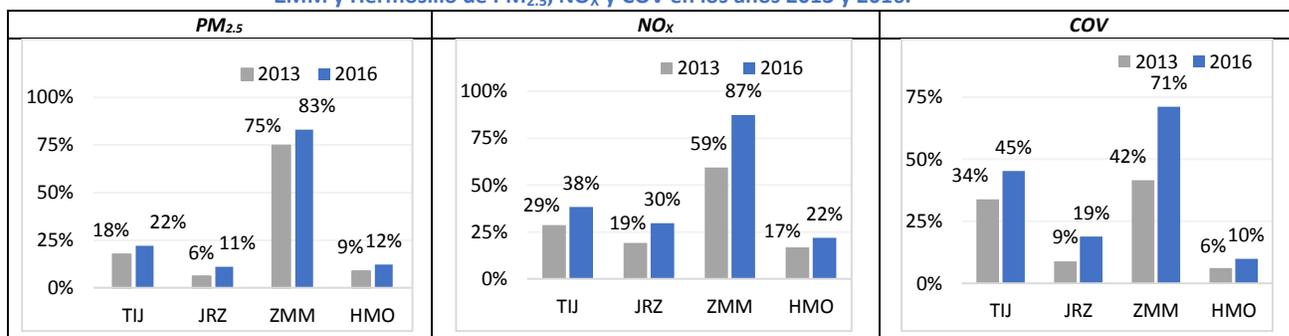


CINPRO con información de SEMARNAT, SEDUE Chihuahua, UACJ, SEST Baja California, CCT y UNE.

Acerca de los resultados de los **inventarios de emisiones de fuentes móviles**, hasta el año 2016, en la ZMM el 87% de las emisiones NO_x y el 83% de $PM_{2.5}$, proviene de las fuentes móviles ya que en la entidad aún existen unidades en estratos tecnológico sin control lo que se observa claramente en aumentos de emisión de contaminantes, inclusive en los años en donde ya existían programas como BRT.

En cuanto a NO_x se observa que Tijuana aumento de 29% a 38% en los años 2013 y 2016 respectivamente, mientras que Ciudad Juárez cambio el porcentaje de contribución de 19 a 30% en los mismos años. Flotas vehiculares con mayor antigüedad tienen mayores emisiones por la fuente. De manera general entre 2013 y 2016, se registró un incremento de la contribución de contaminantes por fuentes móviles $PM_{2.5}$, NO_x y COV en las cuatro ciudades.

Figura 0.7 Porcentaje de contribución de la emisión por fuentes móviles a nivel estatal de Tijuana, Ciudad Juárez, ZMM y Hermosillo de $PM_{2.5}$, NO_x y COV en los años 2013 y 2016.



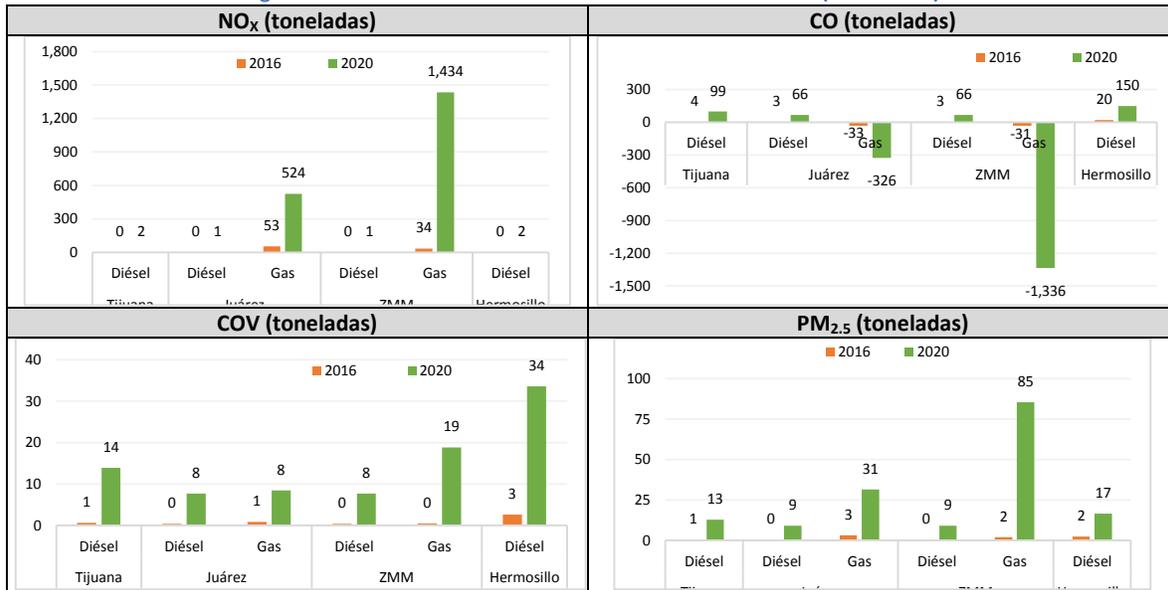
CINPRO con información de SEMARNAT

Acerca de la **Modelación con MOVES para las cuatro ciudades**. El resultado agregado de reducción de emisiones de las 722 unidades sustituidas por el BDAN, de acuerdo con el modelo MOVES y considerando el tipo de combustible, durante el periodo 2015-2019, es de: 1,965 toneladas de NO_x , 164 toneladas de $PM_{2.5}$ y 90 toneladas de COV. Sin embargo, también se debe mencionar un aumento acumulado de 1,280 toneladas de CO debido al uso de unidades a gas natural.

De las 722 unidades de transporte público del programa, el 66% fueron para la ZMM (474), de ese total de unidades el 50% son de gas natural, de tal forma que los resultados muestran una reducción de emisiones de: 1,434 toneladas de NO_x , 85 toneladas de $PM_{2.5}$ y 19 de COV, y a su vez 1,336 toneladas de CO emitidas a la atmósfera. Durante el periodo 2015-2020 Cd. Juárez, fue la segunda mayor receptora de unidades por parte del programa, con un total de 102 vehículo, de los cuales 42 unidades de diésel (41%) y 60 de gas natural (59%). Al respecto se destacó que las unidades de gas

natural lograron reducir 524 toneladas de NO_x y las unidades de diésel 1 tonelada.

Figura 0.8. Reducción de emisiones en las cuatro ciudades (2015-2020)



Recomendaciones

Campaña de monitoreo de contaminantes en Cd. Juárez Chihuahua

1. Para poder ser concluyente respecto a las concentraciones a las cuales está expuesta la población usuaria durante sus traslados en los distintos tipos de transporte público (autobuses) existentes en Ciudad Juárez, es necesario realizar un estudio más amplio en número de mediciones, en condiciones de aforo de personas, variables climáticas con menos variación, así como evitar que haya obras de construcción importantes para obtener resultados representativos.
2. El uso de equipos de muestreo más estables, validados por instituciones acreditadas, ya que los equipos utilizados en la campaña son solo indicativos de las concentraciones presentes, por ser equipos muy inestables ante variables como cambio de condiciones meteorológicas.

Parámetros de calidad el aire y tendencias

1. Es necesario la generación de información continua y validada de la calidad del aire en los sistemas de monitoreo en las ciudades, para poder hacer un análisis completo de tendencias y cumplimiento de la normatividad de salud ambiental.
2. Para mejorar la calidad del aire en las ciudades se recomienda que programas como el del BDAN y otros asociados a movilidad sean implementados en forma conjunta, para disminuir las concentraciones de partículas PM_{2.5}, las cuales son un problema de salud.
3. En cuanto a la tendencia de la calidad del aire con los datos obtenidos con el sistema Giovani-NASA, se debe tener en cuenta que, aunque se observan algunas tendencias a la baja, dichos decrecimientos no pueden relacionarse a alguna fuente en específico ya que los resultados de satélite no son mediciones a nivel superficie, ya que incluye toda la columna de aire en la atmósfera.

Relación de emisiones por fuentes móviles en los inventarios y modelación con MOVES

1. Con el objetivo de lograr potenciar los efectos positivos de reducción de emisiones contaminantes, los programas de sustitución de autobuses como el del BDAN pueden tomar en cuenta buscar una combinación con los programas y políticas públicas locales, para lograr ampliar la magnitud de sus beneficios, como en el caso de Hermosillo.

2. De acuerdo con los hallazgos de esta tarea, se muestra que el éxito de los programas de transporte debe identificar desde su inicio los factores que influyen al comportamiento y por tanto a las emisiones contaminantes, como son la edad promedio vehicular, estratos tecnológicos y cantidad de unidades.
3. Los beneficios ambientales se verán incrementados a lo largo del tiempo, no obstante, es importante señalar que el mayor efecto se lograra al sustituir la flota vehicular por tecnologías más recientes que incorporen los últimos adelantos a nivel internacional.
4. Con relación a los óxidos de nitrógeno pudieran parecer en apariencia mínimos, se debe considerar que la tecnología en México aún no cumple estándares estrictos en materia de este contaminante como lo sería la adopción de estándares EPA 2007 o EURO VI, los cuales incorporan tecnologías de control de emisiones de este contaminante.
5. Como se ha reportado en otros estudios y se pudo ver en el presente las emisiones vehiculares tiene una contribución muy importante en la exposición a contaminantes de la población, por lo que es recomendable el restringir la circulación de vehículos altamente contaminantes y promover e incentivar modos sustentables de transporte como podría ser el uso de bicicleta, la implementación de corredores peatonales, entre otros.

Es indudable que se debe proseguir con la implementación de esta clase de programas en la región, pero como se observó cuando se trabaja en más de una ciudad, se debe priorizar la cantidad de unidades de sustitución y ampliación en cada sitio considerando tamaño de flota, antigüedad de los vehículos, demanda atendida, porcentaje de contribución a la emisión de distintos contaminantes, y el riesgo a la población considerando el índice de calidad del aire.

1. Introducción

El Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN) tiene por misión proveer financiamiento y apoyos técnicos para afianzar el desarrollo e implementación de proyectos de infraestructura que ayuden a preservar, proteger y mejorar el medio ambiente en la región fronteriza, para mejorar el bienestar de los habitantes de México y Estados Unidos.¹³ Para lograr sus objetivos, el BDAN proporciona asistencia técnica para el desarrollo de proyectos de infraestructura ambiental de alta calidad, para apoyar la sustentabilidad de los proyectos en el largo plazo y para facilitar el acceso al financiamiento del propio BDAN.

Los estudios de evaluación del impacto de proyectos de infraestructura ambiental tienen como objetivo la documentación de los cambios en las condiciones ambientales y la calidad de vida de la población beneficiada por la implementación de los proyectos financiados por el BDAN. Se insertan en una política institucional de medición de resultados, que conlleva la mejora continua de las estrategias, procedimientos y tareas en general del BDAN y se han realizado en el marco del mandato del Consejo de Directores del BDAN, habiendo evolucionado en su conceptualización y complejidad desde el año 2014. La evaluación de impactos representa el siguiente paso lógico en la medición de resultados, al poner de manifiesto si el proyecto implementado está logrando su objetivo fundamental, más allá de los resultados físicos.

Para el BDAN es importante saber que los proyectos que se certifican y se financian, además de terminarse de acuerdo con el diseño, también operan según lo previsto y si efectivamente mejoran el entorno ambiental y condiciones de salud de los habitantes fronterizos. Debido al costo y recursos limitados, se evalúa el impacto de proyectos selectos cuando se cuenta con datos de referencia para comparar el antes y después de al menos un año de operación, aunque el tiempo que toma para que los beneficios sean evidentes pueden variar de proyecto a proyecto. La evaluación es una herramienta esencial para comunicar resultados e identificar oportunidades de mejora.

A partir de 2014, el BDAN ha realizado cuatro estudios de evaluación de impacto de proyectos de infraestructura ambiental. El presente estudio está enfocado en evaluación de impactos del Programa de Sustitución de Transporte Público por Vehículos de Bajas Emisiones en la Zona Norte de México; “EL PROGRAMA” se ha implementado desde 2014 hasta 2019.

EL PROGRAMA ha facilitado la adquisición de varios cientos de vehículos con tecnología de bajas emisiones para el transporte público (TP), dentro de los 300 km de la franja fronteriza de México. Las ciudades que han participado en el programa son:

1. Hermosillo, Sonora.
2. Tijuana, Baja California.
3. Ciudad Juárez, Chihuahua.
4. Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), Nuevo León.

El propósito de EL PROGRAMA es mejorar el parque vehicular de TP, facilitando el financiamiento de unidades modernas con tecnología de bajas emisiones, que contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes, en sustitución de equipos obsoletos y altamente contaminantes en las zonas urbanas de la franja fronteriza de México.

EL PROGRAMA se ha implementado mediante dos contratos (o proyectos) independientes,

¹³ (Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN), 2020). Resumen de Actividades de Implementación de Proyectos Activos https://www.nadb.org/uploads/files/avance_de_proyectos_activos.pdf

ambos con el mismo objetivo. Originalmente se otorgó una línea de crédito revolvente a manera de programa piloto y posteriormente se otorgó una segunda línea de crédito mayor que a su vez fue ampliada como fondo revolvente. El programa piloto inició en 2014 con 58 unidades de TP y una inversión de \$147.6 millones de pesos. La segunda línea de crédito se otorgó en 2016 para iniciar con 285 unidades de TP y una inversión de \$645.2 millones de pesos, según los reportes de cierre hasta ahora concluidos. A marzo de 2019 el programa, ha entregado 703 unidades, por un monto de \$1,305.50 millones de pesos (\$68.21 millones de dólares) de inversión.¹⁴

Dado que ambos proyectos están financiados con líneas de crédito revolventes del BDAN, el número de vehículos financiado por cada uno ha ido en aumento aun después de los reportes de cierre. Para efectos de este estudio de impacto, se tomaron en cuenta todas las unidades financiadas por ambos proyectos hasta el 31 de marzo de 2019, mismas que suman un total de 703, como anteriormente se mencionó. Los datos actualizados y detallados de todas las unidades, ubicaciones, tecnología y combustible utilizado fueron proporcionados al consultor por el BDAN durante la reunión de arranque del estudio.

¹⁴ (BDAN, 2021) Visión, Misión y valores Centrales. <https://www.nadb.org/es/acerca-de-nosotros/vision-y-valores-fundamentales>

2. Antecedentes

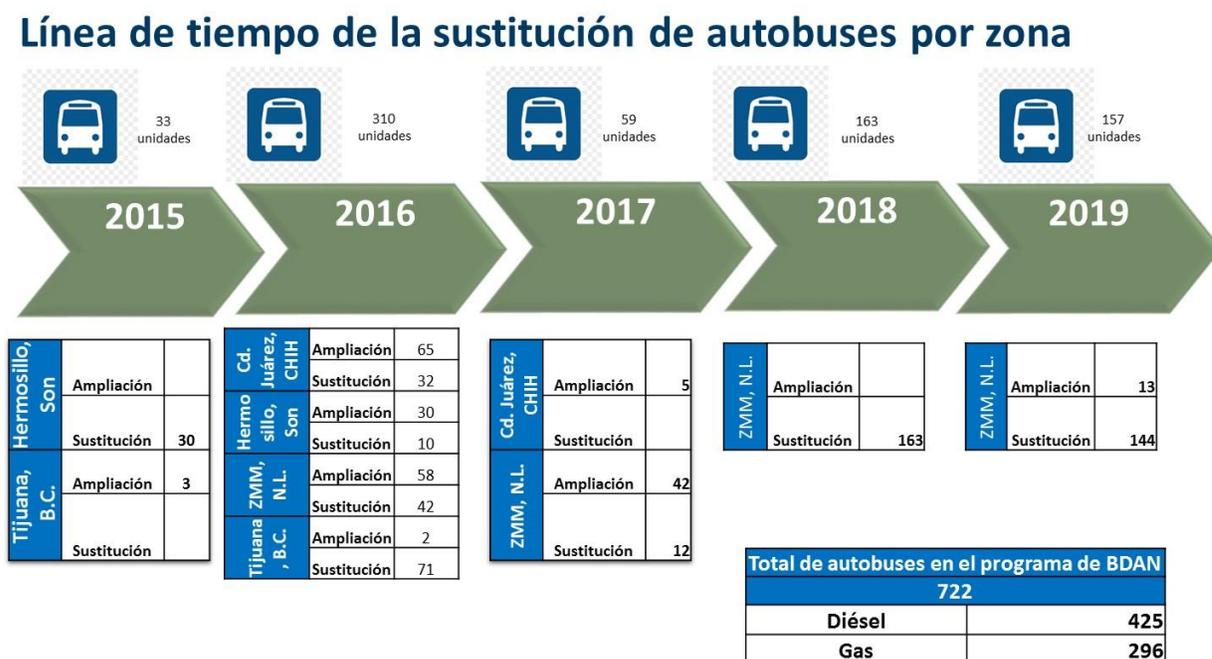
El presente reporte hace una revisión de las condiciones relacionadas con el transporte público antes y después de la implementación del programa referido en cuatro diferentes tareas:

1. Determinación de la línea base de la calidad del aire, en las ciudades del estudio.
2. Análisis de los sistemas de transporte público (TP).
3. Análisis del ciclo de vida de las unidades de TP (chatarrización).
4. Percepción de la calidad de vida de los residentes de las ciudades involucradas.

En el presente estudio se presenta los resultados de la tarea 1, sobre la línea base de la calidad del aire, a partir de una revisión de los diferentes aspectos enfatizando las condiciones ambientales antes y después de EL PROGRAMA.

Para comprender los distintos indicadores generados, se presenta la línea de tiempo de 2015 a 2019. La Figura 2-1 muestra en cada zona por año la cantidad de autobuses incluidos por EL PROGRAMA y si se aplicó ampliación o sustitución de unidades; cabe aclarar que, aunque el programa inició en 2014, es hasta 2015 donde se lleva a cabo la obtención de las unidades.

Figura 2-1: Línea de tiempo del Programa de Sustitución de Transporte Público por Vehículos de Bajas Emisiones en la Zona Norte de México del BDAN



CINPRO con información del BDAN

Uno de los aspectos fundamentales al evaluar el impacto de EL PROGRAMA en la calidad del aire y por ende en la calidad de vida, es conocer las características técnicas y físicas de las unidades incorporadas a cada ciudad. La edad vehicular es un indicador que asocia la tecnología y el uso del vehículo. La edad promedio de los autobuses que se tiene en este momento en cada región de EL PROGRAMA, indica que:

- ZMM tiene una edad promedio de 1.1 años.
- Ciudad Juárez tiene una edad promedio de 2.9 años.
- Tijuana tiene una edad promedio de 3.0 años.
- Hermosillo tiene una edad promedio de 3.4 años.

3. Definiciones conceptuales

3.1. Conceptualización de monitoreo de exposición personal

La exposición es el contacto de un organismo (personas, animales, plantas) con un agente químico, físico o biológico, a una concentración determinada y durante un intervalo de tiempo. Las mediciones de la exposición personal a contaminantes en el aire por lo general son mediciones en las que el ser humano es entendido como un receptor de la contaminación ambiental.

La frecuencia y duración que la persona pasa en diferentes microambientes, tales como vivienda, escuela, oficinas, industrias y medios de transporte; es la tasa ventilatoria de la persona, y se determina por el tipo de actividad que realiza (dormir, caminar, hacer ejercicio intenso, etcétera). La concentración de contaminantes presente en cada uno de estos microambientes son determinantes para establecer su afección. Siendo el monitoreo micro ambiental, el monitoreo de los niveles de contaminación en un área limitada del ambiente que refleja las condiciones ambientales particulares de la misma.

Cuando se trata de monitoreo a exposición personal los factores normales de riesgo son:

- **Tipo de actividad, conducta y hábitos:** fumar, hacer ejercicio, exposición laboral, tiempos en exterior/interior.
- **Contexto socio económico:** Contaminación en interiores y otros.
- **Vías de exposición:** Inhalación, cutánea (depósito sobre la piel), ingesta y transplacentaria.

En general, la población con mayor riesgo a la exposición de contaminantes está constituida por los niños menores de 5 años, las personas de la tercera edad (mayores de 65 años), las personas con enfermedades cardíacas y respiratorias, y los asmáticos.

Existen diferentes tipos de exposición:

- Aguda (minutos, horas o días): concentraciones elevadas a corto tiempo.
- Crónica (semanas, meses o años): concentraciones relativamente bajas a largo plazo pueden causar efectos de salud como enfermedades respiratorias, disminución de la capacidad respiratoria, aumento de ataques de asma, enfermedades cardíacas, cánceres pulmonares e incremento de morbilidad.

Un estudio de exposición personal identifica:

- I. Población afectada
- II. Como un contaminante del aire afecta en la salud de la población
- III. Determinar los niveles de concentración de contaminantes.

Para evaluar el nivel de exposición de los usuarios y transeúntes a las emisiones de los vehículos del transporte público, y a las posibles mejoras relacionadas con el uso de nuevos vehículos de bajas emisiones, relacionadas con EL PROGRAMA, se diseñó el plan de exposición personal utilizando monitores portátiles que se describe en la sección de 4.1.

3.2. Experiencias nacionales e internacionales del monitoreo de exposición personal

A nivel internacional se han realizado diversos estudios de exposición personal en diversos microambientes. La Organización Mundial de la Salud (OMS) tiene una larga tradición en la compilación de evidencias sobre los aspectos sanitarios de la calidad del aire y en la preparación de directrices para lograr que, tanto dentro como fuera de los microambientes el aire no esté contaminado. Dichas directrices de contaminación en interiores están enfocadas en contaminantes

como partículas PM₁₀, PM_{2.5}, benceno, monóxido de carbono, formaldehído, naftaleno, dióxido de nitrógeno, asbestos, benzopireno, radón, tricloroetileno, tetracloroetileno.^{15,16}

Se han realizado estudios en distintos microambientes (interiores) como son hogares, salones de clases, oficinas, restaurantes, plantas industriales, laboratorios industriales, medios de transporte, los resultados de estos han sido publicados en distintas revistas internacionales.

Con respecto a la exposición a la calidad del aire, de transeúntes y pasajeros en el transporte, existe una amplia revisión del efecto de las partículas ultrafinas en la salud¹⁷, se basan en el análisis de 47 estudios de exposición realizados en 6 modos de transporte: automóvil, bicicleta, autobús, ferry, ferrocarril y caminar. Estos abarcaron aproximadamente 3,000 viajes individuales en los que se midieron las concentraciones de partículas ultrafinas (UFP), encontrando que pueden causar efectos agudos negativos para la salud en los seres humanos; los desplazamientos pueden explicar una proporción significativa de la exposición diaria; la exposición depende del modo de transporte utilizado y de una serie de factores determinantes (como son meteorología, parámetros de tráfico, ruta, tipo de combustible, tecnologías de tratamiento de escape, ventilación de la cabina, filtración, deposición, penetración de las UFP).

El estudio Efectos del modo de gestión del tráfico y transporte en la exposición de los escolares al monóxido de carbono¹⁸ mostró que la exposición cuando viajaban en coche era significativamente mayor que cuando caminaban, aunque los tiempos de viaje en coche eran más cortos. Así como los resultados mostraron una gran variabilidad en el efecto de las intervenciones de gestión del tráfico, dependiendo de la ubicación del niño en el hogar y la escuela.

Otro tipo de estudios se han enfocado a las llamadas zonas de bajas emisiones, las cuales son una de las varias herramientas que están en uso para la mejora de la calidad del aire gracias a la entrada limitada de vehículos a las zonas centro de las ciudades. Dado que la contaminación atmosférica se ve agravada por las emisiones de contaminantes (dióxido de nitrógeno - NO₂, aerosoles de partículas – PM₁₀, PM_{2.5}), que se producen como un subproducto del proceso de combustión de motores de vehículos o como resultado de la abrasión de piezas móviles de vehículos¹⁹.

A nivel nacional México ha desarrollado, estudios de exposición personal desde los 90's, siendo el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) a través del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA) el pionero en el tema, así como el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA-UNAM); con el propósito de evaluar la exposición a contaminantes en diferentes microambientes, en la Figura 3-1, se presentan algunos de los estudios relacionados al impacto de la exposición a la calidad del aire, de transeúntes y pasajeros antes y después de mejoras al transporte en distintas ciudades del país.

¹⁵ (WHO, 2009). WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould (Directrices de la OMS para la calidad del aire interior: humedad y moho). <https://www.who.int/airpollution/guidelines/dampness-mould/en/>

¹⁶ (WHO, 2010) WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants (Directrices de la OMS para la calidad del aire interior: contaminantes seleccionados). https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf

¹⁷ (Luke D.Knibbs, 2011). A review of commuter exposure to ultrafine particles and its health effects (Una revisión de la exposición a partículas ultra finas y su efecto en salud de los usuarios de transporte), 2011. págs. 2611-2622. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231011002299>

¹⁸ (Ashmore M R, 2000). Effects of Traffic Management and Transport Mode on the Exposure of Schoolchildren to Carbon Monoxide (Efectos del modo de gestión del tráfico y transporte en la exposición de los escolares al monóxido de carbono). Págs. 49–57. https://www.researchgate.net/publication/227139856_Effects_of_Traffic_Management_and_Transport_Mode_on_the_Exposure_of_Schoolchildren_to_Carbon_Monoxide

¹⁹ (M. Tögel, 2014). Low-Emission Zones in European Countries (Zonas de bajas emisiones en los países europeos). Págs. 97-108 https://www.researchgate.net/publication/277980575_Low-Emission_Zones_in_European_Countries

Figura 3-1: Estudios de exposición personal en medios de transporte realizados en México

Nombre del proyecto	Objetivo	Microambiente	Sitio de muestreo	Metodología	Resultados
Comparación de autobuses, minibuses y metro de la exposición de los pasajeros a la contaminación atmosférica en la Ciudad de México ²⁰	Las mediciones de exposición de los pasajeros se tomaron para PM _{2.5} , monóxido de carbono (CO) y benceno en minibuses, autobuses y metro durante las horas pico de la mañana y la noche durante enero-marzo de 2003 en la Ciudad de México.	Minibuses, autobuses y Metro	Ciudad de México	Medición de PM _{2.5} , CO y benceno durante las horas pico en la mañana (6:30–9:30 a.m.) y por la noche (17:30–20:30) en minibuses, autobuses y Metro (sistema subterráneo). Tres rutas fueron seleccionadas de un estudio de exposición de pasajeros que cubre algunas de las avenidas más importantes del valle (Av. Insurgentes). Para PM _{2.5} , se determinó la concentración de masa para todas las muestras. Se analizaron nitratos, sulfatos, elementos inorgánicos y fracción de carbono. El CO se muestreó utilizando sensores electroquímicos y se utilizaron canisters de 6 l con dispositivos controladores de flujo para recoger muestras integradas de benceno	Para PM _{2.5} , se caracterizó la composición química. El carbono total fue la especie más abundante en partículas finas (aproximadamente el 50%). Los minibuses (49 g m ⁻³) y los autobuses tenían concentraciones similares de exposición para PM _{2.5} (53 g m ⁻³). En el caso del CO y el benceno, las concentraciones fueron mayores en los minibuses. La hora pico de la mañana fue el período de desplazamiento con las concentraciones más altas para minibuses y autobuses. Metro era el modo de transporte con concentraciones más bajas para todos los contaminantes. Las concentraciones de monóxido de carbono fueron similares a las identificadas en una campaña anterior en 2002 y aproximadamente 3.5 veces inferiores a las de un estudio realizado en 1991. El benceno se caracterizaba sistemáticamente en los modos de transporte seleccionados. Se observó una fuerte asociación entre la velocidad del viento y las concentraciones de contaminantes en los autobuses.
Exposición personal a contaminantes atmosféricos en el Corredor Ruiz Cortines – Lincoln (Ecovía). Monterrey, Nuevo León. ²¹	Establecer la línea base, de los niveles de concentración CO, PM _{2.5} y benceno a los que se exponían los usuarios, previo a la implementación de un sistema de transporte público en carriles confinados y posterior a ello.	Corredor vial Abraham Lincoln	Monterrey, Nuevo León	En 2009 se hizo la línea base y en abril de 2015 la 2da etapa. Se determinaron las concentraciones de CO, PM _{2.5} y benceno en el interior de los autobuses que circulaban por el Corredor vial Abraham Lincoln, en un automóvil particular. Para evaluar el impacto ambiental de las emisiones vehiculares en el entorno inmediato a estas vialidades, se instalaron dos unidades móviles de monitoreo automático de contaminantes atmosféricos en dos puntos a lo largo del trayecto.	Al realizar una comparación de las concentraciones determinadas en ambas etapas se determinaron reducciones de CO (56% y 49%), benceno (69% y 72%) y xilenos (59% y 69%) en los horarios matutino y vespertino respectivamente. En el caso de las PM _{2.5} se determinó un incremento en las concentraciones de 37% y 55% para los horarios matutino y vespertino, lo cual se puede asociar a fuentes específicas (cementeras y harinas) que contribuyen a las concentraciones determinadas.
Exposición personal a contaminantes atmosféricos en el Metrobús Línea 5, Ciudad de México. ²²	Establecer los niveles de concentración CO, PM _{2.5} y benceno a los que se exponían los usuarios, previo y posterior a la implementación de un sistema de transporte público en carriles confinados.	Metrobús Línea 5	Ciudad de México	Línea base en 2010 y 2da etapa en oct- nov 2014. Se determinaron las concentraciones de CO, PM _{2.5} y benceno en el interior de los autobuses que circulaban por el Corredor eje 3 oriente (Río de los Remedios – San Lázaro); así como posteriormente cuando ya operaba el Metrobús en dicho corredor.	Al realizar una comparación de las concentraciones determinadas en ambas etapas se determinaron reducciones de CO (51% y 60%), PM _{2.5} (46 y 74%) en las concentraciones determinadas en las unidades de Metrobús respecto a las determinadas al interior de autobuses y microbuses en 2010.

²⁰ (Gómez-Perales, et.al., 2007). Bus, minibus, metro inter-comparison of commuters' exposure to air pollution in Mexico City (Comparación de autobuses, minibuses y metro de la exposición de los viajeros a la contaminación atmosférica en la Ciudad de México), 2007. Págs. 890-901.

²¹ (INECC-SEMARNAT-JICA, 2013). Exposición personal a carbonilos (aldehídos), CO, BTEX y PM_{2.5} en microambientes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). 2013.

²² *Ibidem*

<p>Elaboración de la línea base de exposición personal a contaminantes atmosféricos en el corredor de transporte masivo Tuzobus en Pachuca, Hidalgo.²³</p>	<p>Elaborar la línea base o escenario de referencia de exposición personal a contaminantes atmosféricos de la población usuaria del Sistema Integrado de Transporte Masivo (Tuzobus) de la ciudad de Pachuca, Hidalgo, con el fin de contar con información técnica y científica que permitan diseñar y evaluar la implementación de medidas orientadas a mejorar la calidad del aire y con ello reducir la exposición personal a contaminantes atmosféricos de la población.</p>	<p>Tuzobus paradora Tuzobus exprés Tuzobus parador Parabus Auto particular (Boulevard Felipe Ángeles)</p>	<p>Zona Metropolitana de Pachuca, integrada por 7 municipios: Pachuca de Soto, Mineral del Monte, Mineral de la Reforma, San Agustín Tlaxiaca, Epazoyucan, Zapotlán y Zempoala</p>	<p>Se realizaron mediciones simultáneas para determinar las concentraciones CO, PM_{2.5} y COV's al interior de los vehículos empleados para transporte público. Campaña con duración de 4 semanas: a partir del 5 de abril y hasta el 2 de mayo del 2016. Las mediciones se llevaron a cabo de lunes a domingo, en uno de los horarios críticos —tráfico vehicular y alta demanda de transporte público en la ruta troncal del Tuzobus (16.5 km y 33 estaciones) y de vehículos empleados para transporte público y que circulan en el Boulevard Luis Donaldo Colosio (donde se tiene proyectada la segunda línea troncal del Tuzobus) realizando recorridos completos comprendido de las 7:30 am a las 9:30 am. También se realizaron mediciones al interior y en las inmediaciones de la estación Centro Histórico de la ruta troncal del Tuzobus (Parabus),</p>	<p>Concentraciones promedio de CO —parabus (2.4 ppm), Tuzobus (3.7 ppm), Camionetas tipo Van (8.2 ppm) y autos particulares (5.6 y 7.5 ppm) — no rebasan los valores guía establecidos por la OMS. Concentraciones promedio de PM_{2.5}: Parabus (41.8 µg/m³), Tuzobus (82.4 µg/m³), y camionetas tipo van empleadas para transporte público (97.4 µg/m³). A partir del mapeo de las concentraciones de PM_{2.5} y CO, se pudo apreciar que la resuspensión de suelos tiene una contribución en estas concentraciones, ya que en áreas fuera de la zona urbana, donde el uso de suelo es principalmente agrícola, se registran altas concentraciones de PM_{2.5}. A partir de la determinación de carbono negro a las muestras de material particulado, se encontró que de los modos de transporte considerados en el presente estudio: al interior de las unidades del Tuzobus, se registraron las concentraciones más bajas. En las concentraciones promedio determinadas fueron: Tuzobus (5.8 µg/m³), Auto-Blvd. FA (8.6 µg/m³); Van (9.1 µg/m³); Auto-Blvd. LDC (10.5 µg/m³). Las concentraciones de benceno determinadas al interior de las unidades del Tuzobus (3.0 ppbv) son menores a la registradas en estudios previos realizados por el INECC.</p>
<p>Línea base de exposición personal a contaminantes atmosféricos en la EcoZona de Cuernavaca, Morelos.²⁴</p>	<p>Elaborar la línea base —o escenario de referencia— de exposición personal a contaminantes atmosféricos, de la población que habita, realiza sus actividades o transita en la EcoZona de Cuernavaca, Morelos.</p>	<p>2 circuitos peatonales. Circuitos de autobús y auto particular. Parabús. Escuelas primarias: Enrique Pestalozzi y Benito Juárez. Inmediaciones de estación de servicio de gasolina.</p>	<p>EcoZona de Cuernavaca, Morelos y corredor vial Cuauhnáhuac – Plan de Ayala.</p>	<p>Durante el periodo del 03 al 30 de noviembre del 2016 se realizó una campaña de mediciones. Se midieron las concentraciones de CO, PM_{2.5} y COV's. De lunes a domingo, en uno de los horarios críticos —tráfico vehicular y alta demanda de transporte público— comprendido en promedio de las 7:30 am a las 10:00 am.</p>	<p>De los resultados podemos observar que aquellos microambientes donde hay una mayor presencia de emisiones vehiculares es donde se registraron las mayores concentraciones de monóxido de carbono, siendo los microambientes con mayores concentraciones: el parabús, el interior de los autobuses empleados para transporte público y el auto particular. Las concentraciones de PM_{2.5} establecen que en el parabús y al interior de los autobuses empleados para transporte público es donde la población se expone a mayores concentraciones, mientras que al interior de las aulas en las escuelas es donde se registraron las concentraciones más bajas. De las concentraciones de carbono negro —al igual que para el monóxido de carbono— en los microambientes donde hay mayor presencia de emisiones vehiculares es donde la población se expone a mayores concentraciones. Respecto a la exposición personal a BTEX, al ser el benceno y tolueno parte de la formulación de las gasolinas, en los microambientes con mayor presencia de emisiones vehiculares en donde se presentan las mayores concentraciones a las que se expone la población.</p>

²³ (Intituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2016a). Elaboración de la línea base de exposición personal a contaminantes atmosféricos en el corredor de transporte masivo Tuzobus en Pachuca, Hidalgo. 2016.

²⁴ (INECC-SEMARNAT, 2016). Elaboración de la línea base de exposición personal a contaminantes atmosféricos en la Ecozona de Cuernavaca Morelos. 2016

Uno de los problemas actuales en las áreas urbanas es el alto nivel de contaminación del aire. Los contaminantes que a menudo se presentan son el dióxido de nitrógeno NO₂, aerosoles de material particulado PM₁₀, PM_{2.5}, que se producen como subproducto del proceso de combustión de los motores de los vehículos de motor (NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}) o como resultado de la abrasión de partes móviles del vehículo (PM₁₀, PM_{2.5}) así como por la resuspensión de polvos por el rodamiento en calles y caminos. Los efectos de los contaminantes sobre la salud de la población provocando enfermedades inflamatorias cardiovasculares y respiratorias.

Una solución obvia para mitigar las emisiones contaminantes es limitar las fuentes, en particular las emisiones del sector transporte. Existe una amplia gama de herramientas para la reducción de emisiones del transporte y sus efectos se pueden dividir en globales y locales. Las herramientas globales incluyen, por ejemplo, políticas públicas para renovar la flota vehicular y su transformación en unidades de cero emisiones o autobuses que funcionen con gas natural comprimido. Por otro lado, las herramientas locales pueden generalmente denominarse restricciones de acceso urbano (ISIS, 2010). Las zonas de baja emisión son uno de los tipos de restricciones de uso que tienen como objetivo reducir la cantidad de emisiones de dióxido de nitrógeno y aerosoles de polvo.

3.3. Sistemas de monitoreo de calidad del aire (SMCA)

La norma oficial mexicana *NOM-156-SEMARNAT-2012 “Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire”*, publicada en el DOF el 16/07/2012, establece que un sistema de monitoreo es un conjunto organizado de recursos humanos, técnicos y administrativos para operar una o un conjunto de estaciones de monitoreo y/o muestreo que miden la calidad el aire en una zona o región²⁵. Esta norma rige en todo el territorio nacional y es de observancia obligatoria para los gobiernos locales, según corresponda, en aquellas zonas o centros de población que cuenten con alguna de las condiciones siguientes:

- Asentamientos humanos con más de quinientos mil habitantes;
- Zonas metropolitanas;
- Asentamientos humanos con emisiones superiores a veinte mil toneladas anuales de contaminantes criterio primarios a la atmósfera;
- Conurbaciones.

En el país existen 36 Sistemas de Monitoreo de la Calidad del aire (SMCA) según el informe 2018 del INECC²⁶, de los cuales en los estados considerados en “EL PROGRAMA” se cuenta con un sistema en cada ciudad con excepción de Hermosillo, Sonora (Figura 3-2)

Figura 3-2: Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire en estados del norte del país

Entidad	SMCA
Baja California	Mexicali, Tijuana , Ensenada y Tecate
Chihuahua	Chihuahua, Ciudad Juárez y Ojinaga;
Nuevo León	Zona Metropolitana de Monterrey
Sonora	Nogales

Fuente: INECC

²⁵ (DOF, 2012) NOM-156-SEMARNAT-2012 “Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16/07/2012.

²⁶ (INECC, 2019) INFORME NACIONAL DE LA CALIDAD DEL AIRE MÉXICO. <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2018.pdf>

3.4. Mediciones satelitales de parámetros de calidad el aire (NASA-Giovanni)

La teledetección satelital permite observar objetos a mayor altura y lejanía, es un paso muy importante hacia los sistemas de detección de cambios meteorológicos y del conocimiento de nuestro propio planeta, se lleva a cabo con satélites habitualmente meteorológicos. La teledetección satelital es una fuente de apoyo cuando se carece de monitoreo atmosférico de calidad del aire y se desea cuantificar el impacto de la contaminación del aire en esas regiones ya que ofrece una cobertura global de varios contaminantes atmosféricos, por ejemplo: gases como ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂); y gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄); así como partículas o aerosoles como imágenes de color real (true color imagery), profundidad óptica de aerosoles; y detección de incendios. Las mediciones se realizan con diferentes satélites (Aqua, Terra, Cloudsat, Acrimsat, Aura, Calipso, Quicksat, Sorce y Trmm) (Figura 3-3)²⁷ y existen diferentes aplicaciones para realizar la descarga de la información.

Figura 3-3: Satélites de la NASA



Fuente: NASA

Giovanni (por sus siglas en inglés de [Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure](https://science.nasa.gov/earth-science)) es una aplicación web desarrollada por el Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) que provee de una forma simple e intuitiva para visualizar, analizar y acceder a numerosos datos de variables terrestres producidas por sensores remotos.

[Giovanni](https://science.nasa.gov/earth-science) es la interface web de la NASA que provee información de varios satélites para todas las zonas del mundo, permite examinar los datos satelitales con una resolución espacial reducida a la zona de estudio, cuenta con serie de datos de:

- Precipitación
- Temperatura de superficie
- Evaporación y evapotranspiración

²⁷ Satélites que monitorean la tierra. <https://science.nasa.gov/earth-science>

- Química atmosférica
- Temperatura atmosférica, entre otros

Los satélites son usados cada vez más para obtener información de ciertos contaminantes, dichos datos son aplicados principalmente en el seguimiento de plumas de contaminación, como apoyo en los pronósticos de calidad del aire, evidencia de eventos extraordinarios y como apoyo a los modelos de calidad del aire. Sin embargo, sus aplicaciones aún son algo limitadas y dependen en gran manera de las plataformas que se utilicen en el post-procesamiento de datos²⁸.

Las mediciones satelitales de calidad del aire son una herramienta complementaria para evaluar la tendencia de la calidad del aire debido a que es posible descargar información de series de datos de varios años, sin embargo, la relación no es directa entre las mediciones de calidad del aire en superficie y las mediciones satelitales, por ejemplo cambios en las emisiones de PM_{2.5} no necesariamente resultan en cambios en la contaminación de PM_{2.5} en la superficie debido a otros factores como producción atmosférica y meteorología, pero son una aproximación al problema en los casos donde no se cuenta como mediciones en superficie. En el caso de las ciudades donde el BDAN desarrollo “EL PROGRAMA” se seleccionó el área de cada ciudad a partir de los pixeles que permite seleccionar NASA-GIOVANNI²⁹ (Figura 3-4).

Figura 3-4: Mapa del área seleccionada en cada ciudad para los datos satelitales (NASA Giovanni)



CINPRO con imágenes de NASA Giovanni

3.5. Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en México. Cuenta con una red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) y una red de Estaciones Sinópticas Meteorológicas (ESIME) distribuidas en el territorio nacional. El área representativa de las estaciones es de 5 km de radio aproximadamente, en terreno plano, excepto en terreno montañoso. Los registros se guardan en

²⁸ (Bryan N. Duncan, 2014). Satellite data of atmospheric pollution for U.S. air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid (Datos satelitales de la contaminación atmosférica para aplicaciones de calidad del aire de EE. UU.: Ejemplos de aplicaciones, resumen de los recursos del usuario final de datos, respuestas a preguntas frecuentes y errores comunes para evitar). Atmospheric Environment. Pags. 647-662.

²⁹ (Giovanni, 2021) <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

horario TUC o UTC (Tiempo Universal Coordinado), por lo que se debe tener en cuenta para la correcta interpretación de los datos desplegados en cada región.

En cada estación se monitorea la velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica, temperatura, humedad relativa, radiación solar y precipitación pluvial. Se cuenta con una estación en cada ciudad en los estados considerados en “EL PROGRAMA”, con excepción de Tijuana, por lo cual se emplean los datos de Tecate como referencia. En algunos casos es posible utilizar redes de meso escala que no opera el SMN. Estas redes pueden proporcionar datos en series de tiempo variadas y casi siempre discontinuas y en lo general no fueron validadas mediante algoritmos convencionales de control de calidad.

3.6. Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiente (NOM-SSA1)

Las normas oficiales mexicanas de salud ambiental se establecen para evaluar la calidad el aire ambiente en el territorio nacional y están definidas para los contaminantes criterio (ozono –O₃–, monóxido de carbono –CO–, dióxido de nitrógeno –NO₂–, dióxido de azufre –SO₂–, material particulado menor a 10 micrómetros –PM₁₀–, material particulado menor a 2.5 micrómetros –PM_{2.5}–, y plomo); se requiere contar con información completa por año calendario (de enero a diciembre) para evaluar el cumplimiento por contaminante criterio.

En el desarrollo de este estudio, sólo se considerarán los límites de los contaminantes monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀) y partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}), que son los contaminantes relacionados con las emisiones de vehículos. A continuación, se presentan los valores límite relacionados con cada contaminante de interés (Figura 3-5).

Figura 3-5: Normas Oficiales Mexicanas, Salud Ambiente (2020)

Contaminante	NOM	Valor límite	Indicador	Especificaciones
Monóxido de carbono (CO)*	NOM-021-SSA1-1993 D.O.F. 23 de diciembre de 1994 (Diario Oficial de la Federación (DOF), 1994a).	11 ppm	Máximo anual de promedios móviles de 8 horas	Promedio horario con al menos 45 minutos de datos válidos en la hora; promedio móvil de 8 horas con al menos 6 horas de datos válidos. Concentración anual con al menos el 75% de los registros al año.
	PROY-NOM-021-SSA1-2020 D.O.F. 17 de diciembre de 2020. (DOF, 2020a)	26.0 ppm	Máximo de las concentraciones horarias	
		9.0 ppm	Máximo de los promedios móviles de 8 horas	
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)*	NOM-023-SSA1-1993 D.O.F. 23 de diciembre de 1994 (DOF, 1994b).	0.210 ppm	Máximo anual de los promedios horarios	Promedio horario con al menos 45 minutos de datos válidos en la hora. Concentración anual con al menos el 75% de los registros al año.
	PROY-NOM-023-SSA1-2020 D.O.F. 28 de septiembre de 2020 (DOF, 2020b).	0.106 ppm	Máximo anual de los promedios horarios	
		0.021 ppm	Promedio anual de los promedios horarios	
Partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)	NOM-025-SSA1-2014 D.O.F. 20 de agosto de 2014. (DOF, 2014)	75 µg/m ³	Máximo de los promedios de 24 horas	Promedio horario con al menos 45 minutos de datos válidos en la hora; promedio diario con al menos 18 horas de datos válidos. Concentración trimestral con al menos 75% de datos diarios en el trimestre. Concentración anual con al menos tres trimestres válidos.
		40 µg/m ³	Promedio anual de los promedios horarios	
Partículas suspendidas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	NOM-025-SSA1-2014 D.O.F. 20 de agosto de 2014. (DOF, 2014)	45 µg/m ³	Máximo de los promedios de 24 horas	Si el monitoreo no se realiza diariamente, se tomará como base el número de muestreos calendarizados por trimestre y anual.
		12 µg/m ³	Promedio anual de los promedios horarios	

*Durante el año 2020 se publicó el proyecto de modificación de los límites de la NOM, aunque no se evalúa en este proyecto se les da difusión.

3.7. Índice de Calidad del Aire y Salud

La norma oficial mexicana *NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud*, publicada en el DOF el 20/11/2019, permite contar con una referencia nacional para comparar los niveles de contaminación de la calidad del aire cada hora del año y en diferentes lugares, los riesgos a la salud y las medidas de protección que deberán difundirse a la población. La Figura 3-6 representa los valores relacionados con los intervalos del Índice de Calidad del Aire y Salud por contaminante³⁰.

Figura 3-6: índice de Calidad del Aire y Salud (2019)

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	PM ₁₀ (µg/m ³) pmp 12h	PM _{2.5} (µg/m ³) pmp 12h	O ₃ (ppm) pm 8h	NO ₂ (ppm) p 1h	SO ₂ (ppm) pm 24h	CO (ppm) pm 8h
Buena	Bajo	[0, 50]	[0, 25]	[0, 0.051]	[0, 0.107]	[0, 0.008]	[0, 8.75]
Aceptable	Moderado	(50, 75]	(25, 45]	(0.051, 0.070]	(0.107, 0.210]	(0.008, 0.110]	(8.75, 11.00]
Mala	Alto	(75, 155]	(45, 79]	(0.070, 0.092]	(0.210, 0.230]	(0.110, 0.165]	(11.00, 13.30]
Muy Mala	Muy Alto	(155, 235]	(79, 147]	(0.092, 0.114]	(0.230, 0.250]	(0.165, 0.220]	(13.30, 15.50]
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	> 235	>147	>0.114	>0.250	>0.220	>15.50

En el caso de no contar con datos para la evaluación se deja la celda vacía en color blanco.
pmp = promedio móvil ponderado; pm = promedio móvil; p = promedio; h = horas

Notación de intervalos: un *intervalo cerrado* es aquel que incluye los puntos finales y se define por medio de corchetes “[]”, por ejemplo: [0, 50]; un *intervalo abierto* es aquel que no incluye los puntos finales y se define por medio de paréntesis “()”, por ejemplo: (0, 50); también puede haber combinación entre ellos “[,]”, “[,)” y se les conoce como intervalo semiabierto por la izquierda (0, 50] o semiabierto por la derecha [0, 50). También se tiene la representación con los símbolos menor que “<”, por ejemplo: <50, menor o igual que “≤”, por ejemplo: ≤50; mayor que “>”, por ejemplo: >50; o mayor o igual que “≥”, por ejemplo: ≥50.

CINPRO con información de la NOM-172-SEMARNAT-2019

Aunque la norma indica que se deberá publicar el Índice Aire y Salud en los sitios de monitoreo que tengan como objetivo evaluar los niveles de exposición de la población, se evaluó en todos los sitios de monitoreo que contaron con información ya que no se cuenta con información de los objetivos de cada sitio (condición establecida en la NOM-156-SEMARNAT-2012³¹). Como ya se comentó, sólo se consideran los contaminantes CO, NO₂, PM₁₀ y PM_{2.5}, por lo que se evaluará el Índice Aire y Salud sólo en estos contaminantes.

Por otro lado, con el propósito de visualizar de manera comparativa la calidad del aire en los diferentes años (2010 a 2019), se construyó el *mosaico de calidad del aire* (considerado como un calendario reorganizando las fechas por semana) con el valor máximo del Índice de Calidad del Aire y Salud por día en cada ciudad. Un mosaico de calidad del aire permite identificar patrones en las concentraciones a partir de los niveles de la calidad del aire: Buena, Aceptable, Mala, Muy Mala y Extremadamente Mala, y corroborarlos a largo de los años. Así mismo, permite identificar si se definen periodos o épocas (época de lluvias, época de secas). La manera de leer un mosaico de calidad del aire es por columnas que representan las semanas, se ubican los días de la semana por renglones y de forma consecutiva se van organizando las 52 o 53 semanas del mismo año, por ejemplo: el 01/01/2010 se registró en día viernes, por lo que la primera semana solo registra los días viernes a domingo (1 a 3 de enero) y el resto se organiza en las siguientes columnas de lunes a

³⁰ (DOF, 2019) *NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019

³¹ Ibidem

domingo. La Figura 3-7 muestra la distribución de las fechas para los meses de enero y febrero de 2010 en el mosaico de calidad del aire^{32, 33}.

Figura 3-7: Distribución de fechas en el mosaico de calidad del aire y salud (enero-febrero, 2010)

		Ene					Feb			
Año	Día de la semana	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
2010	Lunes		04/01	11/01	18/01	25/01	01/02	08/02	15/02	22/02
	Martes		05/01	12/01	19/01	26/01	02/02	09/02	16/02	23/02
	Miércoles		06/01	13/01	20/01	27/01	03/02	10/02	17/02	24/02
	Jueves		07/01	14/01	21/01	28/01	04/02	11/02	18/02	25/02
	Viernes	01/01	08/01	15/01	22/01	29/01	05/02	12/02	19/02	26/02
	Sábado	02/01	09/01	16/01	23/01	30/01	06/02	13/02	20/02	27/02
	Domingo	03/01	10/01	17/01	24/01	31/01	07/02	14/02	21/02	28/02

CINPRO con información de SCICA-INECC, SEST

3.8. Tecnología vehicular y emisiones vehiculares (Inventario de Emisiones)

Los Inventarios de Emisiones son una herramienta clave para gestionar la calidad del aire, dado que permiten integrar la información de diferentes fuentes de emisión y los aportes de contaminantes en un tiempo y espacio determinados; se identifican y ubican las fuentes con sus emisiones, dando lugar al diseño de programas y acciones para su control, las necesidades técnicas y requerimientos tecnológicos, su relación costo-efectividad y modelar su impacto en términos de la calidad del aire en el futuro. Una de las principales fuentes de emisión de contaminantes al aire son los vehículos automotores, ya que, de acuerdo al inventario nacional de emisiones para México en 2016. El 62% de las emisiones de CO y el 39% de las emisiones de NO_x son generadas por las fuentes móviles. En 2016 en el país la flota vehicular con placa federal de autobuses, contaba 76,708 autobuses federales, en cuanto a la estatal se tenía 128,833 autobuses.³⁴

Sin embargo, la estimación de las emisiones de contaminantes provenientes de las fuentes móviles requiere de una gran diversidad y detalle de la información, con la finalidad de representar con menor incertidumbre posible factores como la cantidad de vehículos, edad, uso y características técnicas, entre otros. Entre más detalle se tenga de la información requerida, mayor será la certidumbre del inventario y la confianza que se tenga para utilizar los resultados.

Actualmente la emisión de carbón negro es de gran interés para los gobiernos, por lo que se ha desarrollado un mercado muy variado de tecnologías de tratamiento de emisiones provenientes de los vehículos a diésel. Entre estas tecnologías de control de emisión, principalmente de material particulado, se encuentra los filtros de partículas, los cuales están diseñados para atrapar una parte importante (alrededor del 90%) de las emisiones de partículas de carbón negro. Los sistemas de control de emisiones son utilizados en países como Estados Unidos, Europa y así, en donde el avance en sus tecnologías, vehículos y de calidad de combustible, ha permitido la introducción de los sistemas de control de emisiones para vehículos pesados.

Las emisiones de partículas de un vehículo a diésel dependen de numerosos parámetros, como por ejemplo del tamaño, tiempo y modo de operación, calidad del combustible, los cuales varían en condiciones reales de operación. Este es el caso de los vehículos que circulan fuera de carretera, por lo que es necesario estimar la emisión de contaminantes, así como probar la eficacia de las tecnologías para el tratamiento de emisiones a través del muestreo de una amplia gama de parámetros de operación de los vehículos a diésel en condiciones reales de funcionamiento.

³² (INECC, 2021) <http://scica.inecc.gob.mx/exec/datadl> Recuperado en agosto 2020.

³³ (Subsecretaría de Desarrollo sustentable y Secretaría de Economía Sustentable y Turismo. Gobierno de Baja California. (SEST), 2021) Subsecretaría de Desarrollo Sustentable y Secretaría de Economía Sustentable y Turismo. Gobierno de Baja California.

³⁴ (SEMARNAT a, 2019) <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>

4. Monitoreo a exposición de contaminantes en Cd. Juárez, Chihuahua

Ciudad Juárez es la cabecera del Municipio de Juárez en el Estado de Chihuahua, se localiza en el norte de la República Mexicana en las coordenadas geográficas -106°29'13" Longitud, 31°44'22" Latitud y 1,127 msnm. Ubicación geográfica que la sitúa dentro del desierto de Chihuahua, el cual es una de las principales fuentes de aerosoles minerales en América del Norte. El municipio de Juárez representa el 1.5% de la superficie del Estado de Chihuahua. Colinda al norte con los estados norteamericanos de Texas y Nuevo México; al este con Texas y el municipio de Guadalupe; al sur con los municipios de Guadalupe, Villa Ahumada y Praxedis Guerrero; y al oeste con el municipio de Ascensión.

El municipio de Juárez cuenta con una población de 1'512,450 habitantes en 2020³⁵ concentrándose la mayoría en Ciudad Juárez (99.3%) y cuenta con 142 localidades; es el primero en tamaño del Estado de Chihuahua.

Ciudad Juárez es una de las ciudades con climas más extremos de la nación, con fuertes vientos que alcanzan los 100 km/h en los meses de marzo, abril y mayo. Mientras que las temperaturas mínimas invernales han caído a los -23°C. y en verano han llegado a 46°C.

De acuerdo al estudio "Diseño operacional de las rutas troncales 1 y 2 del sistema integrado de transporte Ciudad Juárez 2019"³⁶ existen 70 rutas en operación (1 ruta troncal y 69 rutas convencionales). La flota actual tiene 1,140 autobuses convencionales con capacidad para 70 pasajeros y 61 autobuses de la troncal con capacidad para 90 pasajeros. La edad promedio de los autobuses convencionales es 19.9 años y 2.9 años en los autobuses de la troncal.

4.1. Metodología

Para evaluar el nivel de exposición de los usuarios y transeúntes a las emisiones de los vehículos del transporte público, y a las posibles mejoras relacionadas con el uso de nuevos vehículos de bajas emisiones, se diseñó una campaña de evaluación de exposición personal utilizando monitores portátiles. Esta evaluación considera los autobuses de transporte público que han sido sustituidos o ampliados con el financiamiento del BDAN.

4.1.1. Diseño de la campaña de monitoreo

Para la ejecución de esta subtarea existieron distintas variables a tomar en cuenta, dadas las condiciones de salud resultado de la pandemia ocasionada por el virus SARS-CoV-2 (coronavirus del síndrome respiratorio agudo grave tipo 2) a nivel mundial, fue necesario que para realizar el trabajo de campo se contará con condiciones adecuadas de salud contando con semáforo amarillo en Ciudad Juárez para poder llevar a cabo la campaña; además de la representatividad de la actividad de transporte en la ciudad, y condiciones meteorológicas apropiadas. Para lo cual fue necesario realizar un análisis para coordinar y determinar los sitios y rutas de transporte a muestrear y las fechas de la ejecución de la campaña.

4.1.1.1. Selección de la época representativa para el monitoreo en Ciudad Juárez, Chih.

Se solicitó la información de datos meteorológicos histórico de las estaciones ubicadas en la región del municipio de Juárez, al Ayuntamiento de Ciudad Juárez, a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), y al SMN. Derivado de ello se realizó un análisis meteorológico para identificar los

³⁵ (INEGI, 2021) Censo de Población y Vivienda 2020.

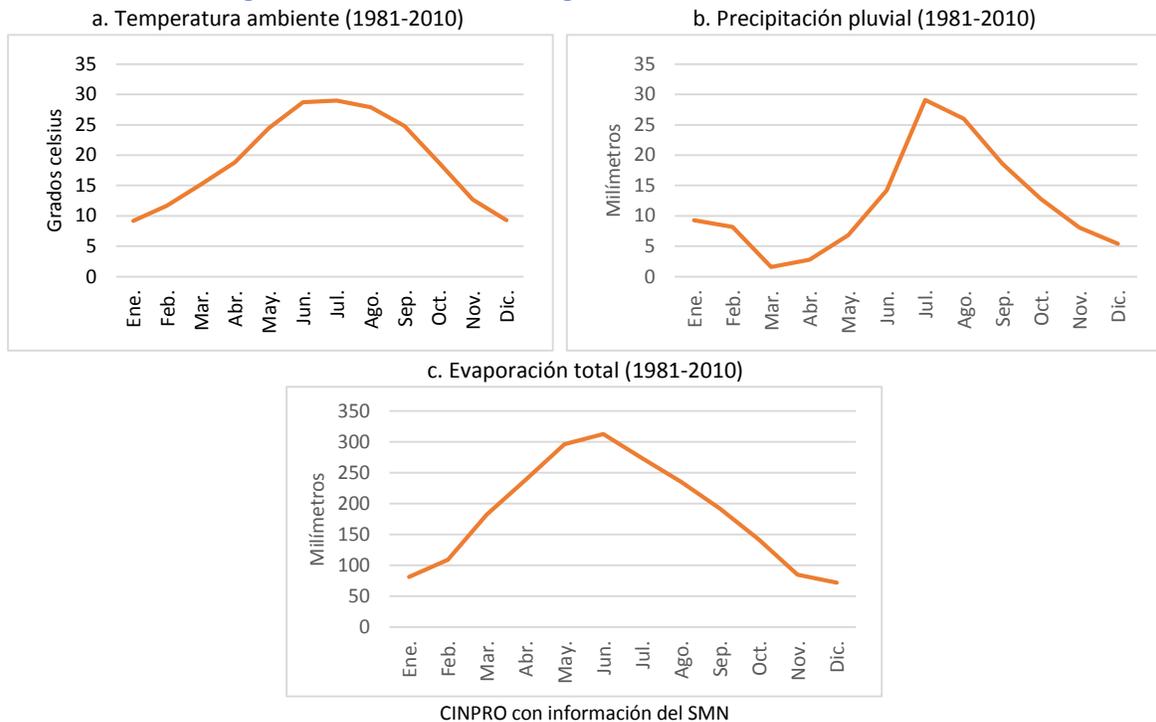
<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Tabulados>

³⁶ (Secretaría de desarrollo urbano y ecología (SDUE) y Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), 2019). Diseño operacional de las rutas troncales 1 y 2 del sistema integrado de transporte Ciudad Juárez 2019.

meses más representativos, donde no haya interferencias por lluvia, o eventos climáticos poco representativos de la ciudad para llevar a cabo la campaña de muestreo. Por otro lado, es durante los meses de septiembre y octubre que la altura de la capa límite planetaria se mantiene en los niveles más bajos (3 km a 4.5 km) y con ello se pueden incrementar las concentraciones a las que se expone la ciudadanía.

En la Figura 4-1 se presenta el comportamiento de las normales climatológicas de algunas variables meteorológicas con datos del periodo 1981-2010³⁷. Las gráficas muestran que la época seca fría en el periodo de noviembre a enero presenta una mejor estabilidad en las variables meteorológicas.

Figura 4-1: Normales climatológicas en Ciudad Juárez, Chihuahua.



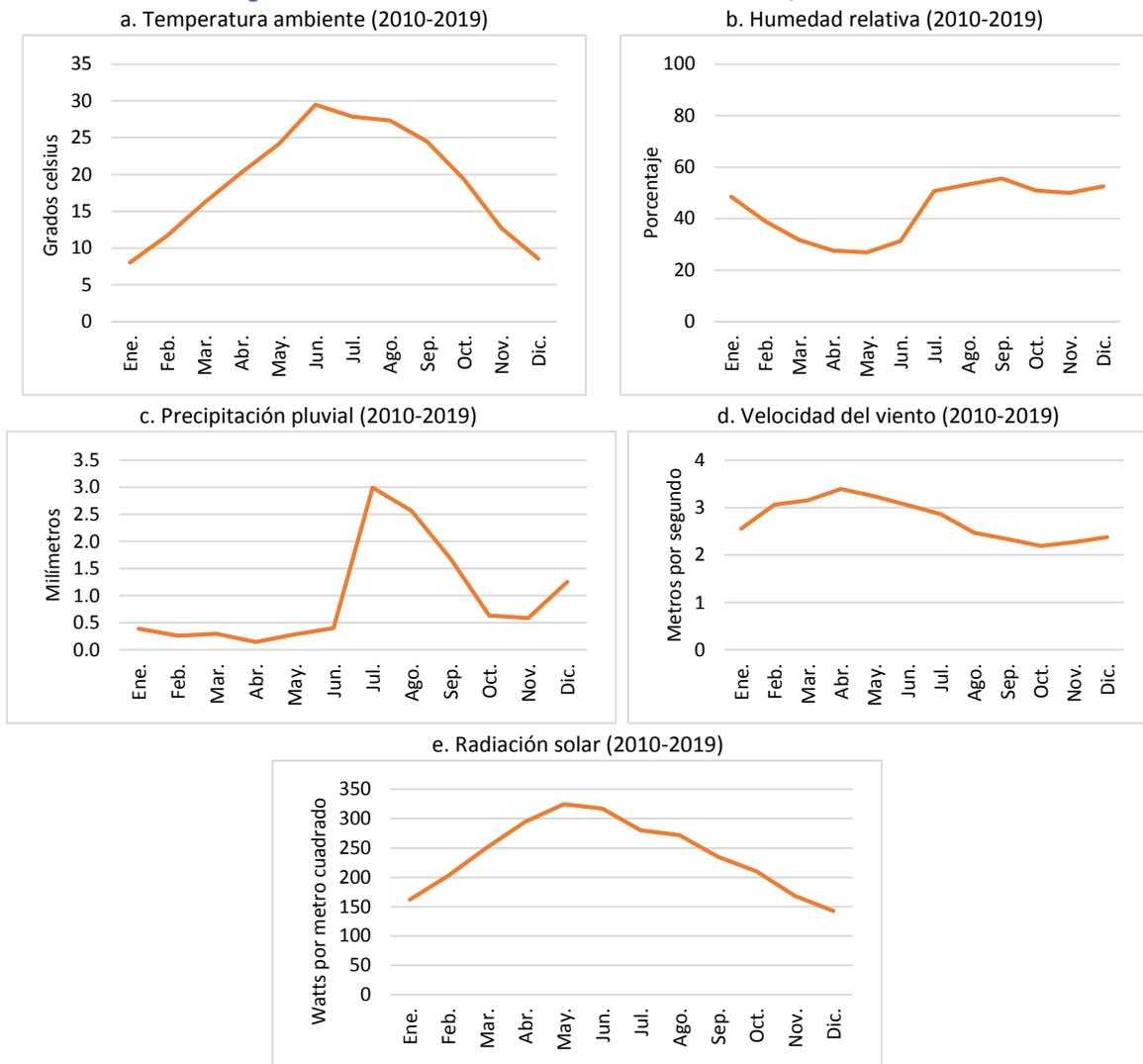
En complemento con lo anterior y con el fin de definir el periodo de muestreo se hizo un análisis del comportamiento para el periodo 2010-2019, se calcularon las medias a partir de los datos que proporcionó el SMN. Se analizaron la temperatura, humedad relativa, precipitación pluvial, radiación solar, y velocidad del viento, mismos que se presentan en la Figura 4-2³⁸, lo cual muestra que la temperatura y radiación solar presentan los promedios más bajos en los meses de diciembre y enero, mientras que en la precipitación pluvial y la humedad relativa es menor en el mes de febrero, la presión barométrica se mantiene constante y la velocidad del viento incrementa un poco en el mes de febrero.

³⁷ (Sistema Meteorológico Nacional. SMA, 2012). Normales Climatológicas por Estado

<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>

³⁸ (SMN, 2020). Sistema Meteorológico Nacional. Bases de datos sobre parámetros meteorológicos de Cd. Juárez, Tijuana, ZMM y Hermosillo 2010-2019 Información solicitada por Oficio <https://smn.conagua.gob.mx/es/variables-meteorologicas>

Figura 4-2: Medias de 2010 a 2019 en Ciudad Juárez, Chihuahua.



CINPRO con información del SMN

Finalmente, el periodo de noviembre a enero es el más adecuado para la ejecución de la campaña y derivado del semáforo por la pandemia en la Ciudad la campaña de monitoreo se ejecutó en el mes de febrero de 2021.

4.1.1.2. Selección de rutas

Se solicitó la información de las rutas de transporte público a las instituciones responsables en Ciudad Juárez, para el diseño del monitoreo, mismo que contiene el parque vehicular del transporte público (autobuses) de 2019 por tipo de combustible, procedencia (importado al país o nacional), marca, submarca, año modelo, carrocería, año de sustitución de la unidad y tecnología vehicular por ruta.

Se identificaron las rutas de transporte que tiene la ciudad, y se ubicaron aquellas de interés en esta subtarea (“unidades nuevas”, “unidades mixtas” y “unidades antiguas”). Además del patrón de actividades de los concesionarios del transporte público, a partir de la información que proporcionó la oficina de transporte del Gobierno de Chihuahua. En la Figura 4-3. se describen los 3 tipos de paradas de camión y rutas. Las paradas de camión se determinaron mediante el análisis de aforos de pasajeros o en su defecto en las bases o paradero de las rutas (terminal).

Figura 4-3: Descripción de los tipos de paradas y rutas analizadas.

Sitios	Descripción
Unidades nuevas: BRT1 Lugar: Smart Aeropuerto Latitud 31.6576, Longitud -106.43051	Circulan autobuses nuevos, con tecnología de bajas emisiones.
Unidades mixtas: Línea 5 A Pantoja Lugar: Gran Patio Zaragoza Latitud 31.65953, Longitud -106.44191	Circulan autobuses de tecnología nueva con cinco o más años de uso, mezclados con autobuses antiguos con tecnologías pasadas.
Unidades antiguas: Línea 8A Futurama Lugar: Smart López Mateos Latitud 31.711151, Longitud -106.45260	Circulan únicamente autobuses de modelos antiguos

Considerando los parámetros de la **Figura 4-4**³⁹**Figura 4-4: Parámetros para un día hábil en la situación base (2018)**

, del recorrido promedio diario (RPD) y los abordajes diarios de la ruta, los cuales sirven para estimar los índices de pasajeros por bus por día (PBD), los kilómetros por bus por día (KBD) y el índice de pasajeros por kilómetro (IPK). Se hizo al análisis de las rutas.

Figura 4-4: Parámetros para un día hábil en la situación base (2018)

No	ID	Ruta	Veh Tipo	Flota Oper	Abordos (pa/día)	RPD (km/día)	PBD	KBD	IPK
1	r0101	PaseoDeLaVictoria	Bus70	13	5,139	3,725	395	287	1.38
2	r0102	Morelos	Bus70	16	8,798	4,287	550	268	2.05
3	r0103	Jilotepec-Tradiciona	Bus70	15	5,150	3,748	343	250	1.37
4	r0104	Jilotepec-Unitec	Bus70	30	9,888	7,514	330	250	1.32
5	r0201	Jilotepec-CesareoSan	Bus70	12	3,370	3,176	281	265	1.06
6	r0302	Jazmines	Bus70	4	1,101	627	275	157	1.76
7	r0401	Sierra	Bus70	9	1,891	1,347	210	150	1.4
8	r0402	Chihuahua-HimnoNacion	Bus70	8	2,581	1,166	323	146	2.21
9	r0403	Chihuahua-ECampa	Bus70	4	2,770	504	692	126	5.49
10	r0404	Arroyo	Bus70	4	1,357	437	339	109	3.1
11	r0405	BarrioAlto	Bus70	4	679	512	170	128	1.33
12	r0406	Figueroa	Bus70	4	2,770	521	692	130	5.32
13	r0501	Periodista	Bus70	17	13,203	3,657	777	215	3.61
14	r0502	Fronteriza-Por16DeSe	Bus70	5	1,802	1,075	360	215	1.68
15	r0601	Escobedo-PorAltamira	Bus70	7	1,991	1,072	284	153	1.86
16	r0701	Izquierda-PorArriba	Bus70	6	1,791	1,094	298	182	1.64
17	r0703	Navarro	Bus70	10	1,446	2,062	145	206	0.7
18	r0704	Izquierda-PorAbajo	Bus70	6	6,107	937	1,018	156	6.52
19	r0705	Zapata	Bus70	8	5,951	1,180	744	147	5.05
20	r0706	Derecha	Bus70	9	2,225	1,618	247	180	1.37
21	r0801	Maquillas	Bus70	7	8,531	1,532	1,219	219	5.57
22	r0802	Rivereno(Circuito)	Bus70	4	5,272	1,056	1,318	264	4.99
23	r0902	Cereso-RutaNueva	Bus70	28	3,415	5,358	122	191	0.64
24	r0903	Cereso-Colinas	Bus70	8	1,535	1,507	192	188	1.02
25	r0904	Pantoja	Bus70	29	19,365	6,893	668	238	2.81
26	r0905	Colectivo5APlus	Bus70	8	323	1,257	40	157	0.26
27	r1001	Revolucion-PorEjeVia	Bus70	8	2,236	1,599	279	200	1.4
28	r1002	Tercera-PorEje	Bus70	7	2,681	1,547	383	221	1.73
29	r1003	Granjas-PorPavo	Bus70	7	5,105	1,618	729	231	3.16
30	r1004	Granjas-PorFelipe	Bus70	8	1,435	1,666	179	208	0.86
31	r1005	Tercera-PorCurva	Bus70	9	4,182	1,668	465	185	2.51
32	r1202	Morelos-Ojitos	Bus70	6	779	893	130	149	0.87
33	r1203	Mirador	Bus70	4	1,390	731	348	183	1.9
34	r1204	Mexico68	Bus70	6	2,291	1,211	382	202	1.89
35	r1301	Curva	Bus70	13	6,062	2,590	466	199	2.34

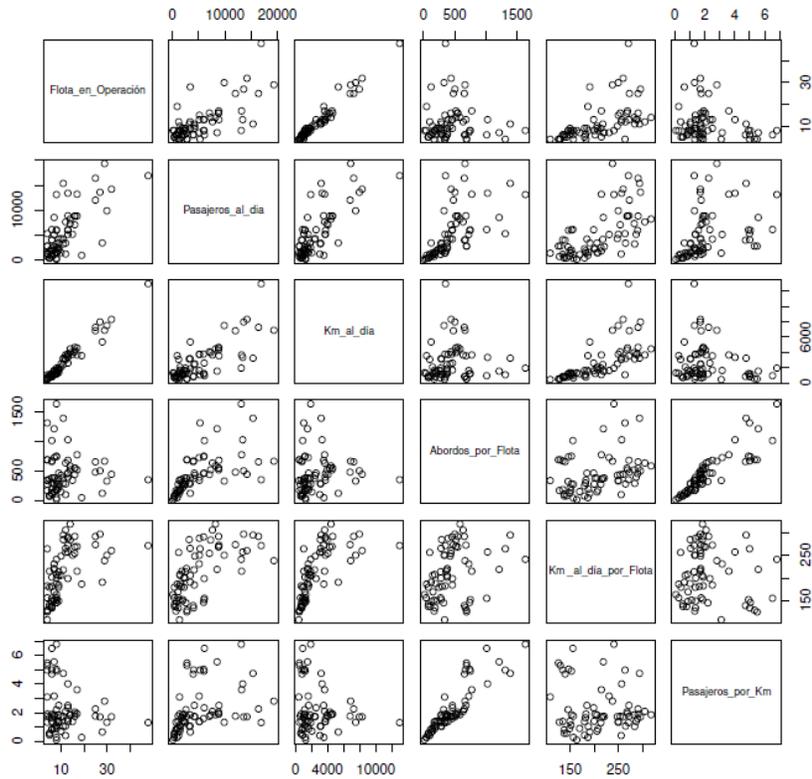
³⁹ (Secretaría de desarrollo urbano y ecología (SDUE) y Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), 2019). Diseño operacional de las rutas troncales 1 y2 del sistema integrado de transporte Ciudad Juárez 2019.

No	ID	Ruta	Veh Tipo	Flota Oper	Abordos (pa/día)	RPD (km/día)	PBD	KBD	IPK
36	r1302	SeguroNuevo	Bus70	11	4,138	2,396	376	218	1.73
37	r1401	Futura	Bus70	9	2,480	1,929	276	214	1.29
38	r1402	SeguroNuevo	Bus70	9	3,415	1,854	379	206	1.84
39	r1501	Retiro	Bus70	8	6,029	1,224	754	153	4.92
40	r1502	Mesa-Retiro	Bus70	5	389	716	78	143	0.54
41	r1503	Rancho-PorDerecha	Bus70	8	1,357	1,215	170	152	1.12
42	r1504	Rancho-PorIzquierda	Bus70	7	1,057	1,191	151	170	0.89
43	r1505	Avicola-PorAbajo	Bus70	6	3,960	839	660	140	4.72
44	r1506	AvicolaPorArriba	Bus70	6	656	827	109	138	0.79
45	r1507	Sarabia-PorAbajo	Bus70	6	4,038	808	673	135	5
46	r1508	Sarabia-PorArriba	Bus70	6	1,112	809	185	135	1.38
47	r1801	Erendida-Centro	Bus70	32	14,226	8,322	445	260	1.71
48	r1802	Km18-SanLorenzo	Bus70	12	7,642	3,661	637	305	2.09
49	r1803	Km18-Centro	Bus70	25	12,024	6,829	481	273	1.76
50	r1804	Km20-Centro	Bus70	27	13,604	7,981	504	296	1.7
51	r1805	Erendida-SanLorenzo	Bus70	17	8,832	4,579	520	269	1.93
52	r1806	Km20-SanLorenzo	Bus70	14	8,220	4,451	587	318	1.85
53	r1901	TierraNuevall	Bus70	10	4,282	2,485	428	248	1.72
54	r1902	Tribunal-PDelRoble-W	Bus70	48	16,940	12,987	353	271	1.3
55	r1904	LomaBlanca-AguilaDeZ	Bus70	12	1,190	3,068	99	256	0.39
56	r1905	FincaBonita-Villarea	Bus70	11	3,203	3,120	291	284	1.03
57	r2101	Galeana	Bus70	5	378	688	76	138	0.55
58	r2102	Ojitos-PaloChino	Bus70	5	378	902	76	180	0.42
59	r2201	Periodista	Bus70	25	16,429	7,274	657	291	2.26
60	r2202	Arroyo	Bus70	8	13,136	1,930	1,642	241	6.81
61	r2402	Lomas	Bus70	16	7,063	4,066	441	254	1.74
62	r2701	Oasis-Madero	Bus70	8	111	1,309	14	164	0.08
63	r2704	Oasis-Ponciano	Bus70	19	912	3,562	48	187	0.26
64	r2801	Universitaria	Bus70	13	5,940	3,771	457	290	1.58
65	r2901	Riveras-Etapas1-6	Bus70	14	7,297	3,957	521	283	1.84
66	r2902	Riveras-Etapas7-8	Bus70	16	8,821	4,659	551	291	1.89
67	r2903	FrayGarciaDeSanFranc	Bus70	13	13,414	3,338	1,032	257	4.02
68	r2904	TierraNuevall	Bus70	13	8,876	3,539	683	272	2.51
69	r2906	SanFrancisco-LeonaVi	Bus70	11	15,383	3,229	1,398	294	4.76
70	t0101	troncal1	Bus90	52	54,281	14,344	1,044	276	3.78

Para lo cual se realizó un análisis de asociación, mismo que se presenta en la matriz de dispersión de la Figura 4-5⁴⁰. Esto con el objetivo de conocer que parámetros se relacionan entre sí. Esto dio como resultado que los parámetros que caracterizan a un conjunto de rutas son los Kilómetros recorridos y los pasajeros transportados en un día.

⁴⁰ (Secretaría de desarrollo urbano y ecología (SDUE) y Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), 2019). Diseño operacional de las rutas troncales 1 y2 del sistema integrado de transporte Ciudad Juárez 2019.

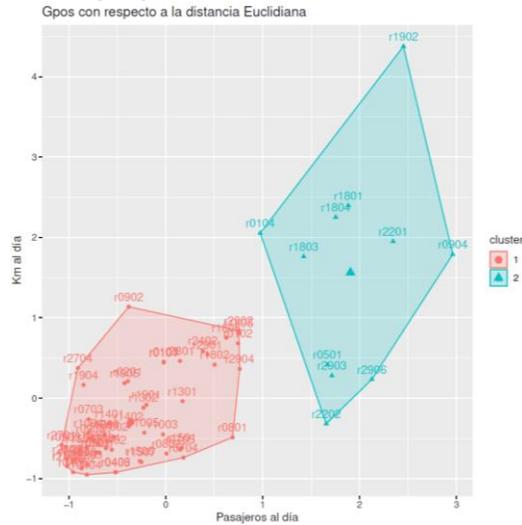
Figura 4-5: Matriz de dispersión



CINPRO con información de UACJ-SDUE

Estos dos parámetros reflejarán las condiciones con mayor asociación y representatividad de las rutas por lo que se realizó un análisis de clúster evaluando diferentes métricas: de correlación, Camberra, Euclidiana, Manhattan y Minkowski, con las distintas rutas de transporte, obteniendo los grupos de rutas que representen las mismas características, en la Figura 4-6 se presentan un ejemplo de los resultados obtenidos, donde se observan dos grupos de las rutas. Haciendo la revisión de los grupos formados se pudo identificar que uno agrupa a las rutas consideradas como unidades mixtas y otro como antiguas.

Figura 4-6: Ejemplo de resultados del análisis de clúster



CINPRO con información UACJ-SDUE

4.1.1.3. Capacitación y logística de la campaña de monitoreo

Se realizó un control de calidad durante la campaña de monitoreo para garantizar los resultados a obtener. El esquema por seguir se presenta en el documento de Aseguramiento y control de calidad del muestreo, anexo a este documento.

Cada uno de los equipos cuenta con un certificado de origen de compra, mismos que garantizan la respuesta de estos equipos a través del tiempo. Adicional a lo anterior, se realizó una comparación de los equipos operándolos lado a lado en un ambiente controlado para evaluar su respuesta (Figura 4-7).

Figura 4-7: Comparación de equipos



4.1.2. Sitios de muestreo

Se realizaron mediciones para determinar las concentraciones de material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 y 10 micrómetros ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), dióxido de carbono (CO_2), formaldehído (HCHO) y monóxido de carbono (CO), al interior de los vehículos empleados para transporte público y en los paraderos de estas mismas rutas. La campaña tuvo una duración de cinco días en el periodo del 11 al 24 de febrero, debido a las condiciones climáticas en Ciudad Juárez, el muestreo no pudo ser continuo se tomaron los días 11, 12, 22, 23 y 24 de febrero abarcando con ello todos los días hábiles de la semana. Haciendo un recorrido por tipo de ruta durante la mañana y otro en la tarde, a las horas pico de 7-10 am y de 5-8 pm.

Para la realización de las mediciones se contó con un grupo de 6 técnicos quienes portaron los analizadores cerca del área respiratoria mientras simulan ser usuarios y transeúntes de cada una de las tres rutas definidas cubriendo el recorrido del transporte público. En la Figura 4-8 se presenta del lado izquierdo los técnicos dentro del BRT1 realizando el recorrido y en el lado derecho se presenta los técnicos simulando los transeúntes en la parada de 8ª Futura.

Figura 4-8. Ejemplo de usuarios y transeúntes



En total, se obtuvieron los resultados de 60 usuarios simulados: un (1) pasajero y un (1) transeúnte por cada una de las tres (3) rutas/zonas seleccionadas, que portaron el monitor dos (2) veces al día (mañana y tarde) en los 5 días de la semana. En la Figura 4-9 se presenta el rol de los muestreos obtenidos por día.

Figura 4-9: Rol de muestras obtenidas por día.

Serie	Ruta	Unidades nuevas	Unidades mixtas	Unidades Antiguas
Matutino	Usuario	1	1	1
	Transeúnte	1	1	1
Vespertino	Usuario	1	1	1
	Transeúnte	1	1	1
<i>Total de personas simulados por ruta</i>		<i>4</i>	<i>4</i>	<i>4</i>

Se obtuvieron datos minutos a minuto en todo el periodo de muestreo, tanto en la ruta como en las paradas donde se tomaron las mediciones, dichos datos se validaron y se realizó el análisis correspondiente para evaluar la exposición de los pasajeros y transeúntes.

En la **Figura 4-10** se presentan los recorridos de las rutas y las paradas en la zona de estudio⁴¹. Y en la **Figura 4-11**

⁴¹ Los mapas se realizaron con el software R, el IDE R-Studio y las librerías ggmap y tidyverse.

Figura 4-11 se presentan las rutas de muestreo definidas, las paradas y los recorridos realizados. La duración promedio de los recorridos de las rutas seleccionadas fueron: Nueva (27 min), mixta (55 min) y antigua (33 min).

Figura 4-10: Recorridos y paradas

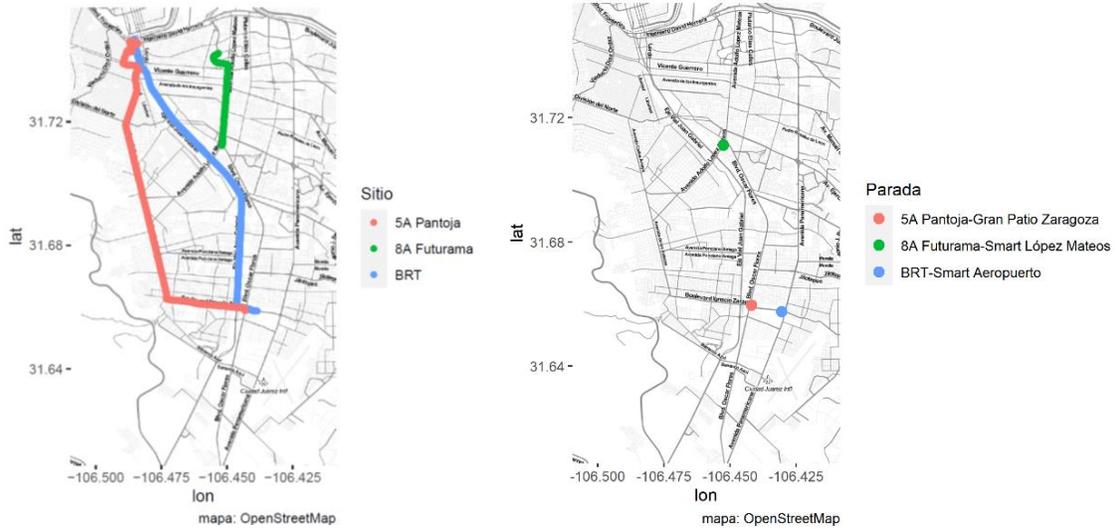


Figura 4-11: Rutas de muestreo



4.1.3. Descripción del equipo de monitoreo

A continuación, se presenta la descripción de los equipos portátiles utilizados durante la campaña de monitoreo de exposición personal que cada uno de los usuarios simulados portaron durante la ejecución de las rutas:



Para la determinación de la concentración de monóxido de carbono (CO), gas (EX) y oxígeno (O₂) se hizo en tiempo real con detectores electroquímicos de calidad del aire, marca WYZXR, modelo BH-4S y los datos generados fueron guardados en el datalogger interno del equipo, mismos que se procesaron posteriormente para la generación de bases de datos. Rango de operación de 0-1000 PPM.



Para la medición de HCHO, PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, temperatura y humedad de muestreo se realizaron con detectores laser y NDIR, marca Temtop, modelo M2000 2nd Generation; los datos generados se guardaron en el datalogger interno del equipo, mismos que se procesaron posteriormente para la generación de bases de datos. El detector cuenta con rangos de operación de PM_{2.5}/PM₁₀: 0~999 µg/m³; HCHO: 0~5 mg/m³; CO₂: 0~5000 PPM.



La ubicación geográfica de los puntos de muestreo en las rutas se determinó con el apoyo de la app Ultra GPS Logger Lite de Google Maps. La aplicación fue instalada en los celulares de los técnicos y con ella se obtuvieron latitud y longitud de los recorridos realizados para cada ruta en tiempo real.

4.2. Resultados de la campaña

Se presentan las concentraciones determinadas a partir de las mediciones realizada durante la campaña de mediciones, por contaminante y ruta de transporte caracterizado.

4.2.1. Partículas PM_{2.5} y PM₁₀

En el caso de las concentraciones de partículas, durante la campaña se realizaron cinco muestreos por sitio durante el horario matutino, y cinco durante el vespertino. En la Figura 4-12 se presenta la estadística descriptiva de las concentraciones determinadas de estas partículas donde se observa que estas concentraciones varían entre un tipo de ruta y otra sin ser concluyentes en cuanto a cuál es más o menos contaminante, debido probablemente a distintos factores como son las condiciones climáticas, el estado de los autobuses (sucios, limpios, con ventilación o cerrados), las fuentes de emisión fuera del autobús que están presentes durante el recorrido.

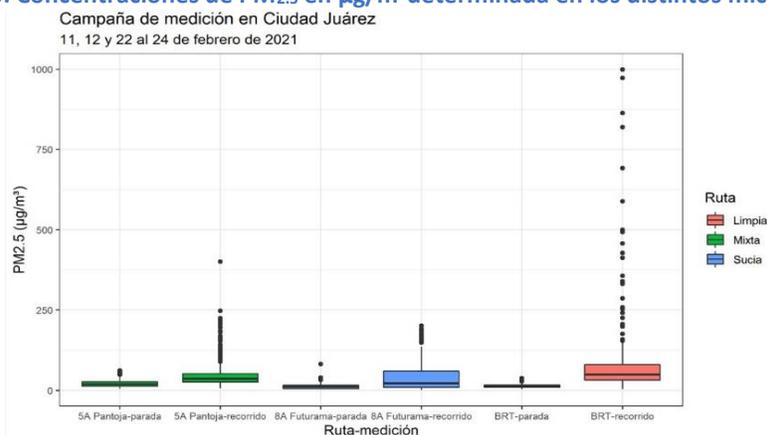
Cabe mencionar que se presenta una diferencia entre las concentraciones promedio medidas en el turno matutino respecto al vespertino, donde se observa que por el turno vespertino las concentraciones promedio medidas son menores a lo encontrado en el turno matutino.

Figura 4-12: Estadística descriptiva de las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ en µg/m³, medidas en los distintos microambientes

Sitio	Tipo de medición	Turno	PM _{2.5}					PM ₁₀				
			MIN	PROM	MAX	DesvEst	# Registros	MIN	PROM	MAX	DesvEst	# Registros
Unidades mixtas	Parada	Matutino	5	21	49	11	291	6	30	70	15	291
		Vespertino	5	24	62	13	206	8	35	92	20	206
	Recorrido	Matutino	10	58	401	50	294	15	92	730	82	294
		Vespertino	7	34	80	14	202	11	54	127	22	202
Unidades antiguas	Parada	Matutino	5	16	82	8	155	5	22	121	13	155
		Vespertino	3	7	40	5	123	4	9	45	6	123
	Recorrido	Matutino	4	65	201	47	163	7	100	323	73	163
		Vespertino	1	15	163	18	141	1	23	244	28	141
Unidades nuevas	Parada	Matutino	7	18	38	7	140	9	26	59	11	140
		Vespertino	4	11	25	4	157	6	16	36	6	157
	Recorrido	Matutino	4	123	999	178	144	7	181	999	225	144
		Vespertino	5	46	140	26	137	7	76	246	44	137

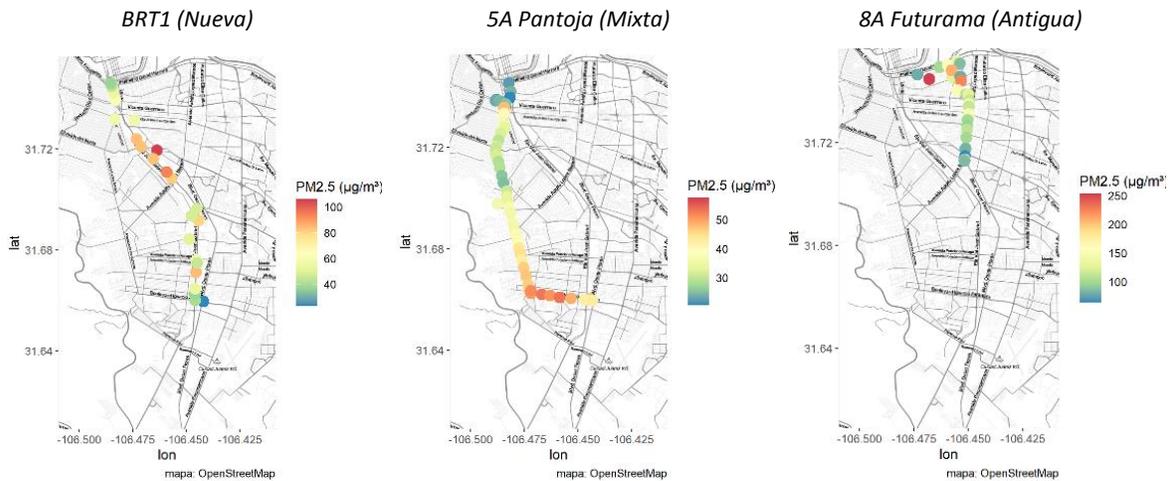
En la Figura 4-13 se presenta el comportamiento de las partículas (PM_{2.5}) en los distintos sitios de muestreo, donde observamos que de manera general los muestreos en las paradas de las rutas presentaron una menor concentración respecto a los usuarios que estuvieron expuestos dentro de cualquiera de los medios de transporte, hay una influencia del viento en la dispersión de contaminantes. De igual forma se observa que las concentraciones de PM_{2.5} presentes en los distintos autobuses muestreados pueden asociarse al tipo y número de fuentes de emisión en cada uno de ellos.

Figura 4-13: Concentraciones de PM_{2.5} en µg/m³ determinada en los distintos microambientes



Con el objeto de identificar la distribución espacial de las concentraciones a las que está expuesta la población usuaria de cada una de las rutas estudiadas, se realizó un mapeo de las concentraciones de $PM_{2.5}$, a partir de su medición continua y con la ayuda del GPS para georreferenciar el recorrido de los autobuses usados de transporte. En la Figura 4-14 se presenta un ejemplo del mapeo de concentraciones de $PM_{2.5}$ hecho el 23 de febrero durante la mañana.

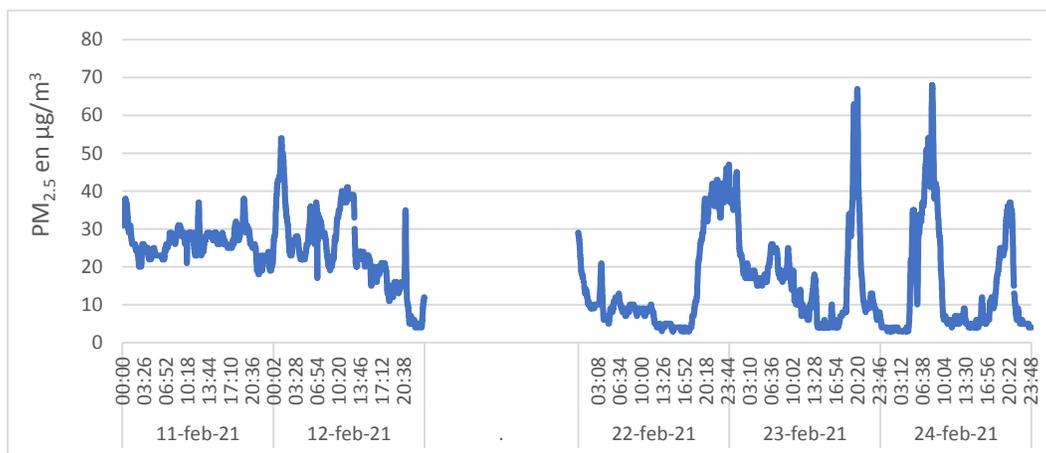
Figura 4-14: Mapeo de los recorridos de las rutas de las concentraciones de $PM_{2.5}$



En los mapas de la figura anterior podemos identificar una contribución en las concentraciones de partículas, al interior de los transportes, por resuspensión de suelos en el extremo sur de las unidades mixta, y al centro de las unidades nuevas donde se encuentran zonas descubiertas de vegetación.

Respecto a las concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ existentes en Ciudad Juárez durante la realización de la campaña, en la Figura 4-15 se presentan los datos medidos en la estación de monitoreo ubicada en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), siendo estas altas de acuerdo a la norma ambiental de calidad del aire.

Figura 4-15: Concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ medidas en la estación UACJ en $\mu g/m^3$



4.2.2. Gases CO, CO₂ y HCHO

El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero, que aunque no está relacionado directamente con la salud, si es un producto directo de la combustión, en el caso del formaldehído el cual es emitido por actividades humanas como el tabaquismo, el uso de gas, y está ligado a la presencia de metano. En la Figura 4-16 se presenta la estadística descriptiva de las concentraciones de los gases medidos, destacando que en promedio las concentraciones de CO₂ en los recorridos fueron mayores que en las paradas, en el caso de las mediciones realizadas en las unidades nuevas fueron menores que en la ruta antigua y mixta; siendo un indicador de la probable exposición de los usuarios en las rutas.

El cuanto a las concentraciones de formaldehído la concentración promedio dentro de los autobuses durante el recorrido de la ruta son mayores que los medidos en las paradas, siendo la unidades nuevas la de mayores concentraciones respecto a las otras rutas, probablemente por el escape de gas natural al interior de los autobuses (Figura 4-16).

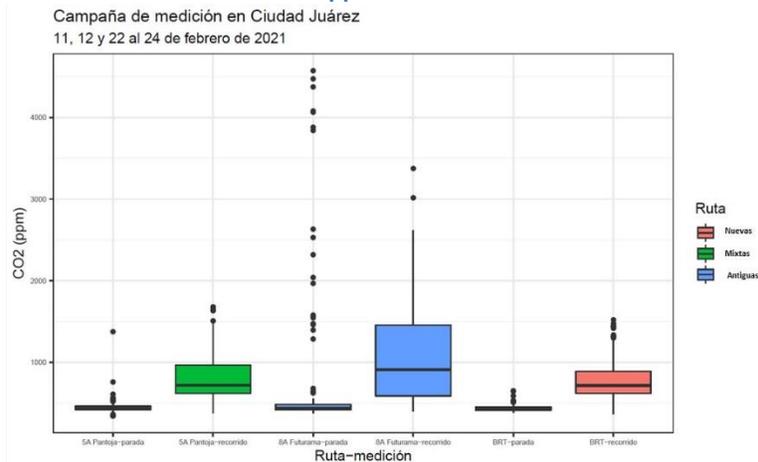
Figura 4-16: Estadística descriptiva de las concentraciones de CO₂ (ppm) y HCHO (mg/m³), medidas en los distintos microambientes

Sitio	Tipo de medición	Turno	CO ₂					HCHO				
			MIN	PROM	MAX	DesvEst	# Registros	MIN	PROM	MAX	DesvEst	# Registros
Unidades mixta	Parada	Matutino	344	425	760	37	291	0.001	0.083	3.471	0.447	291
		Vespertino	401	471	1376	69	206	0.001	0.019	0.358	0.033	206
	Recorrido	Matutino	376	834	1680	269	294	0.001	0.1	0.616	0.132	284
		Vespertino	451	760	1509	213	202	0.001	0.095	0.573	0.103	194
Unidades antigua	Parada	Matutino	375	693	4573	833	155	0.001	0.02	0.178	0.038	155
		Vespertino	406	490	1579	245	123	0.001	0.025	0.354	0.07	123
	Recorrido	Matutino	400	1307	3375	596	163	0.001	0.09	0.538	0.092	163
		Vespertino	406	755	1713	275	141	0.001	0.112	0.778	0.125	141
Unidades nuevas	Parada	Matutino	384	438	493	30	140	0.001	0.014	0.296	0.033	140
		Vespertino	380	435	653	40	157	0.001	0.009	0.081	0.012	157
	Recorrido	Matutino	362	765	1446	206	144	0.001	0.129	0.815	0.155	144
		Vespertino	528	783	1521	234	137	0.001	0.085	0.259	0.051	128

En la Figura 4-17 se presenta el comportamiento de las concentraciones de CO₂ en los distintos sitios de muestreo, donde observamos la ruta Nueva que va de la Zona Centro a Smart Aeropuerto (caracterizada como las unidades nuevas), presenta concentraciones más bajas en el interior de los autobuses; comparado con las unidades mixtas que corre de Gran patio a Zona Centro.

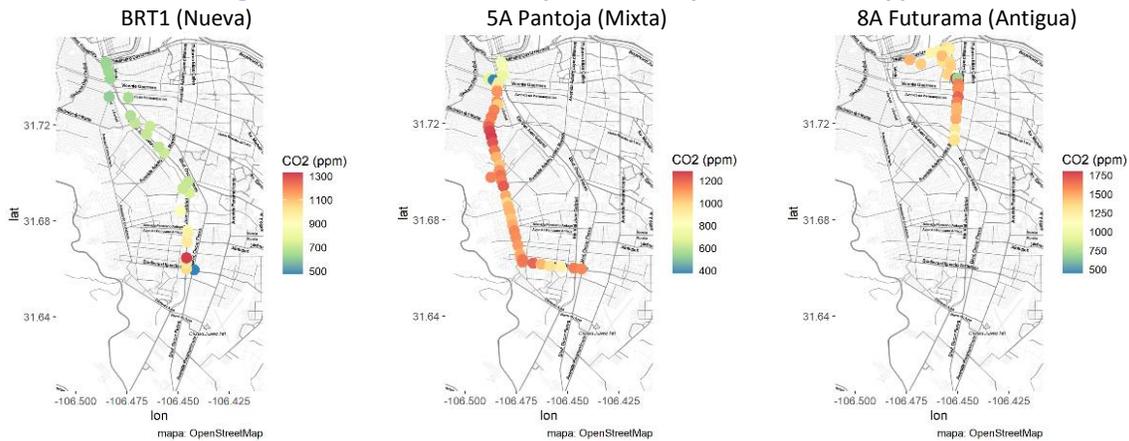
Finalmente las unidades antiguas que va de Simona Barba y Plutarco a Zona Centro. Esto puede ser un indicio que el CO₂ infiere a una mayor exposición de los usuarios a contaminantes atmosféricos en la ruta antigua que es la que cuenta con autobuses más viejos y que utilizan diésel.

Figura 4-17: Concentraciones de CO₂ en ppm determinada en los distintos microambientes



Como se mencionó anteriormente, con el objeto de identificar la distribución espacial de las concentraciones a las que está expuesta la población usuaria de cada una de las rutas estudiadas, se realizó un mapeo de las concentraciones de los contaminantes medidos, a partir de su medición continua y con la ayuda del GPS para georreferenciar el recorrido de los autobuses usados de transporte público. En la Figura 4-18 se presenta un ejemplo del mapeo de concentraciones de CO₂ hecho el 23 de febrero durante la mañana.

Figura 4-18: Concentraciones promedio de partículas CO₂ en ppm



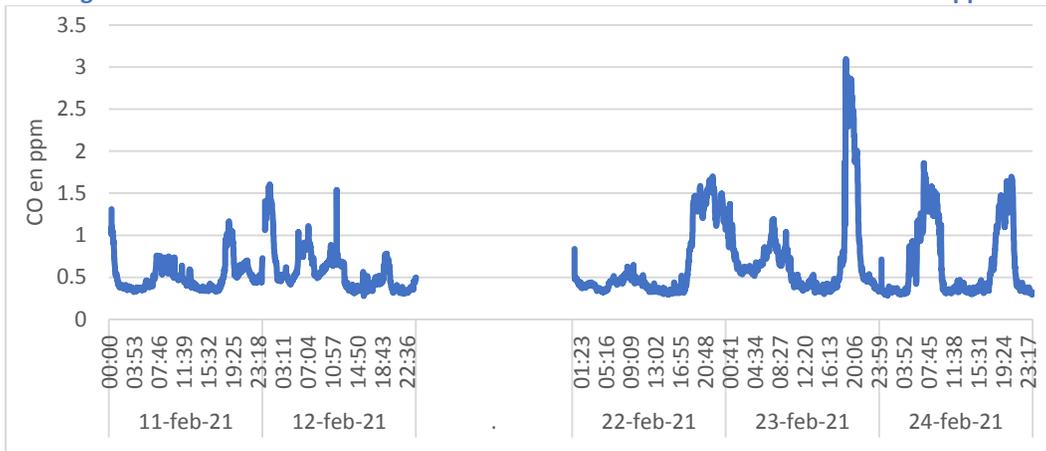
En los mapas se aprecia que en las unidades antiguas y mixtas las concentraciones de CO₂ son constantes y altas durante el recorrido, esto probablemente como resultado de las emisiones generadas en la combustión de los camiones, que utilizan diésel; en contraste las unidades nuevas donde se observa que las concentraciones de CO₂ durante el recorrido son mayormente bajas, salvo al final de la ruta (al sur de la ciudad) donde había un incendio cercano a la ruta y las concentraciones de CO₂ se disparan.

Cabe señalar que las mediciones realizadas de CO en los recorridos dentro de los autobuses y en las paradas fueron muy bajas, por debajo de 1ppm por lo que los datos obtenidos básicamente reportaban cero de concentración.

Respecto a las concentraciones ambientales de monóxido de carbono (CO) existentes en Ciudad Juárez durante la realización de la campaña, en la Figura 4-19 se presentan los datos medidos

en la estación de monitoreo ubicada en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), donde se observa que estas concentraciones son bajas en general en la ciudad.

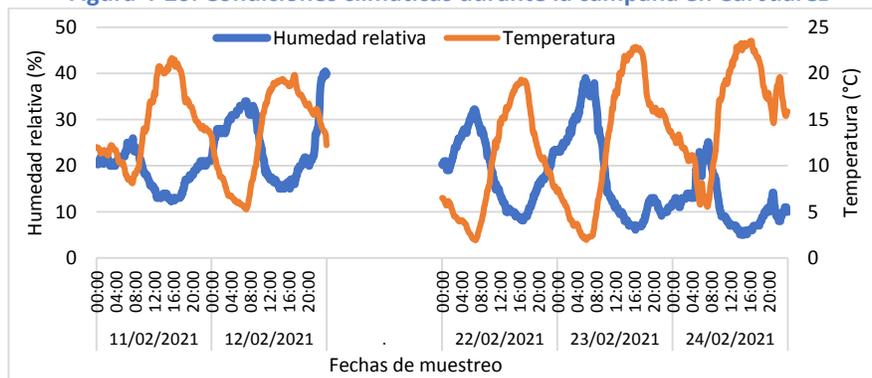
Figura 4-19: Concentraciones ambientales de CO medidas en la estación UACJ en ppm

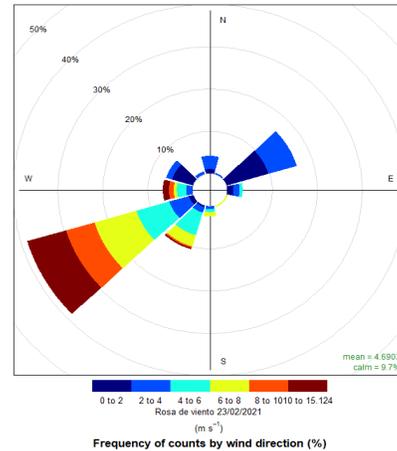
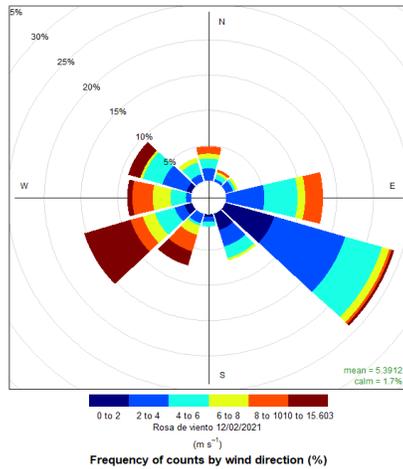


4.2.3. Condiciones climáticas

En la Figura 4-20 se presentan las condiciones climáticas durante la campaña de monitoreo, el 11 y 12 de febrero la temperatura y humedad presentes en la ciudad fueron menos bajas oscilando la temperatura entre 4-22°C y la humedad entre 12-40%; posterior a ello el 15 de febrero nevó en la ciudad por lo que no fue posible continuar con el muestreo retomándose hasta el 22 de febrero donde la temperatura oscilo entre 2 y 22°C y la humedad entre 5-40%. Las velocidades del viento presentes tuvieron máximos en 15 m/s con vientos mayormente del suroeste.

Figura 4-20: Condiciones climáticas durante la campaña en Cd. Juárez





4.3. Discusión de resultados y conclusiones del capítulo

En cuanto a $PM_{2.5}$ existen diversas causas que pueden afectar la concentración de este contaminante en un microambiente como es las condiciones meteorológicas, el uso de aire acondicionado, el tener ventanas abiertas, las diversas fuentes de emisión de partículas presentes por las características propias de una ciudad, entre otras.

Se debe tener en cuenta que las recomendaciones de exposición personal en interiores de acuerdo a la OMS⁴² y la EPA⁴³ para $PM_{2.5}$ es de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un tiempo de exposición de 24 horas, sin embargo en promedio los recorridos realizados en las tres rutas tienen una duración de 38 minutos; por lo que solo se realizó una comparación puntual con lo que recomienda la EPA.

1. Los resultados para la unidades nuevas del BRT1 durante el recorrido presentaron un valor promedio de $84.5 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$, el cual es superior a lo medido en las unidades mixtas y antiguas; esto debido a la influencia de las fuentes de emisión de partículas presentes a lo largo del recorrido de la unidades nuevas, entre las que destacan las obras de construcción que durante el periodo de muestreo se llevan en la ciudad, además de la resuspensión de suelos.
2. Es importante mencionar que las concentraciones de $PM_{2.5}$ determinadas al interior de las unidades nuevas de la ruta troncal BRT1 son consistentes con estudios previos realizados por el INECC en corredores BRT como el Metrobús de la CDMX línea 1, con $112 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ y línea 5 con $92 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ ⁴⁴, en el BRT (Tuzobus) en Pachuca, Hidalgo con $82.4 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ ⁴⁵.
3. Es durante los recorridos donde se alcanzan los niveles más altos de exposición a las $PM_{2.5}$, en el trayecto de la unidades mixta se alcanza un valor promedio de $46 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$, similar a la ruta antigua que alcanzó un valor de $40 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$.
4. Destaca el hecho que en las tres paradas de los tipos de unidades nuevas $14.5 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$, Mixta $22.5 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$, y Antigua $11.5 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$, las concentraciones promedio fueron menores que las obtenidas en los recorridos.

⁴² (WHO, 2010) WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants (Directrices de la OMS para la calidad del aire interior: contaminantes seleccionados). https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf

⁴³ ((EPA), 2021) IAQ Standards and Guidelines (EPA and ASHRAE Standard) (Estandares y guías de calidad del aire en interiores). <https://foobot.io/guides/iaq-standards-and-guidelines.php>

⁴⁴ (INECC-SEMARNAT-JICA, 2013). Exposición personal a carbonilos (aldehídos), CO, BTEX y $PM_{2.5}$ en microambientes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). 2013.

⁴⁵ (INECC-SEMARNAT, 2016a). Elaboración de la línea base de exposición personal a contaminantes atmosféricos en el corredor de transporte masivo Tuzobus en Pachuca, Hidalgo. 2016.

En cuanto a PM₁₀ la OMS y la EPA no cuentan con una guía sobre las concentraciones recomendables de exposición en interiores; por lo que no se hace mención al respecto.

Otros contaminantes

1. En el caso de las concentraciones promedio de CO determinadas en los distintos microambientes las concentraciones estuvieron por debajo de 1 ppm, por lo que no rebasan los valores guía establecidos por la OMS para concentraciones de contaminantes en interiores.
2. Las concentraciones promedio medidas de CO₂ en los distintos microambientes (recorridos) fueron: unidades nuevas (774 ppm), unidades mixtas (797 ppm) y unidades antiguas (1,031 ppm). La EPA que indica que concentraciones arriba de 700 ppm indican una exposición moderada y arriba de 1,500 ppm es insalubre.
3. Las concentraciones promedio medidas en los microambientes (recorridos) de formaldehído (HCHO) fueron: unidades nuevas (0.107 mg/m³), unidades mixtas (0.098 mg/m³) y unidades antiguas (0.101 mg/m³). La recomendación de la OMS y la EPA es concentraciones menores a 0.1 mg/m³ son adecuadas para microambientes en un tiempo de exposición de 30 minutos.

Figura 4-21: Concentración promedio medidos en los diferentes durante la campaña en Cd. Juárez comparado con las guías de calidad del aire en interiores (microambientes) aplicables

Tipo de ruta	PM _{2.5} (µg/m ³)		CO ₂ (ppm)		HCHO (mg/m ³)	
	Valor Promedio	Norma	Valor Promedio	Norma	Valor Promedio	Norma
Mixta	46.0	EPA, 35.5~55.4 [Insalubre para grupos sensibles]	797.0	EPA, 701~1000 [Moderado]	0.098	OMS, ≤ 0.1 [Sano]
Antigua	40.0	EPA, 35.5~55.4 [Insalubre para grupos sensibles]	1,031.0	EPA, 1001~1500 [Insalubre para grupos sensibles]	0.101	OMS, >0.1 [Insalubre]
Nueva	84.5	EPA, 55.5~150.4 [Insalubre]	774.0	EPA, 701~1000 [Moderado]	0.107	OMS, >0.1 [Insalubre]

Recomendaciones

Se recomienda que para poder ser concluyente respecto a las concentraciones a las cuales está expuesta la población usuaria durante sus traslados en los distintos tipos de transporte público (autobuses) existentes en Ciudad Juárez, es necesario realizar un estudio más amplio en número de mediciones, en condiciones de aforo de personas, variables climáticas con menos variación, así como evitar que haya obras de construcción importantes para obtener resultados representativos.

Se recomienda el uso de equipos de muestreo más estables, validados por instituciones acreditadas, ya que los equipos utilizados en la campaña son solo indicativos de las concentraciones presentes, pero son equipos muy inestables ante variables como cambio de condiciones meteorológicas.

5. Comportamiento y tendencia del monitoreo de la calidad del aire

La calidad del aire que nos rodea es resultado de una combinación de factores, que producen cambios en su composición y que puede variar de un momento a otro, por lo que resulta importante analizar las características, propiedades y origen de los contaminantes más importantes en función de su fuente de origen. Por otro lado, el aumento de la contaminación del aire se ha convertido en una constante en muchas ciudades de todo el mundo, lo que ha causado problemas de salud a la población y a los ecosistemas.

Para poder mejorar la calidad del aire y por ende la calidad de vida de la población y su entorno es indispensable conocer, evaluar y analizar cómo se ha comportado a lo largo del tiempo, cada uno de los contaminantes y así poderlos asociar a una fuente particular dando como resultados programas o planes de reducción de estos contaminantes como los realizados en EL PROGRAMA por el BDAN.

5.1. Metodología

5.1.1. Manejo de datos de calidad del aire y meteorología

Para poder hacer la evaluación de comportamiento y tendencia de la calidad del aire y la meteorología a través de un periodo de tiempo en las cuatro ciudades donde se aplicó EL PROGRAMA del BDAN, fue necesario un manejo de la información con pasos concretos y establecidos que aseguran los resultados.

El presente análisis toma en cuenta las tres etapas definidas en la NOM-156-SEMARNAT⁴⁶ así como la metodología de los informes nacionales anuales de calidad del aire INECC.^{47,48,49}, para el manejo de la información, estas tres etapas consistentes en:

- Limpieza. Homogenizar las bases de datos
- Verificación. Revisión de patrones, línea base relación de las bases, etc.
- Validación. Análisis de datos en función de criterios establecidos y generación de indicadores.

La actualización de normas de salud propicia la adecuación de los lineamientos para generar los indicadores de estado y tendencia de la calidad del aire, en este sentido los informes más recientes del INECC cumplen con publicar la metodología conforme se va adecuando, de tal manera que se consultan los más recientes. Estos criterios se generalizan para el análisis de datos meteorológicos.

5.1.2. Indicadores del comportamiento temporal y tendencia

La representación temporal de un fenómeno como la calidad del aire o la meteorología considera las variaciones a lo largo del día, meses y años, así como ponderar el hecho de contar con más de una estación en la ciudad a analizar.

En el caso de la calidad del aire, suele haber más de un sitio de monitoreo por ciudad. Sin embargo, en los sitios del SMN o las mediciones satelitales podemos contar sólo con un sitio por ciudad. Es por esto que en el caso en donde se contaba con más sitios se realizó un promedio entre ellos para obtener un indicador por ciudad, de igual manera en el caso de contar con más de un

⁴⁶ *Ibidem*

⁴⁷ (INECCa, 2018). VERIFICACIÓN DE DATOS Y GENERACIÓN DE INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AIRE EN CIUDADES MEXICANAS. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/370495/Reporte_Final_INECC-LPN-007_2017_vINECC_para_pagina_3_.pdf

⁴⁸ (INECCb, 2018) INFORME NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE 2017. <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2017.pdf>

⁴⁹ (INECCc, 2019) INFORME NACIONAL DE LA CALIDAD DEL AIRE MÉXICO. <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2018.pdf>

año, algunos indicadores se obtienen al promediar entre los años en cuestión.

En el caso de la tendencia es necesario hacer una evaluación cuantitativa para determinar si se presenta algún tipo de tendencia (monótona creciente o decreciente) o simplemente las variaciones no permiten concluir al respecto⁵⁰, sin embargo, debido a que los datos que se analizan presentan una granularidad horaria o mensual, se optó por evaluar la tendencia a partir de promedios mensuales, lo que le agrega un atributo cíclico al patrón, y conlleva a evaluar la tendencia estacional. En los casos que sea estadísticamente significativa la tendencia tiene sentido evaluar la pendiente (creciente o decreciente)⁵¹.

5.2. Resultados del comportamiento y tendencias del monitoreo de la calidad del aire

El análisis del comportamiento temporal de la calidad del aire, proporcionan el comportamiento de la emisión y dispersión de un contaminante en un área en un día, mes o años. Así en las ciudades evaluadas: Ciudad Juárez, Hermosillo, Tijuana y ZMM. se observa si cierto contaminante ha aumentado en el periodo de años analizados y si ese comportamiento se ha presentado en las otras regiones, es producto específico de las actividades de la ciudad, o tiene un comportamiento a lo largo de un día. Los registros de calidad del aire por contaminante y ciudad no presentan la misma continuidad, por lo cual no en todos los casos se puede realizar un análisis completo. A continuación, se presentan el análisis por contaminante, recordando que, en Hermosillo Sonora, no se obtuvieron datos para analizar en este periodo y sólo se cuenta con algunos datos del ProAire Sonora 2017-2026⁵².

5.2.1. Comportamiento temporal y tendencia de la calidad del aire

Monóxido de carbono (CO)

La ciudad de Tijuana cuenta con datos de CO para el periodo de análisis de 2010-2019, mientras que la ZMM cuenta con datos de 2011-2016 y Cd. Juárez de 2015-2017. El comportamiento anual en estas ciudades no presenta el mismo patrón, en Tijuana aumentó más del 174% lo registrado de 2010 a 2019, llegando a 279% en 2017; la ZMM disminuyó de 2011 a 2016 el 58%. En el caso de Ciudad Juárez presentó un aumento del 49%, sin embargo, es la ciudad que marca los promedios más bajos entre las tres ciudades (Figura 5-1a).

Con respecto al comportamiento mensual se aprecia un patrón similar entre Tijuana y la ZMM, enero y diciembre son los meses con mayor concentración y entre junio y agosto se presentan las menores, con un ligero decrecimiento de febrero a junio y un ligero aumento de agosto a noviembre. Mientras que Cd. Juárez en julio registra las máximas concentraciones y el resto del año presenta una pequeña oscilación con un rango de 0.217 ppm (Figura 5-1b).

En el caso del comportamiento horario se puede apreciar que las tres ciudades presentan un patrón similar con dos picos a lo largo del día, uno por la mañana entre 8 y 9 horas y otro por la noche, más marcado en Cd. Juárez a las 21 horas y un poco más prolongado en Tijuana y la ZMM entre las 20 y 24 horas. Además, se aprecia un ligero pico entre las 4 y 5 horas en Tijuana (Figura

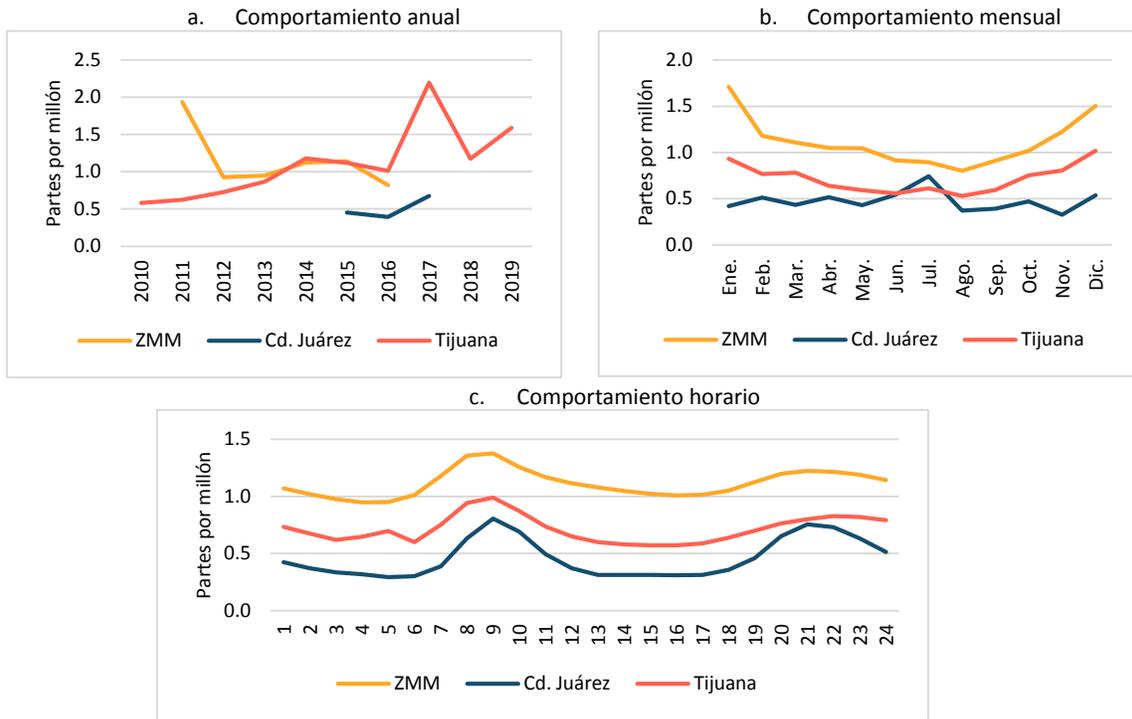
⁵⁰ Para esto se utilizará la prueba estadística no paramétrica de tendencia monótona (*Mann Kendall trend test*)

⁵¹ Tendencia monótona por medio de la prueba estadística no paramétrica Sen test o en la tendencia estacional por medio de la prueba Seasonal Sen test.

⁵² (SEMARNAT, 2018) PROAIRE. Programa de Gestión para la Mejora de la Calidad del Aire del estado de Sonora (2017-2026). <https://cedes.gob.mx/images/pdf/ProAireSonora.pdf>

5-1c)^{53,54}.

Figura 5-1: Comportamiento de CO por ciudad (2010-2019)



CINPRO con información de SCICA-INECC, SEST.

Dióxido de nitrógeno

En el caso del NO₂ no hubo ciudad que cubriera el periodo de análisis completo, la ZMM presentó el periodo más amplio (2010-2016), mientras que Tijuana y Cd. Juárez presentaron periodos discontinuos, Tijuana de 2010-2012 y 2015-2018, y Cd. Juárez de 2014 y 2017-2018.

Con la información registrada se aprecian comportamientos diferentes entre las ciudades, en la ZMM se presenta un decrecimiento promedio de 42% entre 2010 y 2016; en Tijuana para el periodo más reciente se presenta un decrecimiento del 42%, y en Cd. Juárez aumentó 9%; siendo la ZMM y Tijuana las que presentan los registros más bajos en los años más recientes

⁵³ (INECC, 2021) Sistema de Consultas de indicadores de Calidad del Aire. <http://scica.inecc.gob.mx/exec/datadl> Recuperado en agosto 2020.

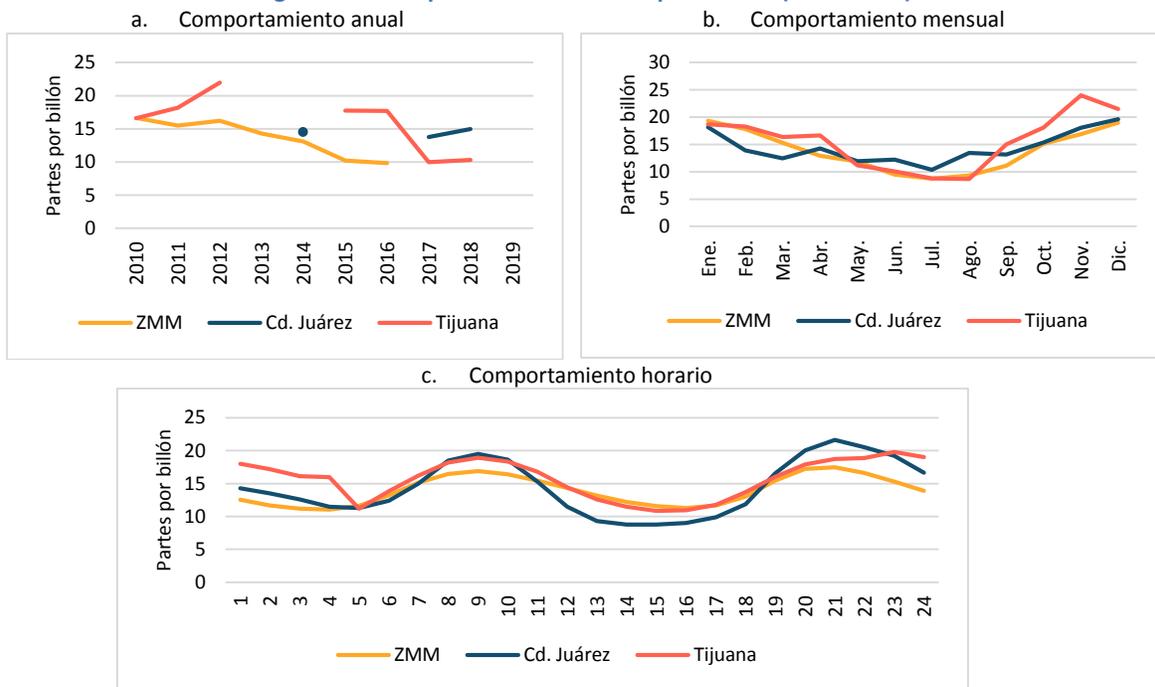
⁵⁴ (Subsecretaría de Desarrollo sustentable y Secretaría de Economía Sustentable y Turismo. Gobierno de Baja California. (SEST), 2021) En respuesta al oficio TAD/TB 0929-8/20 del BDAN, se entregaron las bases de datos crudas del periodo 2010-2019 de sus estaciones de la red de monitoreo del periodo 2010-2019.

Figura 5-2a).

Con respecto al comportamiento mensual se aprecia un patrón similar entre las tres ciudades, enero, noviembre y diciembre son los meses con mayor concentración y entre junio y agosto se presentan las menores, con un ligero decrecimiento de febrero a junio y un ligero aumento de agosto a noviembre, aunque en Tijuana se presenta un aumento en abril Figura 5-2b).

En el caso del comportamiento horario se puede apreciar que las tres ciudades presentan un patrón similar con dos picos a lo largo del día, uno por la mañana a las 9 horas y otro por la noche a las 21 horas, el cual en el caso de Tijuana se prolonga hasta la 1 de la mañana. Así como en CO, Tijuana presenta un comportamiento especial entre las 4 y 5 horas Figura 5-2c).

Figura 5-2: Comportamiento de NO₂ por ciudad (2010-2019)



CINPRO con información de SCICA-INECC, SEST.

Partículas menores de 2.5 micrómetros

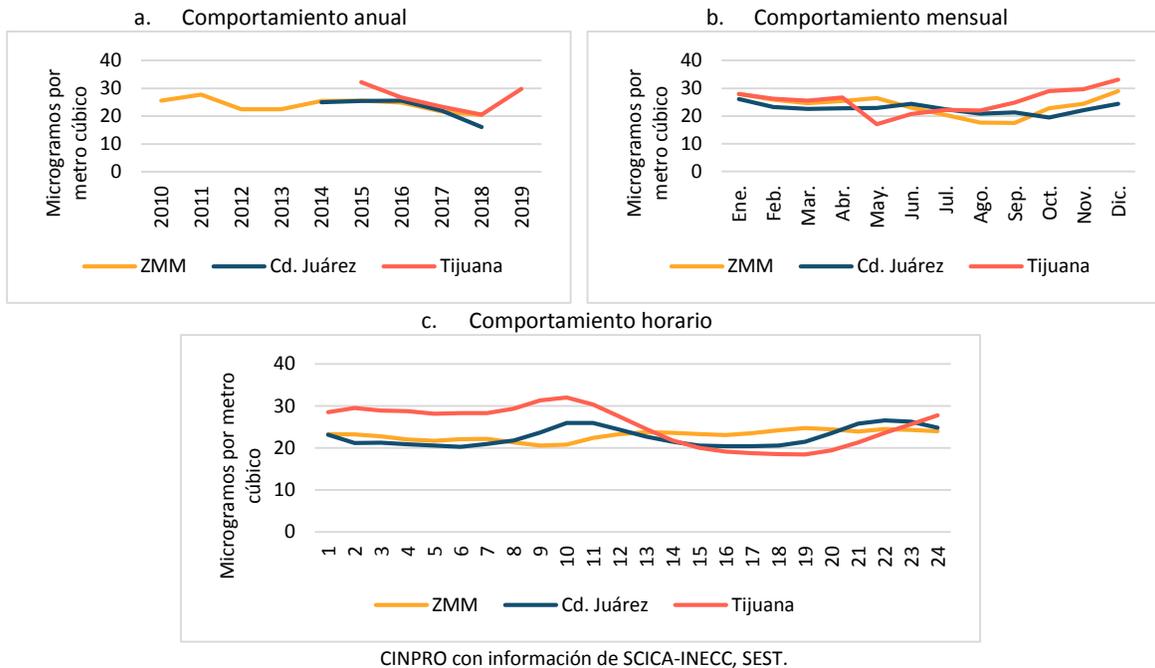
En el caso de PM_{2.5} no hubo ciudad que cubriera el periodo de análisis completo, la ZMM presentó el periodo más amplio (2010-2018), mientras que Tijuana cuenta con datos de 2015-2019 y Cd. Juárez de 2014-2018. La ZMM presenta un decrecimiento promedio de 20% entre 2010 y 2018; Tijuana presenta un decrecimiento del 7% entre 2015 y 2019, y en Cd. Juárez disminuyó 35% de 2014 a 2018; en este caso es Cd. Juárez la que registra menores concentraciones (Figura 5-3a).

Con respecto al comportamiento mensual las tres ciudades presentan algunas diferencias aun cuando, entre enero-febrero y noviembre-diciembre presentan las mayores concentraciones, en el resto del año tiene variaciones entre ellas. Tijuana registra en mayo las concentraciones menores, mientras que la ZMM los registra entre agosto y septiembre y Cd. Juárez en octubre (Figura 5-3b).

En el caso del comportamiento horario las tres ciudades presentan patrones diferentes, en Cd. Juárez se aprecian dos picos a lo largo del día, uno a las 10 horas y otro a las 22 horas; en Tijuana el máximo se registra a las 10 horas y es de llamar la atención que entre las 24 horas y las 8 de la mañana se mantienen las concentraciones altas.

En el caso de la ZMM no hay una marcada diferencia entre los promedios horarios, por lo que no se aprecian picos en específico, tan solo una ligera curva creciente de las 11 horas hasta las 24 horas (Figura 5-3c).

Figura 5-3: Comportamiento de PM_{2.5} por ciudad (2010-2019)



Partículas menores de 10 micrómetros

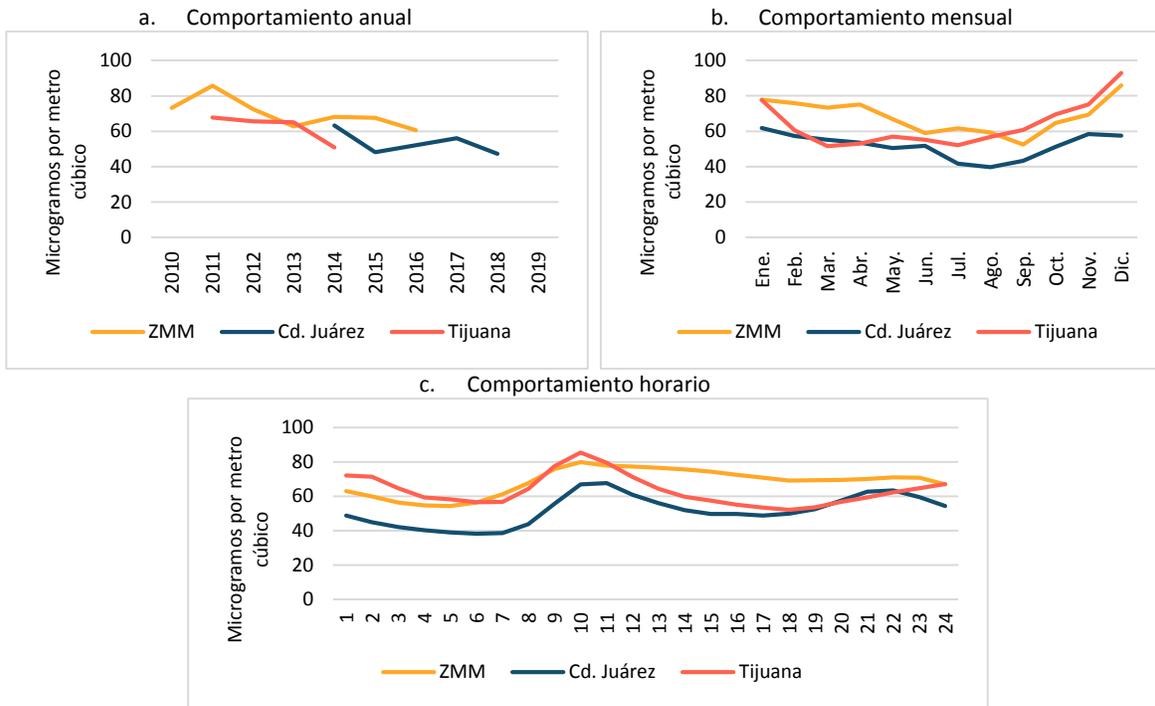
En el caso de PM₁₀ no hubo ciudad que cubriera el periodo de análisis completo, la ZMM presentó el periodo más amplio (2010-2016), mientras que Tijuana de 2011-2014 y Cd. Juárez de 2014-2018. La ZMM presenta un decrecimiento promedio de 17% entre 2010 y 2016; Tijuana presenta un decrecimiento del 4% entre 2011 y 2014, y en Cd. Juárez disminuyó 25% de 2014 a 2018; en este caso es Cd. Juárez la que registra menores concentraciones (Figura 5-4a)⁵⁵.

Con respecto al comportamiento mensual las tres ciudades presentan algunas diferencias aun cuando, entre enero-febrero y noviembre-diciembre presentan las mayores concentraciones, en el resto del año tiene variaciones entre ellas. Tijuana registra en marzo las concentraciones menores, mientras que la ZMM los registra en septiembre y Cd. Juárez de julio a agosto (Figura 5-4b).

En el caso del comportamiento horario las tres ciudades presentan patrones diferentes, en Cd. Juárez se aprecian dos picos a lo largo del día, uno entre 10 y 11 horas y otro entre las 21 y 22 horas; en Tijuana el máximo se registra a las 10 horas y hay un segundo rango de horas con valores altos entre las 24 horas y las 2 de la mañana. En el caso de la ZMM, así como en PM_{2.5}, no se presentan picos bien definidos, tan solo una ligera curva creciente de las 10 horas hasta las 24 horas (Figura 5-4c).

⁵⁵ (INECC, 2021) Sistema de Consultas de indicadores de Calidad del Aire. <http://scica.inecc.gob.mx/exec/dataadl>

Figura 5-4: Comportamiento de PM₁₀ por ciudad (2010-2019)



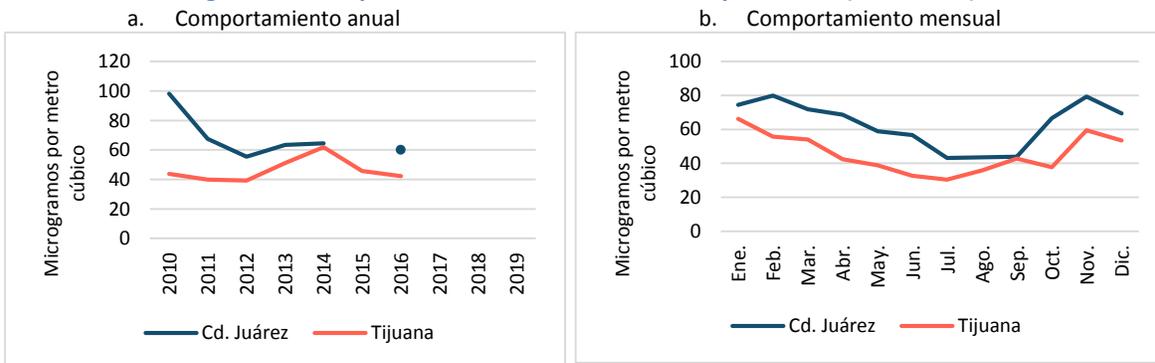
CINPRO con información de SCICA-INECC, SEST.

Partículas menores de 10 micrómetros (muestras manuales)

En el caso de PM₁₀ con equipos manuales sólo se registra en dos ciudades y ninguna cubre el periodo de análisis completo, Tijuana presenta registros de 2010-2016 y Cd. Juárez de 2010-2014, la primera presenta un decrecimiento del 4% entre 2010 y 2016, y la segunda disminuyó 39% de 2010 a 2014; Tijuana es la que registra menores concentraciones (Figura 5-5a).

Con respecto al comportamiento mensual, en Cd. Juárez los meses con mayores concentraciones son enero-febrero y noviembre-diciembre, y las menores entre julio y septiembre, con un ligero descenso de marzo a junio, y un aumento entre octubre y noviembre. En Tijuana los meses con mayores concentraciones son enero, noviembre y diciembre, mientras que junio y julio registran las concentraciones menores (Figura 5-5b).

Figura 5-5: Comportamiento de PM₁₀ muestreos por ciudad (2010-2019)



CINPRO con información de SCICA-INECC, SEST.

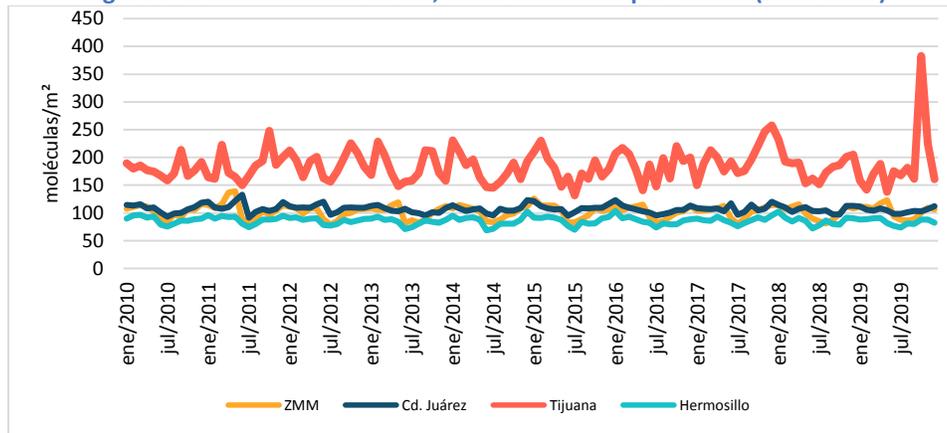
5.2.2. Tendencia de mediciones satelitales

A partir de los registros recabados con el sistema de datos NASA-Giovanni, se cuenta con datos mensuales desde enero de 2010 hasta diciembre de 2019 para CO, NO₂ y PM_{2.5}. A continuación, se presenta el comportamiento mensual por contaminante, para las cuatro ciudades.

Monóxido de carbono

Los promedios mensuales de CO con mediciones satelitales muestran que Tijuana se encuentran por arriba del resto de las ciudades, cabe aclarar que para Tijuana en 2019 existió una temporada inusual de incendios forestales en California y, que Hermosillo es la de menores registros, y Cd. Juárez y la ZMM se mantienen en niveles parecidos (Figura 5-6)⁵⁶. Al evaluar la tendencia se podría en ese año la cusa del pico, detecta que solamente Cd. Juárez, Chihuahua y Hermosillo, Sonora presentan tendencia estadísticamente significativa; en el primer caso con un nivel de confianza del 94% ($p\text{-value} = 0.056$) presenta un decremento mensual de 0.288 moléculas/m² de CO mientras que Hermosillo con un nivel de confianza del 97% ($p\text{-value} = 0.023$) presenta un decremento mensual de 0.234 moléculas/m² de CO (Figura 5-9).

Figura 5-6: Serie mensual de CO, datos satelitales por ciudad (2010-2019)



CINPRO con información de NASA Giovanni

Dióxido de nitrógeno

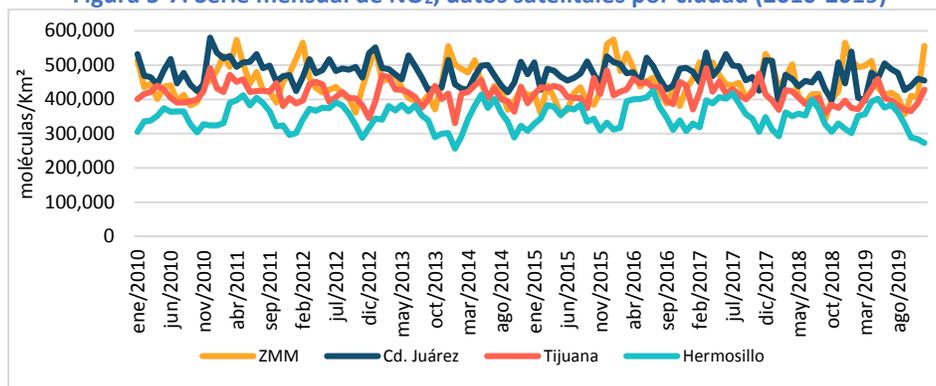
Los promedios mensuales de NO₂ con mediciones satelitales muestran que Cd. Juárez y la ZMM se encuentran por arriba del resto de las ciudades, mientras que Hermosillo es la de menores registros, y Tijuana se mantienen entre los extremos (

Figura 5-7). Al evaluar la tendencia se detecta que solamente Cd. Juárez, Chihuahua y Tijuana, Baja California presentan tendencia estadísticamente significativa; en el primer caso con un nivel de confianza del 98% ($p\text{-value} = 0.015$) presenta un decremento mensual de 2662 moléculas/Km² de NO₂ mientras que Tijuana con un nivel de confianza del 93% ($p\text{-value} = 0.063$) presenta un decremento mensual de 1491 moléculas/Km² de NO₂ (Figura 5-9)⁵⁷.

⁵⁶ (Giovanni, 2021) <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

⁵⁷ Ibidem

Figura 5-7: Serie mensual de NO₂, datos satelitales por ciudad (2010-2019)

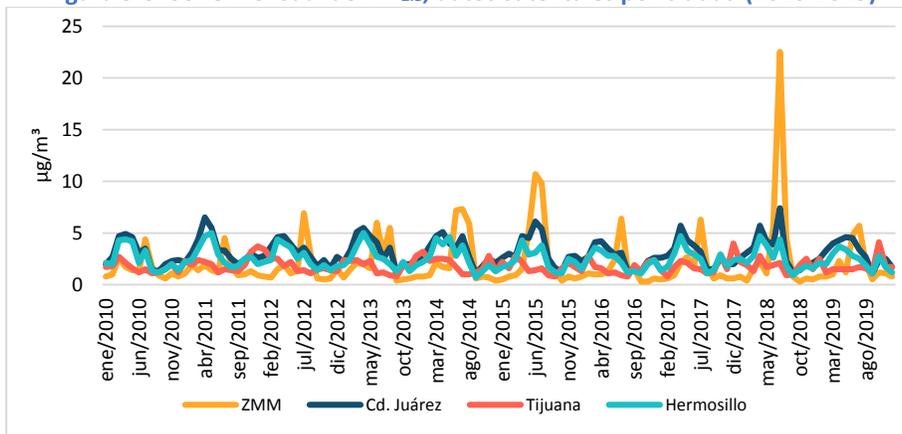


CINPRO con información de NASA Giovanni

Partículas menores de 2.5 micrómetros

Los promedios mensuales de PM_{2.5} con mediciones satelitales muestran que la ZMM registra los mayores picos de forma recurrente cada año en el mes de julio y el resto del año se mantiene por abajo del resto de las ciudades, descartando los picos de julio se aprecia que Cd. Juárez y Hermosillo registran las mayores concentraciones, y Tijuana se mantienen entre los extremos (Figura 5-8). Al evaluar la tendencia se detecta que solamente Hermosillo, Sonora presenta tendencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 90% ($p\text{-value} = 0.10$) presenta un decremento mensual de $0.025 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{2.5} (Figura 5-9). Cabe comentar que en términos estadísticos la mayoría de los estudios consideran niveles de confianza mayores al 95%, de tomar esta referencia los únicos casos que registran tendencia serían CO de Hermosillo y NO₂ de Cd. Juárez.

Figura 5-8: Serie mensual de PM_{2.5}, datos satelitales por ciudad (2010-2019)



CINPRO con información de NASA Giovanni

Figura 5-9: Evaluación de tendencia (Mann Kendall test) y pendiente (Sen test) para datos satelitales por ciudad y contaminante (2010-2019)⁵⁸

Ciudad	Parámetro	Prueba de tendencia monótona (Mann Kendall)		Estimador de la pendiente de Sen para tendencia monótona				Prueba de tendencia estacional (Seasonal Mann Kendall)		Estimador de la pendiente de Sen para tendencia estacional	Periodo a evaluar	Tendencia	interpretación de la pendiente
		tau	2-sided pvalue	Sen.s.slope	p.value	conf.int.L	conf.int.U	tau	2-sided pvalue				
Ciudad Juárez	PM2.5	-0.049	0.431	-0.002	0.431	-0.009	0.004	-0.084	0.250	-0.018	a	*	
	CO	-0.120	0.053	-0.032	0.053	-0.067	0.000	-0.137	0.056	-0.288	a	↘, α = 6%	hay un decaimiento mensual de 0.288 moléculas/m ² de CO
	NO ₂	-0.144	0.020	-242.976	0.020	-441.847	-41.125	-0.174	0.015	-2662.107	a	↘, α = 2%	hay un decaimiento mensual de 2662 moléculas/Km² de NO₂
Hermosillo	PM2.5	-0.068	0.276	-0.003	0.276	-0.008	0.002	-0.120	0.100	-0.025	a	↘, α = 10%	hay un decaimiento mensual de 0.025 µg/m ³ de PM2.5
	CO	-0.105	0.090	-0.028	0.090	-0.062	0.005	-0.163	0.023	-0.234	a	↘, α = 3%	hay un decaimiento mensual de 0.234 moléculas/m² de CO
	NO ₂	-0.005	0.937	-6.870	0.937	-221.597	201.184	0.022	0.757	227.091	a	*	
ZMM	PM2.5	-0.051	0.416	-0.001	0.416	-0.006	0.002	-0.062	0.398	0.000	a	*	
	CO	-0.025	0.691	-0.010	0.691	-0.067	0.045	-0.037	0.606	-0.058	a	*	
	NO ₂	-0.035	0.572	-70.493	0.572	-322.451	200.895	0.004	0.959	55.383	a	*	
Tijuana	PM2.5	-0.043	0.497	0.000	0.497	-0.004	0.002	-0.008	0.917	0.000	a	*	
	CO	0.006	0.926	0.009	0.926	-0.128	0.150	0.022	0.757	0.276	a	*	
	NO ₂	-0.123	0.047	-158.004	0.047	-311.370	-0.981	-0.133	0.063	-1491.941	a	↘, α = 7%	hay un decaimiento mensual de 1491 moléculas/Km ² de NO ₂
a - ene.2010 a dic.2019		α: nivel de significancia				1 - α: nivel de confianza				↘ decreciente		* no significativa	
Información satelital mensual obtenida de http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/													

CINPRO con información de NASA Giovanni

⁵⁸ (Giovanni, 2021) <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

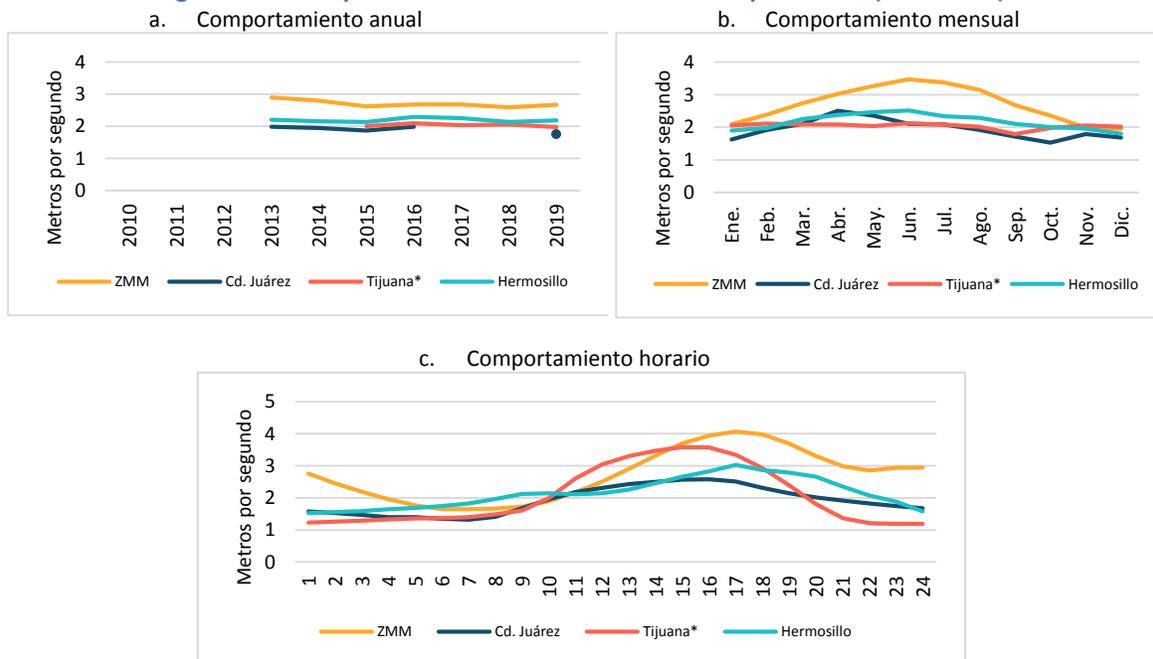
5.2.3. Comportamiento temporal y tendencia de variables meteorológicas

Los registros de la meteorología están disponibles de 2013 a 2019 y no presentan la misma continuidad en todas las ciudades, por lo cual no en todos los casos se puede realizar un análisis completo. A continuación, se presentan el análisis por variable meteorológica, recordando que, en Tijuana, Baja California, no se obtuvieron datos y se emplearon los de Tecate.

Velocidad del viento

En el caso de la velocidad del viento, la ciudad de Hermosillo y la ZMM presentaron registros de 2013 a 2019, mientras que Cd. Juárez de 2013 a 2016 y 2019, y Tijuana de 2015 a 2019. El comportamiento anual en estas ciudades no presenta el mismo patrón, sin embargo, al comparar el promedio anual de inicio y término de los periodos, en todos los casos hay una disminución, 8% en la ZMM; 12% en Cd. Juárez, 1% en Tijuana y 0.7% en Hermosillo. La ZMM registra los mayores promedios y Cd. Juárez los menores, quedando Hermosillo y Tijuana entre estos (Figura 5-10a)⁵⁹. Con respecto al comportamiento mensual se aprecia un patrón similar entre Hermosillo y la ZMM, con sus promedios máximos en junio y los menores en enero y diciembre. En el caso de Tijuana no se presentan cambios considerables de enero a diciembre, hay poca variación entre los meses, por otro lado, en Cd. Juárez el máximo se presenta en el mes de abril y el mínimo en octubre. La ZMM presenta los mayores cambios entre los meses y Tijuana los menores (Figura 5-10b). En el caso del comportamiento horario se puede apreciar un pico en todas las ciudades, sin embargo, en cada una se presenta en una hora diferente y el intervalo de horas en las que ocurre también varían; en el caso de Tijuana es más marcado el comportamiento con el máximo entre las 15 y 16 horas, con un intervalo de las 12 a las 18 horas donde el viento registra una cresta; en el caso de la ZMM el máximo ocurre a las 17 horas con una cresta entre las 14 y 21 horas; (Figura 5-10c).

Figura 5-10: Comportamiento de velocidad del viento por ciudad (2013-2019)



CINPRO con información de SMN

⁵⁹ (SMN, 2020) Bases de datos sobre parámetros meteorológicos de Cd. Juárez, Tijuana, ZMM y Hermosillo 2010-2019. <https://smn.conagua.gob.mx/es/variables-meteorologicas>

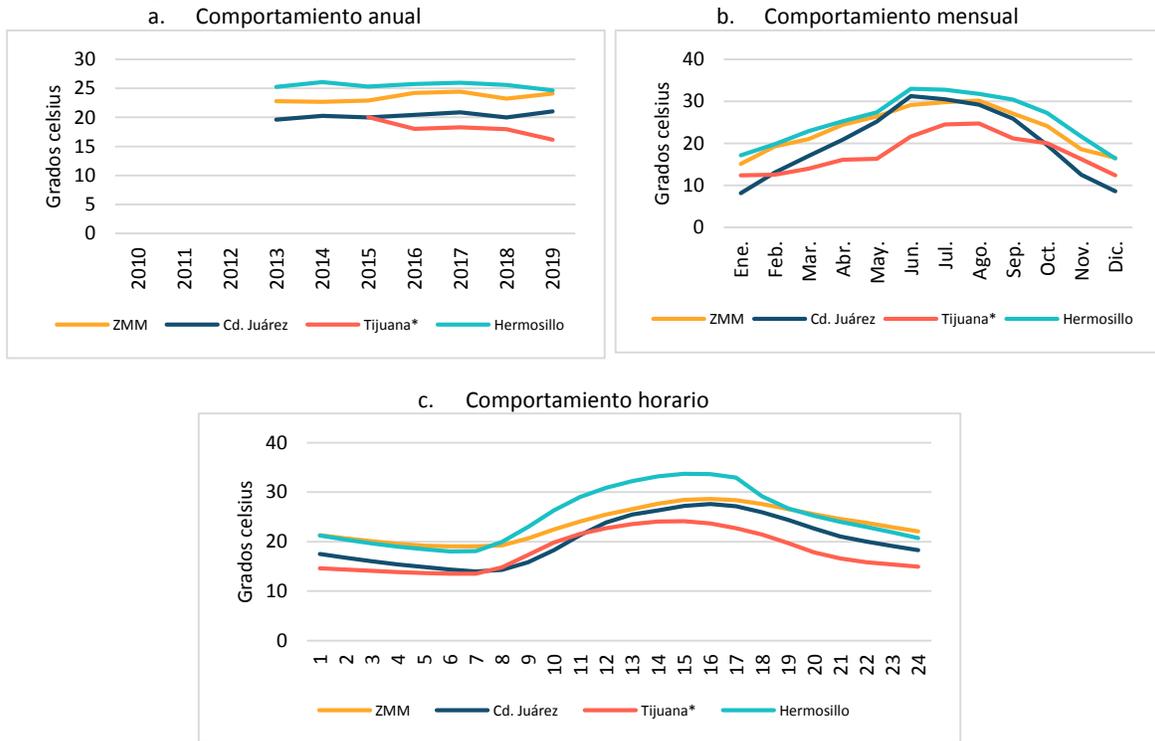
Temperatura ambiente

En el caso de la temperatura ambiente, Cd. Juárez, Hermosillo y la ZMM presentaron registros de 2013 a 2019, mientras que Tijuana presentó registros de 2015 a 2019. El comportamiento del promedio anual en la ZMM presentó un aumento del 6% de 2013 a 2019, y del 8% en Cd. Juárez, mientras que en Tijuana presentó una disminución del 19% y del 2% en Hermosillo. Hermosillo registra los mayores promedios y Tijuana los menores, quedando Cd. Juárez y la ZMM entre estos (Figura 5-11a)⁶⁰.

Con respecto al comportamiento mensual se aprecia un patrón similar entre tres ciudades, con junio el mes con temperaturas mayores, sin embargo, en Tijuana se recorre a agosto; los meses de temperaturas menores son enero, febrero, noviembre y diciembre. Se presenta un ligero crecimiento de marzo a mayo y un ligero descenso de julio a octubre en Cd. Juárez, Hermosillo y la ZMM, mientras que en Tijuana el crecimiento se da entre marzo a julio y el descenso de septiembre a octubre (Figura 5-11b).

En el caso del comportamiento horario se puede apreciar que las cuatro ciudades presentan un pico a lo largo del día, pero a diferente hora dependiendo de la ciudad, en la ZMM y en Cd. Juárez ocurre a las 16 horas, en Hermosillo a las 15 horas y en Tijuana entre las 14 y 15 horas, el mínimo se presenta a las 6 horas en Hermosillo, entre 6 y 7 horas en Tijuana y la ZMM y a las 7 horas en Tijuana (Figura 5-11c).

Figura 5-11: Comportamiento de la temperatura ambiente por ciudad (2013-2019)



CINPRO con información de SMN

⁶⁰ Ibidem

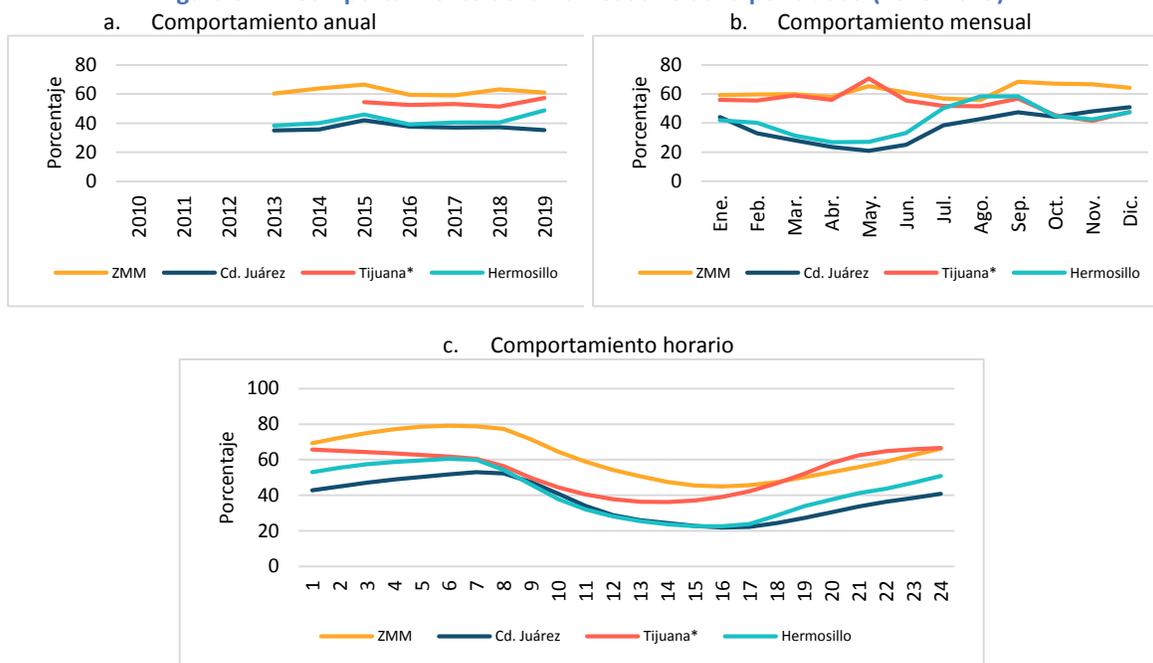
Humedad relativa

En el caso de la humedad relativa, Cd. Juárez, Hermosillo y la ZMM presentaron registros de 2013 a 2019, mientras que Tijuana presentó registros de 2015 a 2019. El comportamiento del promedio anual en la ZMM presentó un aumento del 1% de 2013 a 2019, así como en Cd. Juárez; del 5% en Tijuana; y del 27% en Hermosillo. La ZMM registra los mayores promedios y Cd. Juárez los menores, quedando Hermosillo y Tijuana entre estos ⁶¹(Figura 5-12a).

Con respecto al comportamiento mensual Cd. Juárez y Hermosillo presentan un patrón similar, con agosto-septiembre los meses con mayor humedad y mayo con la menor; en el caso de la ZMM septiembre es el mes con mayor humedad y agosto el de la menor, en Tijuana mayo es el mes con mayor humedad y noviembre el de menor. En Cd. Juárez y Hermosillo se presenta un ligero crecimiento de junio a agosto y un ligero descenso de octubre a noviembre, mientras que Tijuana y la ZMM no marcan un patrón claro de ascenso y descenso (Figura 5-12b).

En el caso del comportamiento horario se puede apreciar que Cd. Juárez, Hermosillo y la ZMM presentan un máximo a las 7 horas y el mínimo entre las 16 y 17 horas, mientras que Tijuana sale de ese comportamiento, con el máximo entre las 22 y las 24 horas, y el mínimo entre las 13 y 14 horas (Figura 5-12c).

Figura 5-12: Comportamiento de la humedad relativa por ciudad (2013-2019)



CINPRO con información de SMN

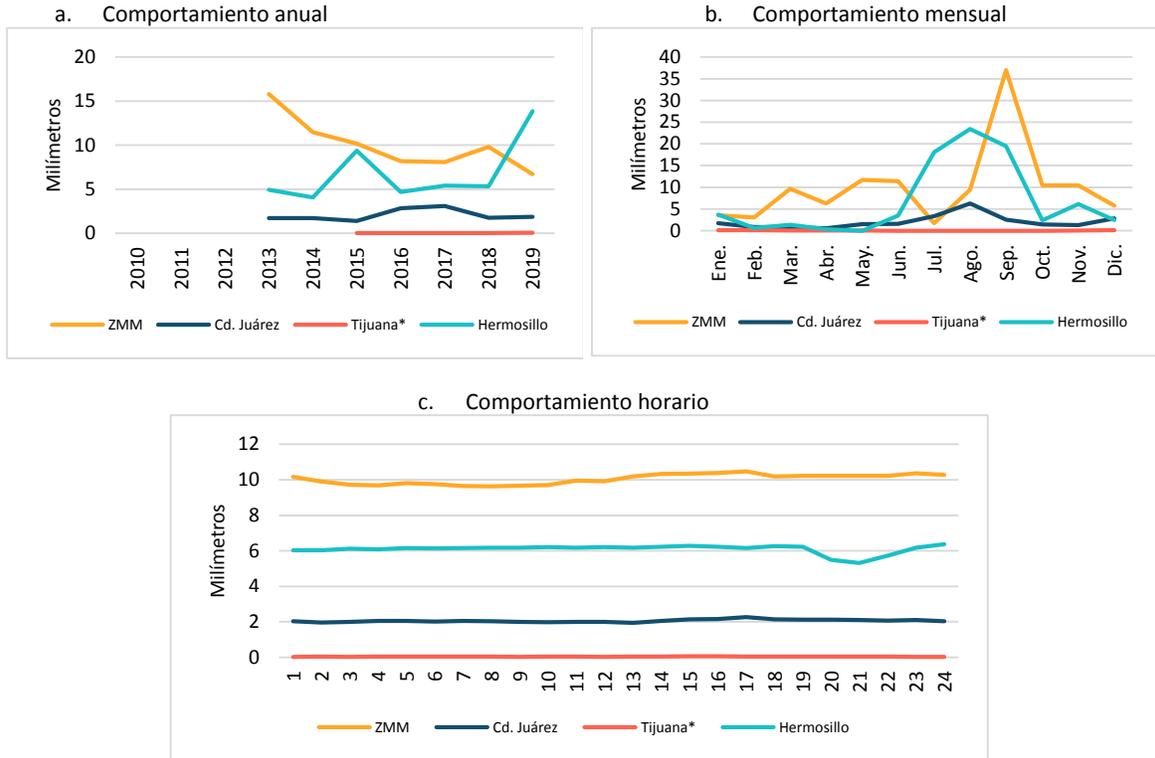
Precipitación pluvial

En el caso de la precipitación pluvial no se presentan patrones similares entre las ciudades ni a lo largo de los años (Figura 5-13a). Con respecto al comportamiento mensual Hermosillo presenta mayor precipitación en agosto con un patrón ascendente de junio a julio y descendente de septiembre a octubre, similar a Cd. Juárez con la diferencia en la cantidad de precipitación; la ZMM registra la mayor precipitación en septiembre con un patrón ascendente de julio a agosto y descendente de octubre a diciembre; en Tijuana no se aprecia la presencia de la precipitación

⁶¹ Ibidem

(Figura 5-13b). No se muestra algún comportamiento en los registros horarios (Figura 5-13c)⁶².

Figura 5-13: Comportamiento de la precipitación pluvial por ciudad (2013-2019)



CINPRO con información de SMN

Presión barométrica

En el caso de la presión barométrica, no se presenta cambios, tan solo se identifica una diferencia asociada a la altitud (a mayor altitud menor presión barométrica), dejando a Hermosillo como la de menor altitud, seguida por la ZMM, Tijuana y Cd. Juárez.

Radiación solar

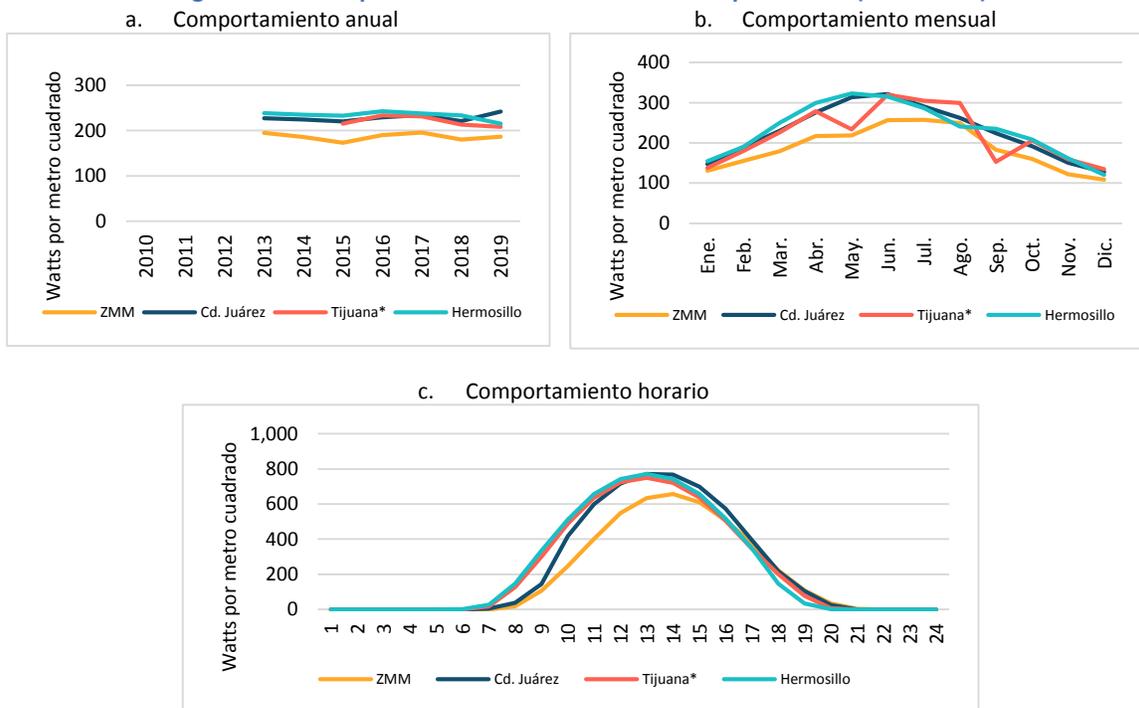
En el caso de la radiación solar, la ZMM registra la menor, seguida de Tijuana, Cd. Juárez y Hermosillo (Figura 5-14a). Con respecto al comportamiento mensual Tijuana presenta valores atípicos en mayo y septiembre, fuera de eso el patrón general refleja que de mayo a junio son los mayores valores y entre enero-febrero, noviembre-diciembre los menores valores (Figura 5-14b).

En el caso del comportamiento horario se puede apreciar que las cuatro ciudades presentan un máximo entre las 13 y 14 horas, con un patrón ascendente de 9 a 13 horas y descendente de 15 a 19 horas. Cabe comentar que Cd. Juárez y la ZMM presentan un corrimiento de una hora para iniciar el patrón ascendente (Figura 5-14c)⁶³.

⁶² Ibidem

⁶³ Ibidem

Figura 5-14: Comportamiento de la radiación solar por ciudad (2013-2019)



CINPRO con información de SMN

Tendencia de la meteorología

Se evaluó la tendencia para cada variable meteorológica y por ciudad, resultado estadísticamente significativas con un nivel de confianza de 95% o mayor las siguientes⁶⁴:

Velocidad del viento en la ZMM con un nivel de confianza del 99.5% ($p\text{-value} = 0.004$) presenta un decremento mensual de 0.034 m/s (Figura 5-17); mientras que Tijuana con un nivel de confianza del 98% ($p\text{-value} = 0.011$) presenta un decremento mensual de 0.030 m/s (Figura 5-18).

Temperatura ambiente en la ZMM con un nivel de confianza del 99.9% ($p\text{-value} = 0.001$) presenta un aumento mensual de 0.252 °C (Figura 5-17).

Precipitación pluvial en la ZMM con un nivel de confianza del 98% ($p\text{-value} = 0.019$) presenta un decremento mensual de 0.638 mm (Figura 5-17).

⁶⁴ Ibidem

Figura 5-15: Evaluación de tendencia (Mann Kendall test) y pendiente (Sen test) para meteorología en Cd. Juárez (2013-2019)

Ciudad	Parámetro	Prueba de tendencia monótona (Mann Kendall)		Estimador de la pendiente de Sen para tendencia monótona				Prueba de tendencia estacional (Seasonal Mann Kendall)		Estimador de la pendiente de Sen para tendencia estacional	Periodo a evaluar	Tendencia	interpretación de la pendiente		
		tau	2-sided pvalue	Sen.s.slope	p.value	conf.int.L	conf.int.U	tau	2-sided pvalue						
Ciudad Juárez	WSP	0.120	0.234	-0.006	0.234	-0.013	0.004	0.139	0.327	-0.023	a	*			
	TMP	0.030	0.688	0.011	0.688	-0.066	0.085	0.107	0.241	0.108	b	*			
	HR	0.033	0.660	0.028	0.660	-0.088	0.145	0.071	0.435	-0.271	b	*			
	PB	0.034	0.654	0.005	0.654	-0.015	0.024	0.032	0.729	-0.026	b	*			
	PP	0.033	0.657	0.002	0.657	-0.012	0.017	0.028	0.761	0.004	b	*			
	RS	0.019	0.805	0.069	0.805	-0.555	0.666	0.159	0.083	1.137	b	↗, α = 9%	hay un aumento mensual de 1.137 W/m ² en la radiación solar		
a - ene.2013 a dic.2016				b - ene.2013 a dic.2019				α: nivel de significancia		1 - α: nivel de confianza		↗ creciente ↘ decreciente		* tendencia no significativa	
Cada caso se evaluó con la información disponible por año-mes y en caso de ser necesario se realizó imputación de datos faltantes.															

CINPRO con información de SMN

Figura 5-16: Evaluación de tendencia (Mann Kendall test) y pendiente (Sen test) para meteorología en Hermosillo (2013-2019)

Ciudad	Parámetro	Prueba de tendencia monótona (Mann Kendall)		Estimador de la pendiente de Sen para tendencia monótona				Prueba de tendencia estacional (Seasonal Mann Kendall)		Estimador de la pendiente de Sen para tendencia estacional	Periodo a evaluar	Tendencia	interpretación de la pendiente
		tau	2-sided pvalue	Sen.s.slope	p.value	conf.int.L	conf.int.U	tau	2-sided pvalue				
Hermosillo	WSP	-	0.936	0.009	0.936	-0.005	0.005	-0.028	0.845	-0.013	b	*	
	TMP	-	0.985	0.002	0.985	-0.052	0.051	-0.111	0.225	-0.108	b	*	
	HR	0.125	0.093	0.098	0.093	-0.020	0.213	0.151	0.099	0.535	b	↗, α = 10%	hay un aumento mensual de 0.535 % en la humedad relativa
	PB	0.007	0.929	0.001	0.929	-0.020	0.020	0.119	0.193	0.057	b	*	
	PP	0.121	0.105	0.042	0.105	-0.003	0.143	0.132	0.151	0.189	b	*	
	RS	-	0.433	0.059	0.433	-0.241	0.433	-0.882	0.337	1.000	-0.047	b	*
1 - α: nivel de confianza													
b - ene.2013 a dic.2019 α: nivel de significancia ↗ creciente ↘ decreciente * tendencia no significativa													
Cada caso se evaluó con la información disponible por año-mes y en caso de ser necesario se realizó imputación de datos faltantes.													

CINPRO con información de SMN

Figura 5-17: Evaluación de tendencia (Mann Kendall test) y pendiente (Sen test) para meteorología en la ZMM (2013-2019)

Ciudad	Parámetro	Prueba de tendencia monótona (Mann Kendall)		Estimador de la pendiente de Sen para tendencia monótona				Prueba de tendencia estacional (Seasonal Mann Kendall)		Estimador de la pendiente de Sen para tendencia estacional	Periodo a evaluar	Tendencia	interpretación de la pendiente
		tau	2-sided pvalue	Sen.s.slope	p.value	conf.int.L	conf.int.U	tau	2-sided pvalue				
ZMM	WSP	-	0.147	-0.004	0.147	-0.009	0.001	-0.262	0.004	-0.034	b	↘, α = 0.5%	hay un decaimiento mensual de 0.034 m/s en la velocidad del viento
	TMP	0.079	0.292	0.027	0.292	-0.019	0.072	0.294	0.001	0.252	b	↗, α = 0.1%	hay un aumento mensual de 0.252 °C en la temperatura ambiente
	HR	-	0.725	-0.014	0.725	-0.085	0.069	-0.151	0.099	-0.583	b	↘, α = 10%	hay un decaimiento mensual de 0.583 % en la humedad relativa
	PB	-	0.911	-0.001	0.911	-0.024	0.023	-0.103	0.260	-0.064	b	*	
	PP	-	0.144	-0.039	0.144	-0.099	0.014	-0.214	0.019	-0.638	b	↘, α = 2%	hay un decaimiento mensual de 0.638 mm en la precipitación pluvial
	RS	-	0.880	-0.039	0.880	-0.594	0.422	-0.008	0.931	-0.162	b	*	
1 - α: nivel de													
b - ene.2013 a dic.2019			α: nivel de significancia				confianza		↗ creciente ↘ decreciente		* tendencia no significativa		
Cada caso se evaluó con la información disponible por año-mes y en caso de ser necesario se realizó imputación de datos faltantes.													

CINPRO con información de SMN

Figura 5-18: Evaluación de tendencia (Mann Kendall test) y pendiente (Sen test) para meteorología en Tijuana (2013-2019)

Ciudad	Parámetro	Prueba de tendencia monótona (Mann Kendall)		Estimador de la pendiente de Sen para tendencia monótona				Prueba de tendencia estacional (Seasonal Mann Kendall)		Estimador de la pendiente de Sen para tendencia estacional	Periodo a evaluar	Tendencia	interpretación de la pendiente	
		tau	2-sided pvalue	Sen.s.slope	p.value	conf.int.L	conf.int.U	tau	2-sided pvalue					
Tijuana ¹	WSP	-	0.217	0.015	-0.003	0.015	-0.006	-0.001	-0.300	0.011	-0.030	c	↘, α = 2%	hay un decaimiento mensual de 0.030 m/s en la velocidad del viento
	TMP	-	0.028	0.755	-0.009	0.755	-0.090	0.059	-0.150	0.203	-0.389	c	*	
	HR		0.043	0.632	0.041	0.632	-0.125	0.232	0.200	0.090	0.874	c	↗, α = 10%	hay un aumento mensual de 0.874 % en la humedad relativa
	PB		0.028	0.759	0.005	0.759	-0.019	0.032	0.000	1.000	-0.001	c	*	
	PP		0.147	0.100	0.000	0.100	0.000	0.001	0.159	0.178	0.005	c	*	
	RS	-	0.035	0.697	-0.130	0.697	-1.224	0.855	-0.033	0.777	-0.654	c	*	
1 - α: nivel de confianza c - ene.2015 a dic.2019 α: nivel de significancia ↗ creciente ↘ decreciente * tendencia no significativa														
Cada caso se evaluó con la información disponible por año-mes y en caso de ser necesario se realizó imputación de datos faltantes.												¹ Se estimaron los datos con la estación de Tecate		

CINPRO con información de SMN

5.2.4. Indicadores de calidad del aire

La calidad del aire se evalúa anualmente con respecto a las NOM de Salud Ambiente, se requiere contar con un mínimo de registros al año para generar los indicadores específicos y en algunos casos se debe cumplir con más de un indicador para evaluar el cumplimiento de la NOM. A continuación, se presentan los valores obtenidos en cada una de las cuatro ciudades para el periodo 2010-2019 en los contaminantes CO, NO₂, PM_{2.5} y PM₁₀.

La Figura 5-19⁶⁵Figura 5-18: Evaluación de tendencia (Mann Kendall test) y pendiente (Sen test) para meteorología en Tijuana (2013-2019)

, se observa que para CO y NO₂, ninguna ciudad se sale de la norma en los años donde se tiene información, en el caso de PM_{2.5} salen todas de los límites de norma cabe aclarar que para ciudad Juárez solo se tiene información para 2017, esto es importante ya que para evaluar un periodo de tiempo es necesario contar con varios años de información. En el caso de PM₁₀ se tiene que para Ciudad Juárez, Hermosillo, Tijuana y ZMM se salen de la norma todos los años analizados.

5.2.5. Evaluación del cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiente

Para determinar el cumplimiento de las NOM-Salud Ambiente en una ciudad se debe corroborar que no exceda los límites establecidos en ella. En el caso de NO₂ se encuentre en cumplimiento en todas las ciudades, así como el CO. Sin embargo, las PM_{2.5} y las PM₁₀ no cumplen con la NOM correspondiente en ninguna ciudad.

⁶⁵ (INECC, 2021) Sistema de Consultas de indicadores de Calidad del Aire <http://scica.inecc.gob.mx/exec/datadl>

Figura 5-19: Indicadores de las NOM mexicanas de Salud Ambiente por ciudad (2010-2019)

Año	NO2 por Ciudad			CO por Ciudad			PM2.5 por Ciudad						PM10 por Ciudad									
	Cd. Juárez	ZMM	Tijuana	Cd. Juárez	ZMM	Tijuana	Cd. Juárez		ZMM		Tijuana		Cd. Juárez		ZMM		Tijuana		Hermosillo*			
	Máximo ¹			Móvil 8h ²			Máx ³	Prom ⁴	Máx ³	Prom ⁴	Máx ³	Prom ⁴	Automático		Manual		Automático		Manual		Manual	
	Máx ⁵	Prom ⁶	Máx ⁵	Prom ⁶	Máx ⁵	Prom ⁶	Máx ⁵	Prom ⁶	Máx ⁵	Prom ⁶	Máx ⁵	Prom ⁶	Máx ⁵	Prom ⁶	Máx ⁵	Prom ⁶	Máx ⁵	Prom ⁶	Máx ⁵	Prom ⁶	Máx ⁵	Prom ⁶
2010	SD	0.126	0.087	SD	SD	4.13	SD	SD	73	22.2	SD	SD	SD	SD	SD	SD	294	100.3	133	45.6	SD	SD
2011	SD	0.124	0.178	SD	7.19	5.56	SD	SD	154	30.8	SD	SD	SD	SD	890	113.3	379	111.6	84	36.7	SD	SD
2012	SD	0.143	0.169	SD	9.68	4.15	SD	SD	146	24.9	SD	SD	SD	SD	232	101.9	329	91.9	60	31.8	SD	SD
2013	SD	0.147	SD	SD	7.26	5.15	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	464	119.4	318	83.2	SD	SD	SD	SD
2014	0.082	0.109	SD	SD	5.73	3.21	SD	SD	142	28.7	SD	SD	SD	SD	405	127.8	226	88.4	SD	SD	SD	SD
2015	SD	0.099	0.087	1.33	5.94	SD	SD	SD	68	26.1	SD	SD	SD	SD	SD	SD	370	84.2	88	35.0	SD	SD
2016	SD	0.059	0.092	2.62	6.54	SD	SD	SD	SD	SD	98	25.5	159	55.7	412	129.1	251	75.2	SD	SD	49	75.0
2017	0.054	SD	0.053	3.11	SD	5D	46	22.0	94	19.7	97	27.4	169	64.6	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2018	0.050	SD	0.101	SD	SD	SD	SD	SD	73	23.1	81	21.2	293	55.1	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2019	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

*Información tomada del ProAire Sonora 2017-2026
 NOM:
¹/NO2 (máximo): 0.210 ppm
²/CO (máximo móvil 8h): 11.0 ppm
³/PM2.5 (máximo): 45 µg/m³
⁴/PM2.5 (promedio): 12 µg/m³
⁵/PM10 (máximo): 75 µg/m³
⁶/PM10 (promedio): 40 µg/m³
 SD no cuentan con información suficiente
Valores por arriba de los límites de la NOM respectiva

CINPRO con información SCICA - INECC

5.2.6. Estado de la calidad del aire (Índice de Calidad del Aire y Salud)

La norma *NOM-172-SEMARNAT-2019* para generar el Índice de Calidad del Aire y Salud permite informar a la población de los riesgos a los que están expuestos en tiempo real y sienta el precedente para comparar la calidad del aire en diferentes ciudades del país a partir de valores horarios. En el presente estudio se revisa el comportamiento diario del índice (a partir del máximo de los 24 índices horarios) en el periodo 2010-2019, por contaminante en cada ciudad. Los mensajes definidos para informarle a la población si se encuentra en riesgo por la calidad del aire son (Figura 5-20)⁶⁶.

Figura 5-20: Mensajes asociados a las categorías de calidad del aire y riesgos a la salud (2019)

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Recomendaciones	
		Para grupos sensibles.	Para toda la población.
Buena	Bajo	Disfruta las actividades al aire libre.	
Aceptable	Moderado	Considera reducir las actividades físicas vigorosas al aire libre.	Disfruta las actividades al aire libre.
Mala	Alto	Evita las actividades físicas (tanto moderadas como vigorosas) al aire libre.	Reduce las actividades físicas vigorosas al aire libre.
Muy Mala	Muy Alto	No realices actividades al aire libre. Acude al médico si presentas síntomas respiratorios o cardiacos.	Evita las actividades físicas moderadas y vigorosas al aire libre.
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	Permanece en espacios interiores. Acude al médico si presentas síntomas respiratorios o cardiacos.	

A continuación, se muestra una representación del índice por medio del Mosaico del Índice de Calidad del Aire y Salud por ciudad para cada contaminante. Idealmente se esperaría que cada mosaico presente colores principalmente verdes y algunos amarillos, lo que representa niveles de riesgo Bajo o Moderado, sin embargo, en cada caso se observan situaciones específicas.

Partículas menores a 2.5 micrómetros

En la ciudad de Tijuana, Baja California, de manera general se aprecia que los meses de mayo a agosto presentan niveles de riesgo Bajo o Moderado, aunque esporádicamente se han registrado niveles Altos y Muy Altos. De septiembre a octubre podría considerarse como el inicio de la época de partículas, agudizándose de noviembre a marzo o hasta abril. En el año 2016 se presentó un episodio de 5 días con niveles de riesgo Extremadamente Malo y un episodio de 10 días con niveles de riesgo Muy Alto; 2019 muestra un cambio importante ya que se acrecientan los riesgos, presentándose más casos con nivel Alto, Muy Alto y Extremadamente Alto, en particular se presentó un evento de 16 días con riesgo Muy Alto, del 2 al 17 de noviembre (

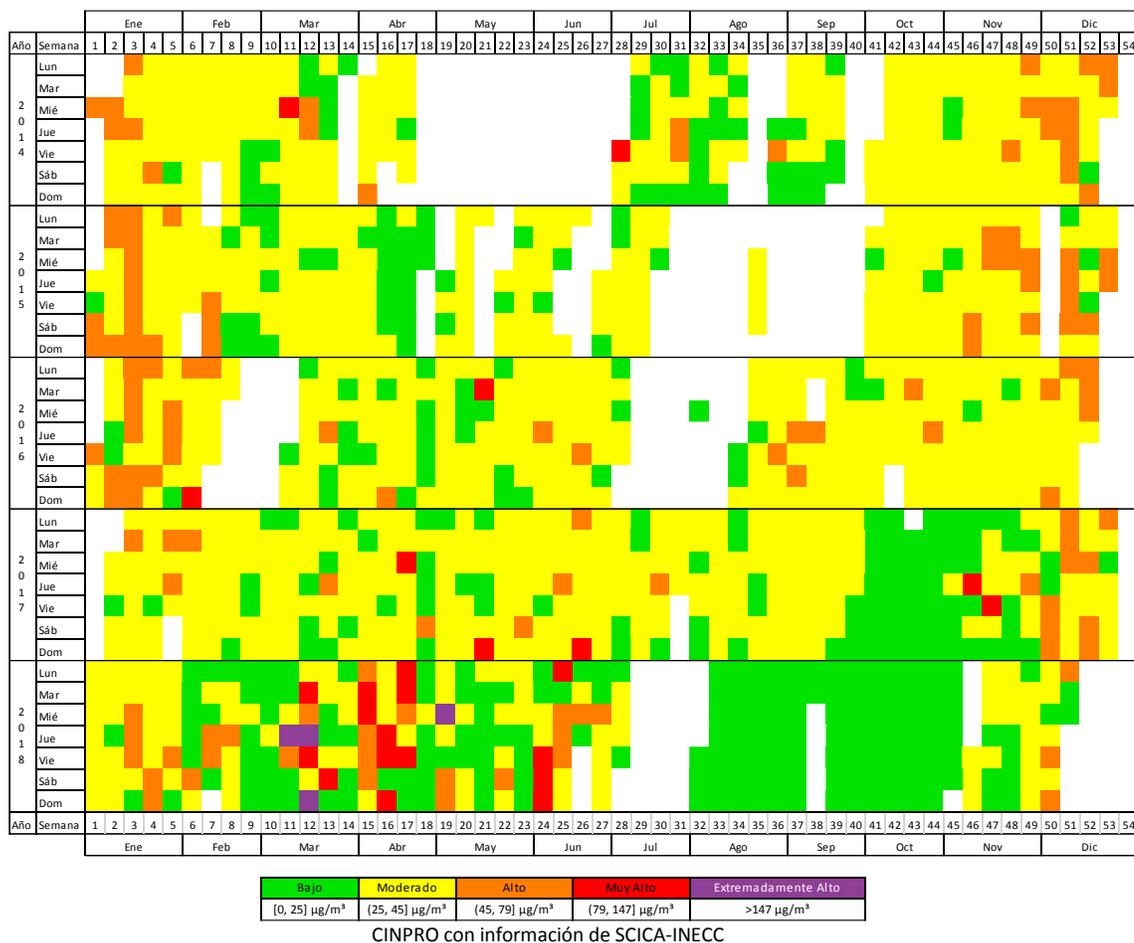
⁶⁶ (DOF, 2019) *NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019

Figura 5-21).

Figura 5-22)⁶⁷.

⁶⁷ (INECC, 2021) Sistema de Consultas de indicadores de Calidad del Aire. <http://scica.inecc.gob.mx/exec/datadl>

Figura 5-22: Mosaico de calidad del aire por PM2.5 en Cd. Juárez (2014-2018)



En la ZMM, se aprecian en mayor cuantía los eventos con nivel de riesgo Muy Alto y Extremadamente Alto, en particular, en 2018 se presentó un evento de riesgo Alto con duración de 3 días, del 15 al 17 de junio, y se registraron 4 días con nivel de riesgo Extremadamente Alto. No se aprecia una época de partículas ya que en todo el año se presentan casos Altos o de mayor riesgo. Se puede observar el efecto del 31 de diciembre y del 1 de enero ya que la mayoría de los años están en color rojo o morado (Figura 5-23).

Partículas menores a 10 micrómetros

Las PM₁₀ se pueden medir por muestreos manuales cada 6 días o de manera continua con registros cada hora, en el caso de Cd. Juárez se cuenta con ambos tipos de medición; para Tijuana sólo se cuenta con mediciones por muestreo manual; y en la ZMM se monitorea de manera continua. En Cd. Juárez, se aprecia tanto en el mosaico de muestreos como en el de registros continuos una gran cantidad de eventos de riesgo Muy Alto y Extremadamente Alto, sin embargo, en los muestreos no se marca la diferencia entre épocas mientras que en los registros continuos la época de partículas se define de noviembre a junio. En Tijuana, se aprecia un mayor número de eventos con riesgo Bajo, Moderado y Alto, no se registraron eventos con nivel de riesgo Muy Malo y tan solo un evento con riesgo Extremadamente Malo. En la ZMM, los eventos con riesgo Malo, Muy Malo y Extremadamente Malo predominan todo el año, lo que representa un mayor riesgo para la salud.

Dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono

En Cd. Juárez el nivel de riesgo es Bajo en todos los años tanto en NO₂ como en CO, mientras que la ZMM y Tijuana presentan niveles de riesgo Bueno y Moderado en NO₂ y Bueno en CO.

5.2.7. Análisis comparativo entre las 4 ciudades del programa del BDAN

El comparativo entre ciudades no se puede realizar de manera precisa por no contar con información completa en todo el periodo, sin embargo, al tomar en cuenta la cantidad de años por periodo (4 años de 2010-2013 y 6 años de 2014-2019), se pueden presentar los promedios por periodo de al menos 3 y 5 años respectivamente para poder hacer el comparativo. Con respecto a los contaminantes los casos comparables son: CO en Tijuana y PM_{2.5} en la ZMM. En el caso de CO en Tijuana el promedio de 2010-2013 es 50% menor al de 2014-2019 y en PM_{2.5} en la ZMM el promedio de 2010-2013 es 4% mayor al de 2014-2019, con lo que se podría indicar que CO disminuyó de un periodo al otro en Tijuana, pero PM_{2.5} aumentó de un periodo al otro en la ZMM (Figura 5-24)⁶⁸.

En el caso de las variables meteorológicas, no es posible realizar los comparativos debido a que los datos cubren el periodo 2013-2019 y no es posible comparar un año vs 6 años.

Figura 5-24: Comparativo de promedios de contaminantes entre los periodos 2010-2013 y 2014-2019

Contaminantes (unidades)	ZMM		Cd. Juárez		Tijuana	
	Antes (2010-2013)	Durante (2014-2019)	Antes (2010-2013)	Durante (2014-2019)	Antes (2010-2013)	Durante (2014-2019)
CO (ppm)	1.27				0.70	1.38
NO ₂ (ppm)	15.67				18.92	
PM _{2.5} (µg/m ³)	24.59	23.62		22.83		26.54
PM ₁₀ (µg/m ³)	73.57			53.38	66.18	
PM _{10m} (µg/m ³)			71.11		43.55	

CINPRO con información del SCICA-INECC y SEST.

Con respecto al Índice de Calidad del Aire y Salud, se puede hacer un comparativo entre los días que registraron cada nivel de riesgo; en el caso de CO las tres ciudades presentaron el 100% de

⁶⁸ Ibidem.

días con riesgo Bajo (solo la ZMM presentó un día con niveles de riesgo Moderado, el 01/01/2012). Cabe comentar que con respecto al PROY-NOM-021-SSA1-2020 se reduce el umbral de 11 a 9 ppm, valor cercano a lo que actualmente representa el nivel de riesgo Bajo (8.75 ppm) y que pasaría a representar el nuevo nivel de riesgo Moderado y se ajustaría a un valor menor el nivel de riesgo Bajo, por lo cual se modificaría el comportamiento y serían más los días en el nivel de riesgo Moderado⁶⁹.

En el caso del NO₂, Cd. Juárez presentó el 100% de días con riesgo Bajo, mientras que la ZMM llegó a presentar hasta 7 días con niveles de riesgo Moderado (2% en el año 2010) y los últimos años (2015 y 2016) el 100% de días con riesgo Bajo; en el caso de Tijuana presentó hasta 10 días con niveles de riesgo Moderado (3% en el año 2011) y en años recientes ha presentado 2 días en este nivel (1% en el año 2018), por lo cual se podría decir que de las tres ciudades, Tijuana es la que presenta mayor riesgo para la salud de la población. Cabe comentar que con respecto al PROY-NOM-023-SSA1-2020 se reduce el umbral de 0.210 a 0.106 ppm, con valor cercano a lo que actualmente representa el nivel de riesgo Bajo (0.107 ppm) y que pasaría a representar el nuevo nivel de riesgo Moderado y se ajustaría a un valor menor el nivel de riesgo Bajo, por lo cual se modificaría el comportamiento y serían más los días en el nivel de riesgo Moderado⁷⁰.

En el caso de PM_{2.5} (Figura 5-25)⁷¹ se aprecia que el nivel de riesgo Bajo se presentó con mayor frecuencia en Cd. Juárez llegando a representar hasta el 50% de los días en el año 2018, en segundo lugar, se identifica a Tijuana con a lo más 30% de días con riesgo Bajo en el mismo año; en el caso de la ZMM se aprecia que menos del 4% de días al año registra riesgo Bajo. Por otro lado, con respecto a los niveles de riesgo Muy Alto y Extremadamente Alto, si los conjuntamos se aprecia que Cd. Juárez registra menor frecuencia de casos, a lo más 6% de días en 2018; seguida de Tijuana con a lo más 25% de días en 2019; y la ZMM con a lo más 32% de días en 2015, por lo cual se podría decir que, de las tres ciudades, la ZMM es la que presenta mayor riesgo para la salud de la población y Cd. Juárez la que presenta el menor riesgo; cabe mencionar que con datos de 2019 Tijuana registró un 25% de días en estos niveles de riesgo y será necesario esperar a conocer los datos del mismo periodo para Cd. Juárez y la ZMM para valorar el riesgo de las tres ciudades en tiempos recientes.

En el caso de PM₁₀ (Figura 5-26)⁷² se esperaría un comportamiento similar al de PM_{2.5}, sin embargo, debido a que se monitorea de manera manual en dos ciudades la comparación dicta lo siguiente: Tijuana registra la mayor cantidad de eventos con nivel de riesgo Bajo (más del 40% de casos por año), seguida de Cd. Juárez donde los muestreos presentan hasta 8% de eventos con riesgo Bajo y las mediciones continuas presentan hasta 16% de eventos en el mismo nivel de riesgo; la ZMM registra a lo más un 1% de días con nivel de riesgo Bajo. Por otro lado, con respecto a los niveles de riesgo Muy Alto y Extremadamente Alto, si los conjuntamos se aprecia que Tijuana registra menor frecuencia de casos, a lo más 2% de eventos en 2015; seguida de Cd. Juárez con a lo más 43% de eventos en 2014 (muestreos) y 17% de días en 2017 (mediciones continuas); en el caso

⁶⁹ (DOF, 2020a). PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-SSA1-2020, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al monóxido de carbono (CO).

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5601282&fecha=25/09/2020

⁷⁰ (DOF, 2020b). PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-023-SSA1-2020, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de nitrógeno (NO₂).

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5601338&fecha=28/09/2020

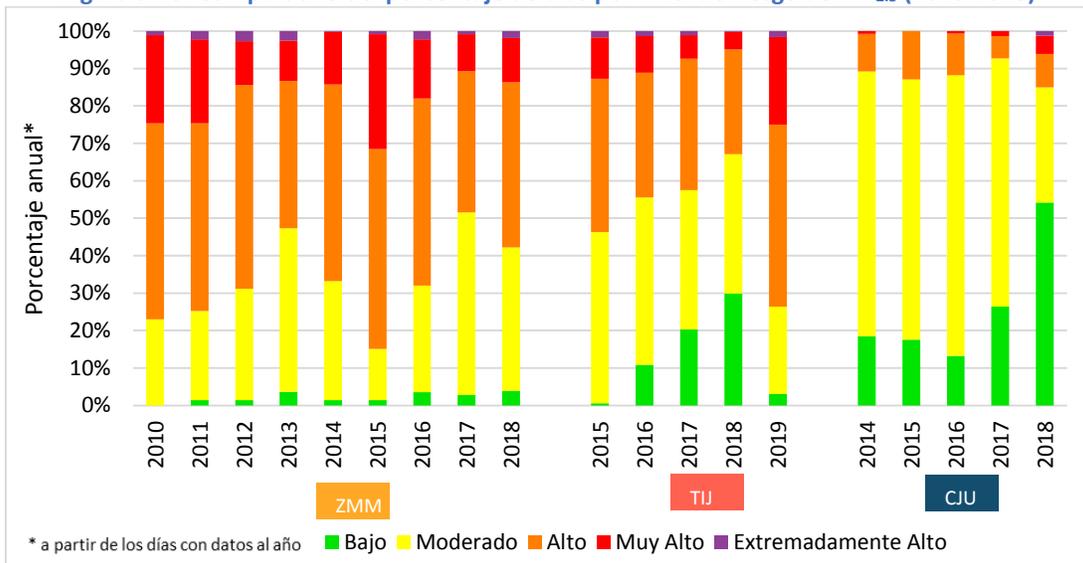
⁷¹ (INECC, 2021) Sistema de Consultas de indicadores de Calidad del Aire. <http://scica.inecc.gob.mx/exec/datadl>

⁷² Ibidem

de la ZMM se registra al menos el 57% de días al año (en el año 2016) llegando a registrar hasta el 80% (en el año 2011); por lo cual se podría decir que, de las tres ciudades, la ZMM es la que presenta mayor riesgo para la salud de la población y Tijuana la que presenta el menor riesgo.

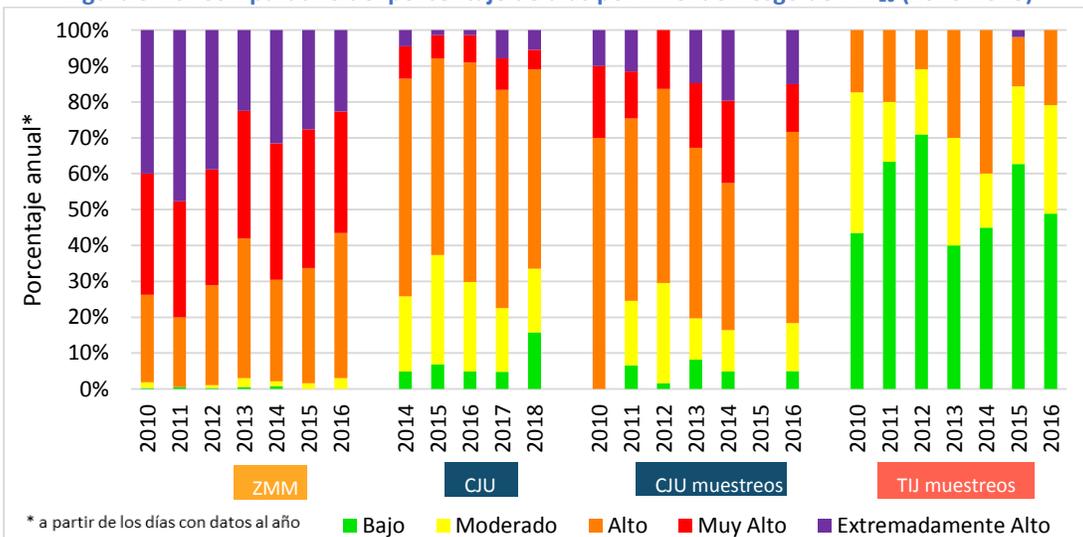
Debido a que se cuenta con mediciones automáticas y manuales de PM₁₀ en Cd. Juárez se puede observar patrones diferentes entre ellas, en particular los años 2014 y 2016 cuentan con ambos tipos de medición, y como se observa en la Figura 5-27, se registran niveles más bajos con equipos automáticos que con muestreos manuales; en los niveles de riesgo Moderado y Alto la frecuencia es mayor en las mediciones automáticas, mientras que, en los niveles de riesgo Muy Alto y Extremadamente Alto, la frecuencia es mayor en las mediciones manuales, cuando lo ideal sería que conserven el mismo patrón por representar el mismo fenómeno.

Figura 5-25: Comparativo del porcentaje de días por nivel de riesgo de PM_{2.5} (2010-2018)



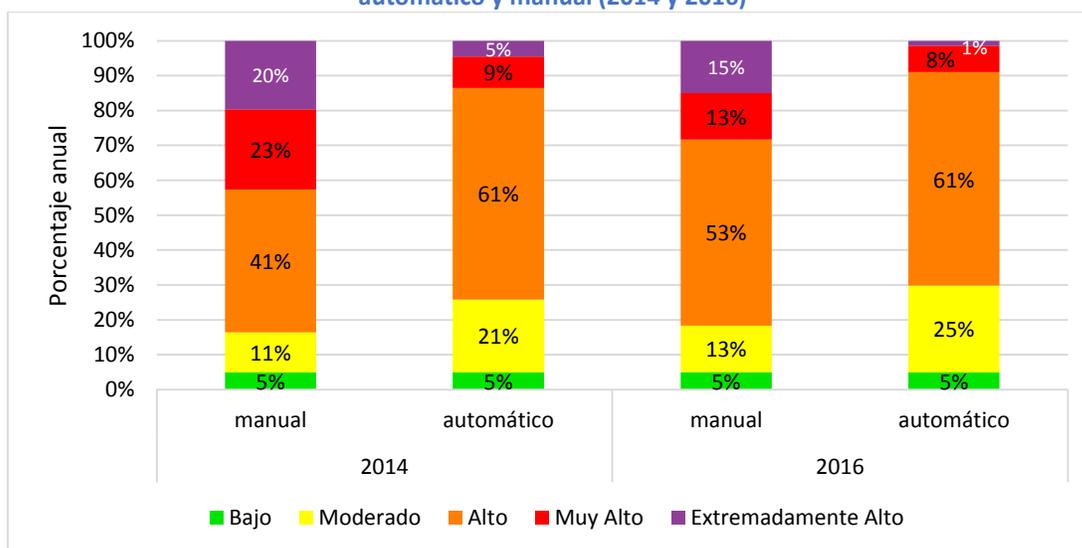
CINPRO con información del SCICA-INECC y SEST para generar el ICAyS con fundamento en la NOM-172-SEMARNAT-2019

Figura 5-26: Comparativo del porcentaje de días por nivel de riesgo de PM₁₀ (2010-2018)



CINPRO con información del SCICA-INECC y SEST para generar el ICAyS con fundamento en la NOM-172-SEMARNAT-2019

Figura 5-27: Comparativo del porcentaje de días por nivel de riesgo de PM₁₀ en Cd. Juárez con equipo automático y manual (2014 y 2016)



Con información del SCICA-INECC para generar el ICAyS con fundamento en la NOM-172-SEMARNAT-2019

5.3. Discusión de resultados y conclusiones del capítulo

El análisis de la calidad del aire en periodos de tiempo de varios años requiere incorporar el efecto de la meteorología para descartar la posibilidad de enmascarar resultados asociados a cambios en el clima. En el presente estudio se analizaron 10 años de información y como se identificó los cambios meteorológicos no presentan tendencia significativa en general, tan solo en dos ciudades y para algunas variables, en el caso de la ZMM la velocidad del viento y la precipitación pluvial presentan tendencia decreciente mientras que la temperatura ambiente presenta tendencia creciente; por otro lado, en la ciudad de Tijuana solamente la velocidad del viento presenta tendencia decreciente.

En cuanto a la tendencia de la calidad del aire no se pudo evaluar con los datos de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire de las ciudades, por no contar con datos continuos a lo largo del periodo, y se recurrió a evaluar la tendencia partir de los datos satelitales. En este sentido, solo dos ciudades presentaron tendencia estadísticamente significativa, es decir, en Cd. Juárez el NO₂ y en Hermosillo el CO presentaron tendencia decreciente.

El índice de calidad del aire y salud (ICAyS) deja ver que el problema son las partículas en las cuatro ciudades analizadas, tanto PM₁₀ como PM_{2.5}, en el caso de la ZMM ambas partículas son un problema de salud, mientras que en Cd. Juárez son las PM₁₀ y en Tijuana son las PM_{2.5}.

En tal sentido la evaluación de la sustitución y ampliación de vehículos de transporte público implementado por el BDAN en estas ciudades, la mejora en la calidad del aire no es evidente. Sin embargo, si se puede destacar que EL PROGRAMA impacta directamente en la reducción de una de las fuentes de emisión principales como lo es el transporte público (especialmente dedicado al diésel), donde su principal característica son las emisiones de partículas, de tal forma que se considera se debe reforzar un esquema que contemple más proyectos tendientes a reducir emisiones de fuentes que impactan negativamente a la calidad del aire y que tome en cuenta el comportamiento tendencial y temporal de cada sitio.

6. Línea base de inventarios de Emisiones antes de la intervención

6.1. Metodología Inventario de emisiones

Los Inventarios de Emisiones de los contaminantes emitidos a la atmósfera por las diversas fuentes, son un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire. En México, los primeros esfuerzos para elaborar un Inventario de Emisiones derivaron del interés del Gobierno Federal y del gobierno de los Estados Unidos de América; con la firma del Acuerdo de la Paz entre ambas naciones, el Instituto Nacional de Ecología, actualmente Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), dependiente de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), participó en un proyecto de colaboración para establecer las bases técnicas y elaborar el Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM), por lo que entre 1996 y 2000 se realizaron talleres, estudios y se desarrollaron herramientas⁷³.

El INEM, como instrumento de gestión y planeación para mejorar la calidad del aire en zonas urbanas y comunidades, se expresa en la Estrategia Nacional de Calidad del Aire (ENCA) publicada en el año 2017⁷⁴ (SEMARNAT, 2017), la cual responde a la emergencia y compromisos adquiridos por México para impulsar la Agenda para el Desarrollo Sostenible 2030, un acuerdo al que se adhirieron los Estados Miembros de la Organización de las Naciones Unidas en el seno de la Cumbre para el Desarrollo Sostenible 2015, el cual plantea 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible con horizonte al año 2030 (ODS 2030) y poner fin a la pobreza, luchar contra la desigualdad y la injusticia, y hacer frente al cambio climático.

El acoplamiento de la ENCA con los compromisos de la Agenda 2030 en materia de urbanización y calidad del aire, implica considerar que la población urbana seguirá creciendo en los próximos años y que debe existir un compromiso para garantizar una calidad del aire adecuada para su desarrollo y bienestar.

En México, la expansión urbana y el deterioro de la calidad del aire son parte de un fenómeno complejo relacionado con el crecimiento poblacional, la migración de la población rural que busca mejores servicios y oportunidades de empleo, la forma y la cantidad de energía que se emplea para sostener los estilos de vida y las diferentes actividades económicas.

Las cifras del Sistema Urbano Nacional indican que México concentraba en el año 2010 a 59 zonas metropolitanas, es decir, municipios que se interrelacionan alrededor de una ciudad central y conforman centros urbanos con más de un millón de habitantes, así como centros urbanos en zonas transfronterizas con más de 250,000 habitantes; en ese año también se contabilizaron 78 conurbaciones, las cuales funcionan como una continuidad física de los centros urbanos o como una continuidad física entre dos localidades con carácter intermunicipal o interestatal, en términos poblacionales las conurbaciones pueden concentrar entre 15,000 y 49,999 personas; el resto de las unidades que se contabilizan en el Sistema son 247 centros urbanos con características propias, sin características urbanas o de conurbación, y su población puede superar los 15,000 habitantes.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Secretaría de Desarrollo Agrario, Urbano y Territorial (SEDATU) y la Comisión Nacional de Población (CONAPO), en México existen actualmente 74 zonas metropolitanas que concentran a 75.1 millones de personas (62.8% de la población total) y en éstas se genera un porcentaje importante del Producto Interno Bruto Nacional (PIB); no obstante México es el segundo país más motorizado de

⁷³ (SEMARNAT, 2019). Documento del Inventario Nacional de Emisiones 2005. 2019.

<https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>

⁷⁴ (SEMARNAT, 2017). Estrategia Nacional de Calidad del Aire. 2017. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/calidad-del-aire-98085>

Latinoamérica y se prevé que en el 2030 tenga un parque vehicular de 70 millones de unidades, por referir solamente una de las fuentes de emisión que deberán gestionarse⁷⁵.

6.1.1. Crecimiento del transporte público en México y en la frontera norte del país

El sector transporte en México y el mundo es el sector que más consume energía y es una de las principales fuentes de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), dado los cambios ambientales, económicos, sociales y políticos relacionadas con el incremento del parque vehicular en las ciudades alrededor del mundo, el tema de movilidad urbana ha cobrado relevancia. Por otro lado, la gran transformación urbana que ha tenido México, dio como resultado un sistema urbano, en donde el (80%) del total de la población urbana del país vive en zonas metropolitanas⁷⁶.

La metropolización, implica mayor complejidad de la movilidad de las personas, sobre todo en sus viajes hogar-trabajo, con la consecuencia de mayores tiempos de traslado, congestión vehicular, pérdidas hora-hombre que afectan la productividad de las empresas, e incrementan las enfermedades respiratorias por la concentración de contaminantes locales.

Al aumentar la demografía, la urbanización y la presión por reducir gases efecto invernadero, el sector transporte de México y el mundo enfrentará mayores retos tanto en los ámbitos urbanos como en las áreas rurales, congestión de tránsito en las ciudades, vejez y deterioro mayor de la infraestructura y del equipamiento de transporte y crecimiento en la demanda de combustible⁷⁷.

El Transporte Público es parte de la movilidad urbana. Éste es definido como un sistema de medios que incluye infraestructura y vehículos, para el traslado de personas de un lugar a otro. El transporte al que nosotros haremos referencia es al transporte público urbano, que es diferenciado por el flujo de personas transportadas al mismo tiempo. Los transportes urbanos son los diferentes medios que son propios de una ciudad o de un espacio urbanizado como lo pueden ser el metro, o los autobuses, etc.⁷⁸.

La protección y mejora del transporte público urbano como elemento principal de la movilidad urbana e interurbana en sustitución al automóvil, la reducción de los contaminantes, el ahorro energético en el transporte, la promoción del uso de la bicicleta, el control de tráfico, la accesibilidad, el confort y la seguridad son algunas de las medidas hacia un modelo de movilidad sustentable.

El escenario que plantea en términos de movilidad urbana en México para 2030 la Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano, en 2019⁷⁹, si no se modifica la toma de decisiones actuales para el 2030, el 20.9 % de los viajes a la escuela y 30.1 % de los viajes al trabajo se realizarán en vehículos privados. Si se lograra un incremento de 5% en los recursos del gasto para el transporte público urbano (infraestructura y vehículos), para el año 2030, 31 % de los viajes a la escuela y 40.3 % de los viajes al trabajo se harán en transporte público urbano, en cualquiera de sus modalidades. Para el 2030, de las personas que van a la escuela, 1.7 % lo hará en bicicleta y 49.9 % lo hará caminando. Esta estimación considera el comportamiento de los viajes para el 2030 estableciendo

⁷⁵ (Consejo Nacional de Población (CONAPO), 2018). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015. 2018. pp. 43. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/344506/1_Preliminares_hasta_V_correcciones_11_de_julio.pdf

⁷⁶ (Consejo Nacional de Población (CONAPO), 2018). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015. 2018. pp. 9. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/344506/1_Preliminares_hasta_V_correcciones_11_de_julio.pdf

⁷⁷ (ITDP, 2012). La importancia de reducción del uso del automóvil en México. 2012 pp.29. <https://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Importancia-de-reduccion-de-uso-del-auto.pdf>

⁷⁸ (ITDP, 2012). La importancia de reducción del uso del automóvil en México. 2012 pp.42. <https://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Importancia-de-reduccion-de-uso-del-auto.pdf>

⁷⁹ (Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU), 2019). Anatomía de la Movilidad en México. 2019. pp. 34. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/411314/Anatomia_de_la_movilidad_en_Mexico.pdf

supuestos con base en las tendencias de crecimiento de la población, del parque vehicular y del gasto público en movilidad con los datos que representan las decisiones que hemos tomado hasta el día de hoy.

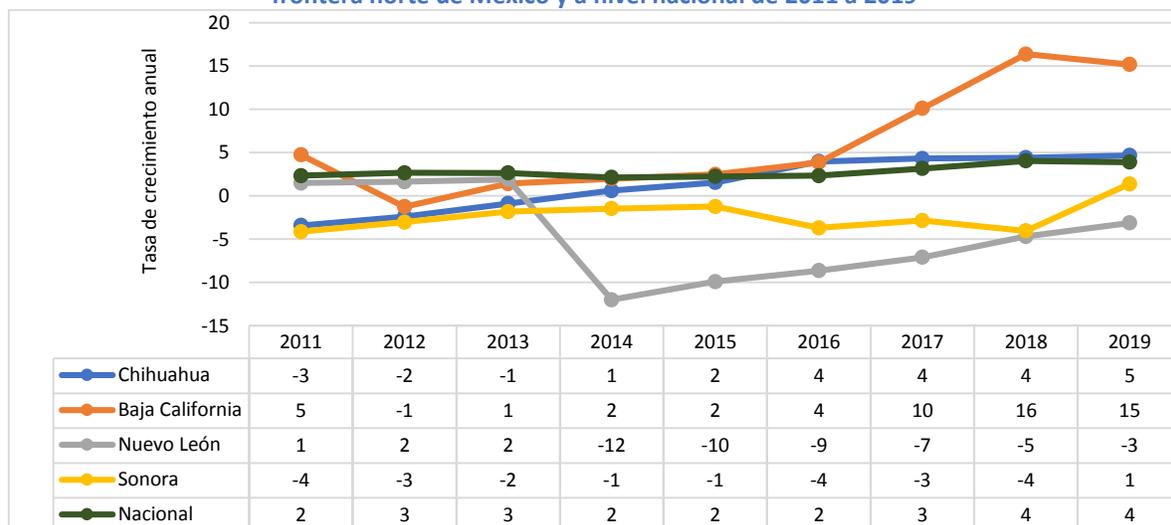
Aun cuando se estima que se recuperarán algunos viajes en transporte público si aumentamos el gasto público en la transformación de los sistemas de transporte masivo y semi-masivo, es importante reflexionar sobre la calidad de servicio de ese crecimiento y si los tiempos que toma lograr la transformación serán acordes a los tiempos del incremento de la demanda, para lograr evitar que las personas abandonen este medio de transporte.

En tal contexto la calidad de servicio (cantidad y acceso a tecnologías más Nuevas), en el transporte público urbano es un factor primordial en el desarrollo de movilidad urbana en la zona y así al mejoramiento de la calidad de vida de las zonas urbanas.

La Figura 6-1. muestra la tasa de crecimiento anual con base a 2010 del transporte público urbano en México y en los estados de la frontera norte del país (Baja California, Sonora, Chihuahua y Nuevo León)⁸⁰.

México presenta un crecimiento positivo desde 2011, en cuanto al número de unidades, mientras en estados de la frontera norte del país, como Nuevo León se presenta una tasa de crecimiento negativa en 2014 (-12) de la flota o Sonora con -4 en 2011. Estados como Nuevo León que desde 2014 han tenido restructuración de las rutas de transporte, implementando el sistema BRT en su zona metropolitana, o como Sonora en donde existe también esta clase de cambios, la flota se ve disminuida. Por un lado y como se menciona anteriormente el decrecimiento en las unidades de transporte público implica tener poca disposición del modo de transporte y estos recaen en un cambio modal (generalmente hacia transporte privado), también es importante indicar que estos estados están cambiando de transporte semi-masivo (autobús público urbano) a transporte masivo como el BRT (Bus Rapid Transit por sus siglas en inglés).

Figura 6-1: Tasa de crecimiento anual en base a 2010 del transporte público urbano en los estados de la frontera norte de México y a nivel nacional de 2011 a 2019



CINPRO información de INEGI

⁸⁰ (INEGI, 2020). Vehículos Motorizados Registrados en Circulación. 2020.
<https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est>

El escenario que se describe, pone en evidencia el vínculo existente entre el medio ambiente y una serie de factores económicos y sociales en torno a la movilidad urbana de las zonas metropolitanas y fronterizas. En este sentido y, como respuesta a este problema de movilidad urbana, los gobiernos municipales han fomentado en los últimos años, al menos discursivamente, un cambio de tipo de movilidad tendiente a un uso más intensivo del transporte público. Es decir, la mayoría de las políticas de movilidad urbana sustentable promueven un menor uso del automóvil privado y una mayor utilización del transporte público, tales como son los ODS objetivo 11 (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2016), el Acuerdo de Paris (2015), el Plan Nacional de Desarrollo 2013- 2018, los Proaires, por mencionar algunos.

6.1.2. Herramienta de inventario de emisiones para fuentes móviles

Los inventarios de emisiones en general son considerados como las principales herramientas de gestión de la calidad del aire no obstante, la definición se basa de manera simple en la cantidad de sustancias emitidas producto de la combustión y evaporación de los combustibles de cualquier fuente y en el caso particular de las fuentes móviles de manera adicional el material particulado emitido por el desgaste de los frenos y los neumáticos en un periodo de tiempo determinado.

Los inventarios de emisiones de fuentes móviles pueden desarrollarse para un día, una semana, un mes o un año calendario por tipo de vehículo, uso, combustible, año modelo, municipio, estado o país, según el nivel de desagregación que se requiera o la calidad y disponibilidad de los insumos.

Para fuentes móviles entre más detalle se tenga de la información requerida, mayor será la certidumbre del inventario y la confianza que se tenga para utilizar los resultados. Uno de los datos más importantes para estimar la emisión de contaminantes atmosféricos provenientes de las fuentes móviles es el factor de emisión. Con la relación entre la emisión de un contaminante y de su dato de actividad (ej. Distancia recorrida por tipo de vehículo o el consumo de combustible). A la fecha, para generar el factor de emisión utilizado para elaborar los inventarios nacionales y locales en México se ha utilizado el modelo MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator por sus siglas en inglés); sin embargo, los avances tecnológicos de los vehículos automotores hacen necesaria la actualización periódica de las herramientas de estimación de emisiones.

6.2. Resultados de la línea base de inventarios de Emisiones

El comportamiento de los inventarios realizados en México, nos proporciona la línea base mostrado la contribución de las emisiones por fuentes móviles en cada estado y ciudad del norte del país, donde el BDAN ha aplicado "EL PROGRAMA" sustituyendo o incorporado unidades de transporte urbano desde 2015 a la fecha, como se mencionó anteriormente uno de los factores que más impactan a las emisiones de origen vehicular es la cantidad y edad vehicular del padrón vehicular en una zona.

6.2.1. Crecimiento del padrón vehicular de autobuses

El tamaño de la flota vehicular de cualquier modo de transporte es un factor que afecta directamente a la cantidad de emisiones que emiten en un año. En tal contexto se analizan las ciudades en donde el PROGRAMA del BDAN ha venido trabajando desde 2015 en los autobuses de transporte público urbano.

En términos de unidades de autobuses de transporte urbano en las ciudades de en Ciudad Juárez, Tijuana, Hermosillo y Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM)

La Figura 6-2, muestra la tasa de crecimiento anual en diferentes periodos (2008 a 2013, 2014 a 2016 y 2017 a 2018) del número de unidades de autobuses de transporte urbano en Ciudad Juárez, Tijuana, Hermosillo y Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM)⁸¹, se puede observar para ZMM en 2014 se tiene la misma tasa de crecimiento negativa (-12) que el presentado para el transporte público de pasajero de INEGI para el estado de Nuevo León, esto solo ratifica el comportamiento que se ha tenido a lo largo del tiempo la ZMM, de la misma forma aunque las tasas de crecimiento no son iguales, si podemos observar que el comportamiento reflejado para Baja California es igual al que se presenta en Tijuana donde se tienen tasas de crecimiento negativas antes de 2013 y positivas en el resto del periodo.

Figura 6-2: Tasa de crecimiento anual basado en 2008 para los periodos 2008 a 2013, 2013 a 2016 y 2016 a 2018 de los autobuses de transporte urbanos para Cd. Juárez, Hermosillo, Tijuana y ZMM

Ciudad	2008-2013	2014- 2016	2017 -2018
Cd. Juárez	-4	-6	-13
Hermosillo	-4	-7	-7
Tijuana	-8	9	7
ZMM	-3	-12	-10

CINPRO con información de SEMARNAT, SEDUE Chihuahua, UACJ, SEST Baja California, CCT y UNE.

Esto considera una reducción en las emisiones contaminantes calculadas en el inventario de emisiones para esta fuente ya que se cuenta con menos unidades de autobuses para Ciudad Juárez, Hermosillo y ZMM. No obstante, se debe analizar la antigüedad y tecnología existente, considerado en la edad promedio y los años modelo existentes en cada flota vehicular de cada ciudad.

6.2.2. Edad vehicular del padrón de autobuses en el periodo de tiempo 2008- 2019 de las 4 ciudades del PROGRAMA del BDAN.

La edad promedio define el comportamiento que ha tenido en un periodo de tiempo una flota vehicular de transporte público urbano en un área, esto es consecuencia generalmente del programa de gastos con el que se cuenta, los planes y programas de desarrollo de ordenamiento territorial, de movilidad urbana, economía y medio ambiente entre otros.

De aquí que el tener un transporte público urbano con determinada antigüedad implicará condiciones de servicio distintos; por ejemplo, flotas con edad promedio mayores a los 15 años tendrá una disponibilidad menor de las unidades por mayor tiempo en mantenimiento, así como condiciones tecnológicas sin control de emisiones y por tanto mayores emisiones por unidad.

La Figura 6-3⁸² muestra la antigüedad promedio vehicular en las cuatro ciudades donde el BDAN implemento EL PROGRAMA, se puede observar cómo a cambiando la antigüedad a lo largo del tiempo, lugares como Hermosillo que paso de 19 a 7 años de antigüedad de 2013 a 2019 muestran la mejora significativa de la flota de autobuses de transporte público y esto debe reflejarse

⁸¹ (SEMARNAT a, 2019). Bases de datos de los Inventarios Nacional de Emisiones 2005, 2008, 2013 y 2016. 2019.

<https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>.

(Secretaría de desarrollo urbano y ecología (SDUE) y Univerisdad Autónoma de Ciudad Juarez (UACJ), 2019). Diseño operacional de las rutas troncales 1 y 2 del sistema integrado de transporte Ciudad Juárez.

(Secretaría de economía del gobierno del estado de Baja California, 2020). Padrón vehicular 2019

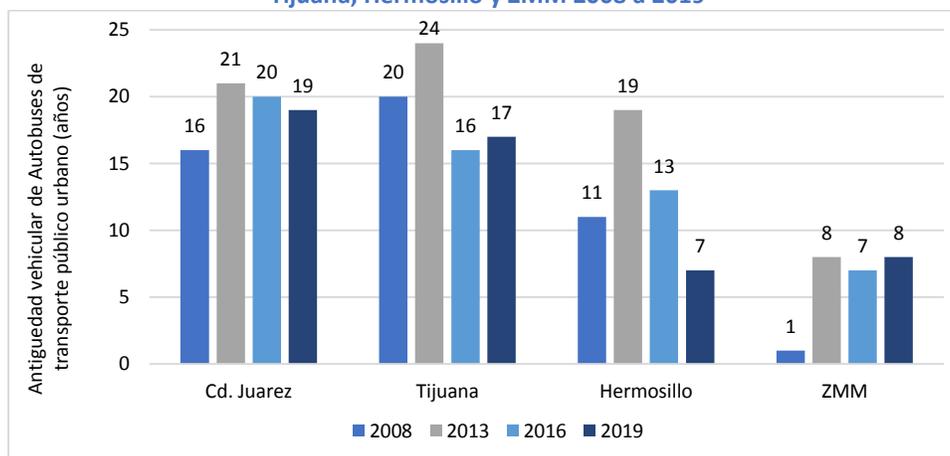
(Consejo Ciudadano del Transporte Público Sustentable del Estado de Sonora (CCT), 2019). ESTUDIO TÉCNICO PARA LA DETERMINACIÓN DE TARIFAS DEL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO EN HERMOSILLO 2017. https://0201.nccdn.net/1_2/000/000/13b/762/ESTUDIO-T--CNICO-PARA-LA-DETERMINACI-N-DE-TARIFAS-DEL-TRANSPORTE-P--BLICO-URBANO-EN-HERMOSILLO-2017.pdf

(UNE transporte urbano del Estado de Sonora, 2020). Rutas de Hermosillo. <http://une.sonora.gob.mx/rutas/ubica-tu-camion.html>

⁸² Fuente: Ibidem

en una disminución de las emisiones contaminantes en estos lugares. Ciudad Juárez y Tijuana, aunque se observa una disminución de la antigüedad vehicular para 2019 tienen más 15 años, lo que releja condiciones de uso donde existe mayor mantenimiento.

Figura 6-3: Antigüedad vehicular promedio de autobuses de transporte público urbano en Cd. Juárez, Tijuana, Hermosillo y ZMM 2008 a 2019



CINPRO con información de SEMARNAT, SEDUE Chihuahua, UACJ, SEST Baja California, CCT y UNE.

En el contexto de EL PROGRAMA del BDAN, se observa que la antigüedad de los autobuses sustituidos o ingresados tienen menos de 4 años, esto apoya a la mejora de la edad vehicular promedio en cada ciudad; dentro de los autobuses sustituidos o incorporados por EL PROGRAMAMA tiene un año modelo promedio en Hermosillo, Tijuana y Ciudad Juárez de 2016 y ZMM de 2018.

La edad vehicular o el año modelo está íntimamente relacionado con el tipo de tecnología, que aunado al desgaste se considera menos contaminante. Al respecto la Figura 6-4, muestra los estratos tecnológicos que en México se han presentado a lo largo del tiempo de acuerdo a la evolución que ha tenido la norma oficial mexicana NOM-044-SEMARNAT a lo largo del tiempo⁸³. Estos estratos tecnológicos consideran distintos controles de emisiones, uso específico de combustible, etc.

Figura 6-4: Estratos tecnológicos por año modelo de autobuses en México

Año modelo	Tecnología	Características
2015 y posteriores	Entrada de EURO V y BRT	Incorporación de tecnologías de control de emisiones dependiendo del estándar de cumplimiento de origen (Estados Unidos o Europa)
2005 a 2014	Combinación de EPA y EURO	Adopción de estándares de estados Unidos y de Europa
1998-2004	EPA-98	Inyección electrónica de combustible
1994-2004	EPA 94	Inyección mecánica
1991- 1993	EPA 91	Regulación de los vehículos pesados a diésel homologada a los estándares de emisión de Estados Unidos
1990 y anteriores	Sin regulación	

CINPRO con información de EPA y DOF. NOM 044

⁸³ (DOF, 2018) Norma Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017. Publica 19/02/2018 https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5513626&fecha=19/02/2018

Para efectos de tener una idea más clara de los avances tecnológicos ocurridos en México se presenta en la Figura 6-5⁸⁴ las reducciones de emisiones que se llevaron a cabo en el país, considerados en los estándares de emisión de la EPA (United States Environmental Protection Agency por sus siglas en inglés), cabe señalar que para los vehículos año modelo 2004 no se adoptó como tal la regulación EPA 2004, ni tampoco el estrato correspondiente a los vehículos EPA 2007, toda vez que en el país se permitió la comercialización de estándares EPA y EURO, sin fijar el estándar vigente de Estados Unidos o Europa (rezago tecnológico).

Figura 6-5: Estándares de Emisión EPA para Autobuses Urbanos y Camiones y tractocamiones

Camiones y Tractocamiones (g/bhp-hr)						Autobuses Urbanos (g/bhp-hr)						
Niveles de emisión contaminante para vehículos pesados con motor a diésel nuevos						Niveles de emisión contaminante para vehículos pesados con motor a diésel nuevos						
	1990	1991	1994	1998	2004		1990	1993	1994	1996	1998	2004
HC	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	HC	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
CO	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	CO	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5
NOx	5.0	5.0	5.0	4.0	2.5	NOx	5.0	5.0	5.0	5.0	4.0	2.5
PM	6.0	0.25	0.10	0.10	0.10	PM	0.25	0.10	0.07	0.05	0.05	0.05

CINPRO con información de EPA

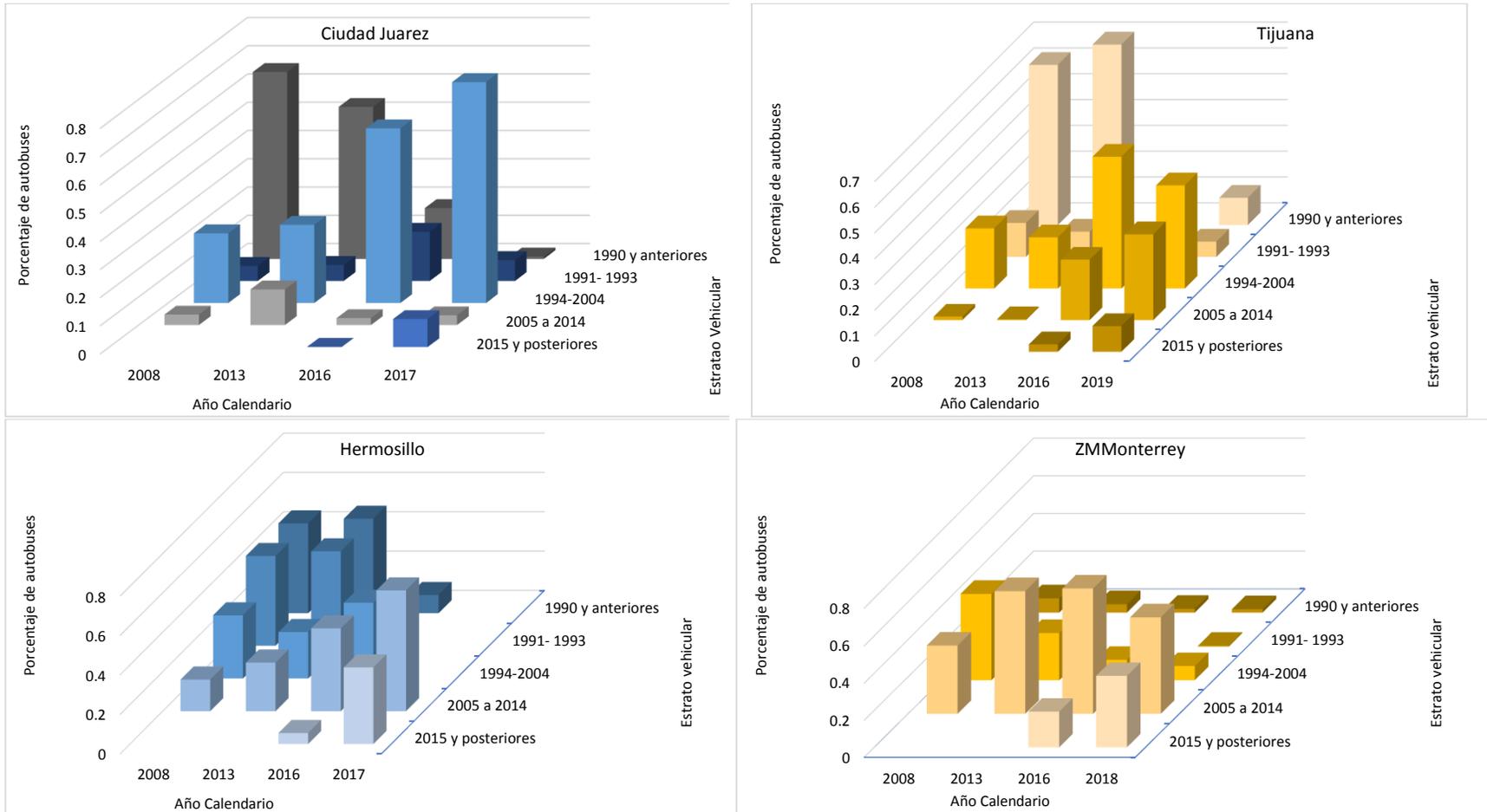
Estos estratos implican que flotas vehiculares que cuenten con la misma cantidad de vehículos, pero con un estrato vehicular sin regulación o con una regulación menos estricta, emitirá más contaminantes que una que cuente con estratos tecnológicos con control de emisiones o con controles más estrictos.

En la Figura 6-6⁸⁵ se muestra para las cuatro ciudades el comportamiento en el tiempo de estos estratos vehiculares en los autobuses de transporte público urbano. Se observa que en Hermosillo no hay unidades sin control de emisiones, mientras que, en la ZMM y Ciudad Juárez, aun presentan vehículos sin control de emisiones en un 2% y 1% respectivamente, mientras Tijuana presenta un 11% con esta clase de vehículos. Esto implicará que ciudades como Hermosillo presenten una reducción en la emisión por unidad (autobús) hacia 2017, en comparación de Ciudad Juárez y ZMM.

⁸⁴ (Environmental Protection Agency, EPA, 2020). Code of Federal Regulations.(Código Federal de regulación). Control of Emissions From New an in use Highway Vehicles (Control of Emissions From New an in use Highway Vehicles). <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-86>

⁸⁵ Fuente: Ibidem

Figura 6-6: Comportamiento por estrato tecnológico de autobuses en Ciudad Juárez, Hermosillo, Tijuana y ZMM de 2008 a 2018



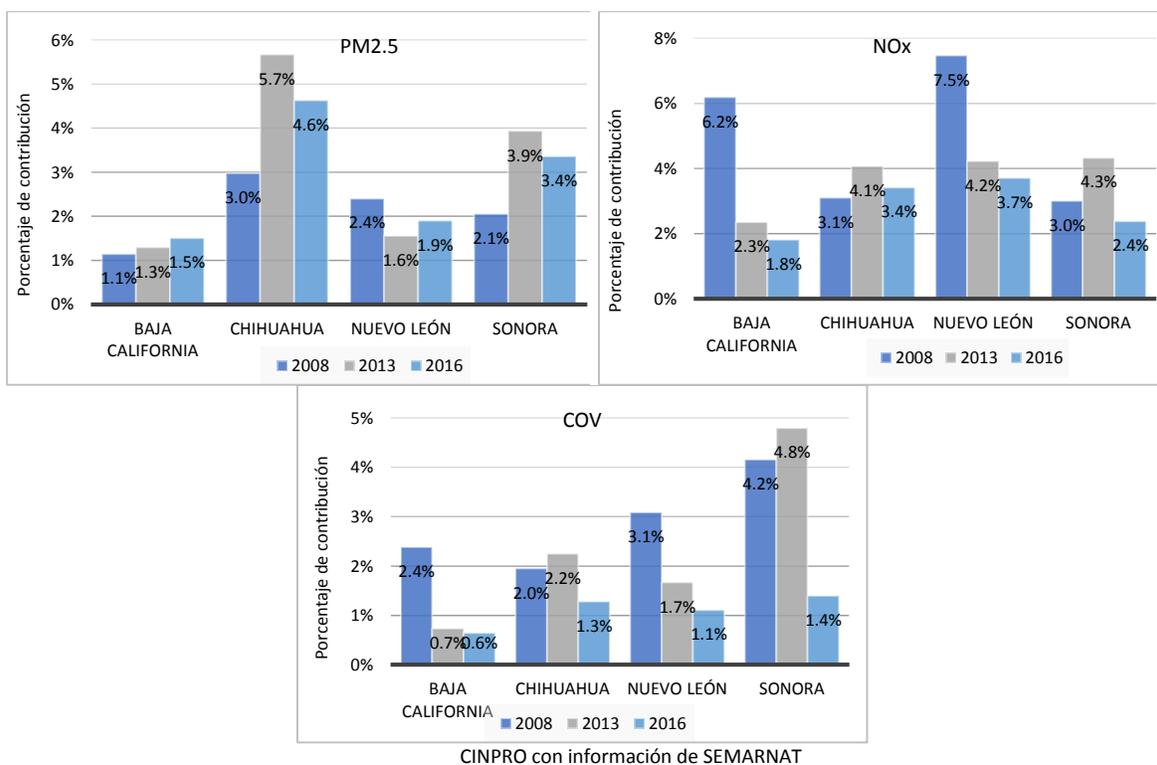
CINPRO con información de SEMARNAT, SEDUE Chihuahua, UACJ, SEST Baja California, CCT y UNE.

6.2.3. Comparación de la contribución nacional por contaminante en el periodo 2008- 2013

Un vehículo que utiliza diésel como combustible, se caracteriza por generar mayor cantidad de partículas y NO_x que uno que usa gasolina, en el transporte público urbano más del 80% utiliza Diesel como combustible, en algunos casos también utilizan Gas Natural.

La Figura 6-7⁸⁶ muestra el comportamiento de la contribución por estado a nivel nacional de PM_{2.5}, NO_x y COV, para los cuatro estados del norte del país. Para PM_{2.5} el estado de Chihuahua, tiene un porcentaje mayor de contribución en comparación con los otros estados en el periodo analizado, para NO_x el estado de Nuevo León presenta una mayor contribución en 2008 y 2016 con 7.5% y 3.7% a nivel nacional y en 2013 es Sonora con 4.3%. Para COV, Sonora contribuye mayormente a la emisión a nivel nacional.

Figura 6-7: Porcentaje de contribución de la emisión a nivel nacional de los estados de Baja California, Chihuahua, Nuevo León y Sonora de PM_{2.5}, NO_x y COV en los años 2008, 2013 y 2016



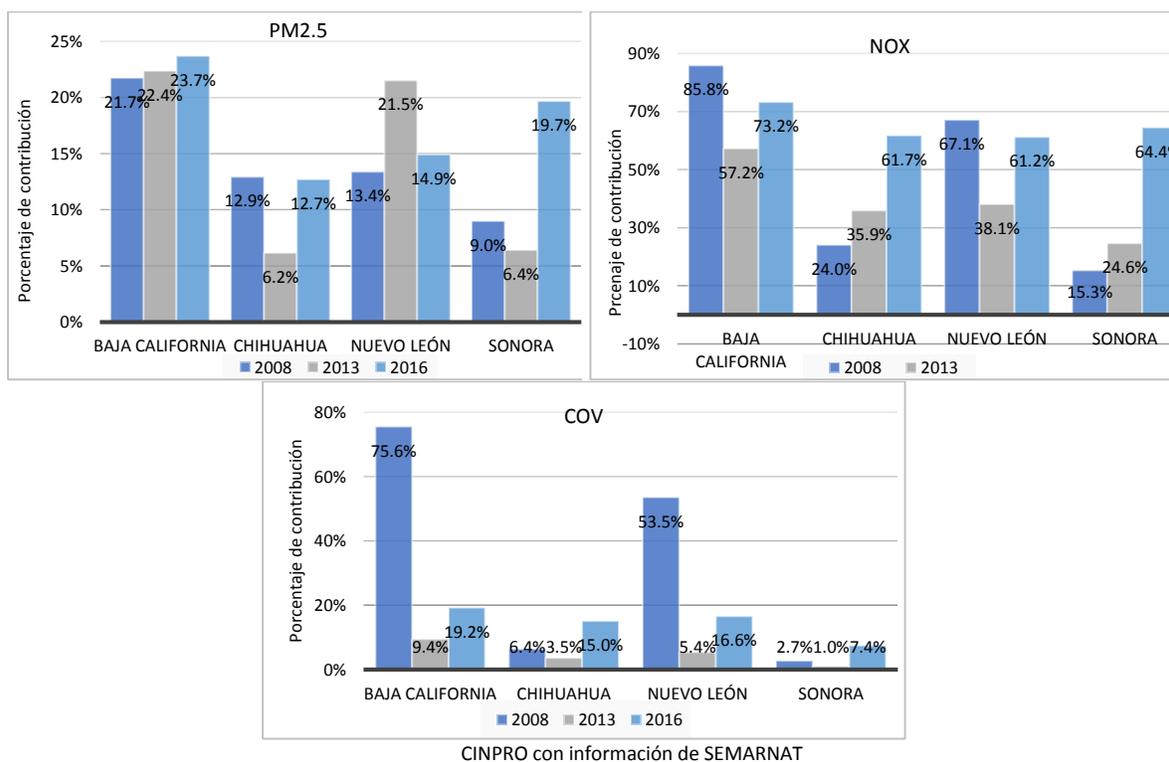
La diferencia que existe en la contribución a nivel nacional de los distintos contaminantes radica en las actividades en cada estado, esto está diferenciado por tanto en las fuentes de emisión.

⁸⁶ (SEMARNAT a, 2019). Bases de datos de los Inventarios Nacional de Emisiones 2005, 2008, 2013 y 2016. 2019. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>.

6.2.4. Comparación de la contribución porcentual por fuentes móviles de 2008- 2016

Para conocer el comportamiento de la contribución porcentual de la emisión a nivel nacional es necesario conocer o identificarlo por su fuente de emisión, en la Figura 6-8⁸⁷ se muestra esta contribución para PM_{2.5}, NO_x y COV producto de las fuentes móviles en los cuatro estados de la frontera norte.

Figura 6-8: Porcentaje de contribución de la emisión por fuentes móviles a nivel nacional de los estados de Baja California, Chihuahua, Nuevo León y Sonora de PM_{2.5}, NO_x y COV en los años 2008, 2013 y 2016



Con respecto a PM_{2.5}, NO_x y COV el estado de Baja California contribuye a nivel nacional por fuentes móviles en un porcentaje mayor que el resto de los estados con 23.7% en 2013 para PM_{2.5}, 73.2% de NO_x y 19.2% de COV, en el mismo año se observa un repunte importante en el estado de Sonora de estos mismos contaminantes para el 2016 en comparación con el 2013.

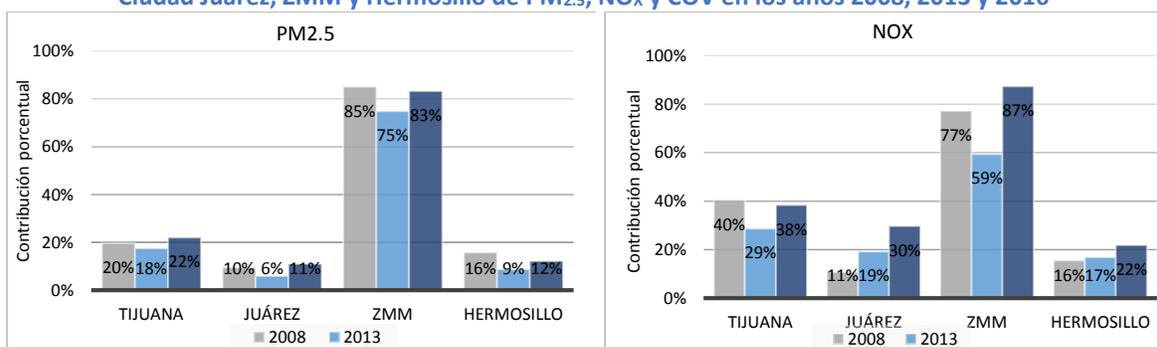
6.2.5. Comparación de la contribución porcentual local de fuentes móviles

La comparación entre las ciudades del norte en la contribución a nivel nacional producto de las fuentes móviles, indica que la ZMM contribuye en una mayor cantidad de PM_{2.5}, NO_x, y COV en los tres años analizados, seguido por Tijuana. Esto indica que la flota vehicular (cantidad de vehículos) presente en la ZMM es mayor que en las otras ciudades (Ciudad Juárez, Tijuana y Hermosillo) (Figura 6-9)⁸⁸. Analizando en forma particular cada ciudad podemos observar un aumento en el porcentaje de contribución de la emisión del año 2013 a 2016.

⁸⁷ Fuente: Ibidem

⁸⁸ Fuente: Ibidem

Figura 6-9: Porcentaje de contribución de la emisión por fuentes móviles a nivel nacional de Tijuana, Ciudad Juárez, ZMM y Hermosillo de PM_{2.5}, NO_x y COV en los años 2008, 2013 y 2016



CINPRO con información de SEMARNAT

6.3. Discusión de resultados y conclusiones del capítulo.

En cuanto a la línea base de inventarios para las cuatro ciudades en donde el BDAN ha implementado EL PROGRAMA, podemos observar que existe mejoría en cuanto a la antigüedad vehicular promedio, sin embargo EL PROGRAMA se enfocó en la ZMM, dejando de lado a ciudades como Tijuana y Ciudad Juárez en donde su antigüedad promedio es de 17 y 19 años respectivamente. También es de que la ZMM tiene unidades en estratos tecnológico sin control lo que se observa claramente en aumentos de emisión de contaminantes de PM_{2.5} y NO_x, en los años en donde ya existían programas como BRT.

La ciudad de Hermosillo es un caso muy peculiar ya que no solo mejoro considerablemente la edad promedio de su flota de autobuses de transporte público, sino también que ya no existen estratos vehiculares sin control o muy bajo control de emisiones, esto debe tomarse en cuenta ya que aunado a EL PROGRAMA del BDAN, existió un cumulo de programas y restructuración lo que permitió no solo la disminución de unidades con capacidad de usuarios mayor, si no también mejoras tecnológicas que le permitieron mejorar de forma contundente.

El progreso de las emisiones determinadas en los inventarios muestra claramente que las fuentes de origen vehicular es una de las mayores contribuyentes en un área urbana. Por su origen las partículas y NO_x son los marcadores del transporte público urbano (autobuses mayormente a diésel), en tal sentido ZMM y Tijuana tienen un mayor aporte en cada estado lo que presupone mayor cantidad de transporte y desplazamientos.

7. Modelación con MOVES

7.1. Antecedentes

En el año 2005 el INE (Instituto Nacional de Ecología ahora INECC), en colaboración con la WGA (Asociación de Gobernadores del Oeste) publicó la Guía de elaboración y uso de inventarios de emisiones para México⁸⁹, la cual integra cuatro de los ocho manuales que originalmente formaron parte del Proyecto de Inventarios de Emisiones para México, (volúmenes I, II, III y VIII). Además, se continúa con la elaboración de una serie de guías metodológicas para la elaboración y usos de inventarios de emisiones de fuentes específicas, que puedan ser aplicadas en todo el país por las autoridades locales, estatales y federales.

Como se ha mencionado los inventarios son una de las principales herramientas de gestión de la calidad del aire, en este sentido las metodologías establecidas para el cálculo de emisiones pueden ser utilizadas para determinar los beneficios ambientales de las diferentes políticas implementadas por parte de los diferentes órdenes de gobierno, en materia de tecnología vehicular o mejora en las condiciones de tránsito.

A nivel nacional existen diferentes modelos utilizados para la estimación de las emisiones vehiculares, siendo el modelo MOVES-México el que actualmente se utiliza para la elaboración de los inventarios de emisiones, dicho modelo basa sus estimaciones en patrones de velocidad, características de los combustibles, condiciones meteorológicas, tipos de carreteras y distribución de la antigüedad del parque vehicular entre otros.

7.2. Metodología

Las emisiones varían dependiendo de numerosos factores y, a diferencia de las fuentes puntuales, no es factible medir las emisiones provenientes de cada una de las fuentes móviles debido a la gran cantidad y variedad de vehículos en circulación que existen. Sin embargo, una adecuada estimación de este tipo de emisiones es indispensable si se pretende usar el inventario para la identificación de cambios debidos a la implementación de un programa o medida de control de calidad del aire.

Para generar un inventario de emisiones vehiculares confiable y preciso es indispensable conocer y entender la metodología general que se emplea en su elaboración. Existen diversos métodos para estimar emisiones vehiculares; sin embargo, existe una metodología general que permite estimar las emisiones vehiculares de acuerdo a lo siguiente:

La ecuación general para la estimación de las emisiones contaminantes de origen vehicular se presenta a continuación:

$$E_{ij} = FE_{ij} * DA_j * VC_j$$

Donde:

- E_{ij} : Emisiones totales de i contaminante y j categoría vehicular
- FE_{ij} : El factor de emisión de i contaminante y j categoría vehicular (en gr/km)
- DA_j : Dato de actividad de j categoría vehicular para un vehículo (en km/día o año).
- VC_j : El número de vehículos de j categoría

7.2.1. Modelo de emisiones MOVES

Uno de los aspectos importantes del cálculo de los beneficios ambientales en la sustitución de la flota vehicular de las cuatro ciudades de estudio, es la determinación del factor de emisión, para ello y como se mencionó anteriormente se utiliza el modelo de estimación de emisiones

⁸⁹ (Instituto Nacional de Ecología (INE), 2005). Guía de Elaboración y Uso de Inventario de Emisiones. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/447321/Guia_Inventario_de_Emisiones.pdf

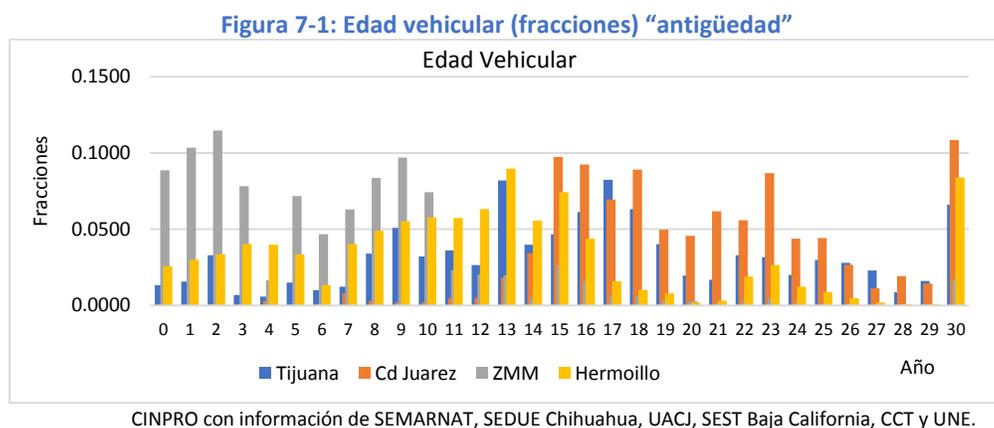
MOVES2014b de la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos, adaptado para las condiciones de México en 2014 y denominado MOVES-México en el modo factor de emisión, realizando las adecuaciones o calibraciones correspondientes para cada una de las Ciudades del presente estudio.

El modelo MOVES (MOTOR Vehicle Emission Simulator), consiste en una serie de bases de datos relacionales. Este sistema permite estimar emisiones y factores de emisión para un amplio rango de contaminantes, la cual mejora la estimación a través del uso de patrones de manejo. El modelo puede ser usado tanto para vehículos que circulan en carretera como para vehículos fuera de camino, y permite múltiples escalas de análisis, las cuales van desde intersecciones hasta la estimación de un inventario nacional. El modelo MOVES es el reemplazo de los modelos MOBILE6 y NONROAD, usados anteriormente en los inventarios de emisiones en México.

El modelo MOVES incluye las herramientas, los algoritmos, los datos y los conocimientos necesarios para su uso en todos los análisis de emisiones de fuentes vehiculares asociados al desarrollo de regulaciones, normas, inventarios y proyecciones, tanto regionales como nacionales.

7.2.2. Calibración del modelo MOVES para autobuses

Para la Calibración del modelo MOVES, se adecua la base de datos de flota vehicular de autobuses para determinar las fracciones para vehículos actuales y con una antigüedad de hasta 30 años. La Figura 7-1 presenta las fracciones de las cuatro ciudades del estudio⁹⁰.



De la figura anterior, las fracciones de la antigüedad vehicular por Ciudad son totalmente diferentes, aún y cuando cuenten con unidades del mismo año modelo, pero difieren en cantidades.

Para efectos de identificar la flota que fue renovada, se utiliza la base de datos del BDAN en cuanto a las unidades incorporadas en El PROGRAMA. La Figura 7-2 ⁹¹presenta el año modelo y tipo de combustible de los autobuses incorporados en cada ciudad, mismas que son utilizadas para determinar los beneficios ambientales.

⁹⁰ (SEMARNAT a, 2019). Bases de datos de los Inventarios Nacional de Emisiones 2005, 2008, 2013 y 2016. 2019.

<https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>.

(Secretaría de desarrollo urbano y ecología (SDUE) y Univerisdad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), 2019). Diseño operacional de las rutas troncales 1 y 2 del sistema integrado de transporte Ciudad Juárez.

(Secretaría de economía del gobierno del estado de Baja California, 2020). Padrón vehicular 2019

(Consejo Ciudadano del Transporte Público Sustentable del Estado de Sonora (CCT), 2019). ESTUDIO TÉCNICO PARA LA DETERMINACIÓN DE TARIFAS DEL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO EN HERMOSILLO 2017. https://0201.nccdn.net/1_2/000/000/13b/762/ESTUDIO-T--CNICO-PARA-LA-DETERMINACI-N-DE-TARIFAS-DEL-TRANSPORTE-P--BLICO-URBANO-EN-HERMOSILLO-2017.pdf

(UNE transporte urbano del Estado de Sonora, 2020). Rutas de Hermosillo. <http://une.sonora.gob.mx/rutas/ubica-tu-camion.html>

⁹¹ (BDAN, 2020). Bases de datos con las unidades incorporadas en el programa

Figura 7-2: Número de autobuses Sustituídos o ampliados en el PROGRAMA del BDAN en Ciudad Juárez, Hermosillo, Tijuana y ZMM

CIUDAD	C. Juárez				Hermosillo		Tijuana		ZM. Monterrey			
	Diesel		Gas		Diesel		Diesel		Diesel		Gas	
Modelo	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S
2015			35	25		30	3		0	0		
2016	30	7			30	10	2	71	18	10	40	32
2017	5								32	10	10	2
2018									0	80	0	83
2019									4	83	9	61

A. Ampliación. S. Sustitución.
CINPRO con Información del BDAN

Para la calibración del modelo se ocupó los siguientes insumos y procesamiento:

- Promedio horario mensual de la temperatura y humedad para el año 2019, se integra a las bases de datos correspondiente y se da el formato requerido por el modelo.
- Especificaciones del combustible en cuanto a contenido de azufre y se integran a la base de datos correspondiente y en el formato adecuado para el modelo.⁹²
- Bases de datos con la información de la flota vehicular de autobuses (cantidad) y se obtienen las fracciones correspondientes y en el formato adecuado para el modelo^{93, 94,95,96}.
- Los kilómetros recorridos a la base de datos correspondiente y en el formato adecuado para el modelo.
- La Información de tipos de vialidades y patrones de conducción se toman los datos predeterminados del modelo.

El modelo se ejecuta en el modo factor de emisión. Los factores de emisión por año modelo que se obtuvieron fueron para Compuestos orgánicos volátiles (COV); Monóxido de carbono (CO); Óxidos de nitrógeno (NOx) y Partículas de 2.5 micrómetros (PM_{2.5} total).

7.3. Resultados de la modelación con MOVES y la comparación entre las 4 ciudades del PROGRAMA del BDAN

7.3.1. Comportamiento en el tiempo de los estratos tecnológicos y comparación entre las 4 ciudades del PROGRAMA del BDAN.

De acuerdo a la evolución que ha tenido la normatividad nacional en cuanto a los estratos tecnológicos en vehículos pesados de la NOM-044-SEMARNAT (DOF, 2018), en la Figura 7-3⁹⁷ se presentan las equivalencias con respecto a la normatividad equivalente de Estados Unidos (estándares definidos como EPA y de Europa definidos como (EURO)).

Figura 7-3: Equivalencias de Estrato Tecnológico de EPA y EURO y la normatividad Nacional

Años modelo	Estrato tecnológico
2015 y posteriores	Sin regulación
2005 a 2014	EPA 91
1994 a 2004	EPA 98
1991 a 1993	Combinación de EPA y EURO
1990 y anteriores	Entrada de EURO V y BRT

CINPRO con información de EPA 2020,

⁹² (DOF, 2018). Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, Especificaciones de calidad de los petrolíferos.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016

⁹³ (UNE transporte urbano del Estado de Sonora, 2020) Rutas de Hermosillo. <http://une.sonora.gob.mx/rutas/ubica-tu-camion.html>

⁹⁴ *Ibidem*.

⁹⁵ (Consejo Ciudadano del Transporte Público Sustentable del Estado de Sonora (CCT), 2019), ESTUDIO TÉCNICO PARA LA DETERMINACIÓN DE TARIFAS DEL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO EN HERMOSILLO 2017

https://0201.nccdn.net/1_2/000/000/13b/762/ESTUDIO-T--CNICO-PARA-LA-DETERMINACI--N-DE-TARIFAS-DEL-TRANSPORTE-P--BLICO-URBANO-EN-HERMOSILLO-2017.pdf

⁹⁶ *Ibidem*

⁹⁷ (Environmental Protection Agency, EPA, 2020).Code of Federal Regulativos.(Código Federal de regulación). Control of Emissions From New an in use Highway Vehicles (Control of Emissions From New an in use Highway Vehicles).

<https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-86>

En las Figuras 7.4^{98,99} se presenta la evolución que ha tenido los autobuses de transporte público en términos de los estratos tecnológicos por ciudad, para Ciudad Juárez para el 2008 el 66% del padrón de autobuses estaba compuesto por unidades que no cumplían ninguna regulación de emisiones, en contraste para el 2018, el 13% del padrón de autobuses cumple con regulaciones EPA y EURO y el 1% corresponde al estrato de la tecnología que no cumple ningún estándar tecnológico.

Para Hermosillo el 2008 el 46% de los autobuses, no tienen ningún estándar tecnológico, asimismo para 2018, este tipo de vehículos ya no está presente en el padrón y la flota circulante cuenta con estándares EPA y EURO. Para 2018 en Tijuana el 43% los autobuses cumplen con estándares EPA y EURO, en tanto que aún se observan unidades 1990 y anteriores que carecen de regulaciones ambientales (11%). El padrón de autobuses en ZMM a 2018 cumple estándares EPA y EURO en 90.1%, asimismo la composición de autobuses que carecen de regulaciones es del 1.77%^{100,101}.

Figura 7-4: Evolución del padrón vehicular de autobuses de transporte público en Ciudad Juárez

Estrato tecnológico	2008				2013				2016				2018			
	C.J	H	T	ZMM	C.J	H	T	ZMM	C.J	H	T	ZMM	C.J	H	T	ZMM
2015 y posteriores	3,789	0	0	0	2366	0	0	0	612	25	15	661	10	146	71	1325
2005 a 2014	306	140	6	4164	251	166	1	6,081	594	190	123	2304	88	231	237	1778
1994 a2004	1,418	280	103	5230	1221	159	53	2,345	2,103	174	267	379	926	0	284	264
1991 a 1993	213	55	58	1104	557	26	26	438	84	22	43	29	41	0	42	13
1990 y anteriores	0	399	273	859	0	324	186	412	4	42	74	68	118	0	75	61

CJ. Ciudad Juárez, H. Hermosillo, T. Tijuana y ZMMM- Zona Metropolitana de Monterrey.
CINPRO con información de SEMARNAT, SEST, CCT, Agencia Estatal de Transporte

La Figura 7-5 muestra la comparación porcentual que se tiene en cada estrato tecnológico para cada ciudad.

Figura 7-5: Comparación porcentual por estrato tecnológico del padrón de autobuses de transporte en Cd. Juárez, Hermosillo, Tijuana y ZMM en 2018

Estrato tecnológico	Cd. Juárez	Hermosillo	Tijuana	ZMM
2015 y posteriores	10%	39%	10%	38.5%
2005 a 2014	3%	61%	33%	51.7%
1994 a2004	78%		40%	7.7%
1991 a 1993	7%		6%	0.4%
1990 y anteriores	1%		11%	1.8%

Ciudad Juárez y Tijuana tienen su mayor porcentaje de su padrón de autobuses en el estrato 1994-2004, mientras Hermosillo y ZMM en el 2005 a 2014. A pesar que Tijuana tiene un porcentaje (33%) mayor en un estrato tecnológico con mayor control de emisiones (2005 a 2014) en comparación a C. Juárez (3%), podemos observar que más de 70% de las unidades están en el estrato de EPA 98 (1994-2004). La ZMM tiene más del 90% con tecnologías EPA y EURO, aún conservan autobuses sin ningún control de emisiones.

⁹⁸ (SEMARNAT a, 2019) Bases de datos de los Inventarios Nacional de Emisiones 2005, 2008, 2013 y 2016
<https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>

⁹⁹ (UACJ-SDUE, 2019) Diseño operacional de las rutas troncales 1 y2 del sistema integrado de transporte Ciudad Juárez 2019. Chihuahua, México.

¹⁰⁰ (SEMARNAT, 2017) Estrategia Nacional de Calidad del Aire. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/calidad-del-aire-98085>

¹⁰¹ (Agencia Estatal de Transporte, 2021). Información por Ruta " catálogo de Rutas de la ZMM".
<http://www.cetyv.gob.mx/transporte/fichas.htm>

7.3.2. Reducción de emisiones y comparación entre las 4 ciudades del PROGRAMA del BDAN para PM_{2.5}, NO_x y CO mediante el uso del modelo MOVES

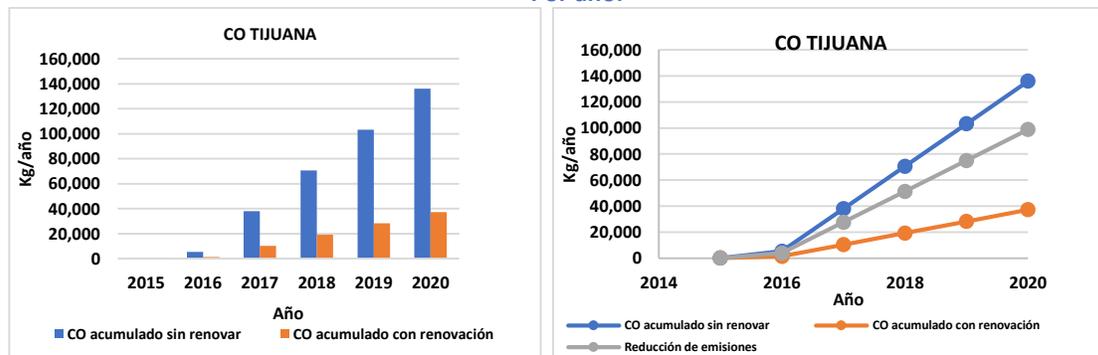
Como se mencionó en párrafos anteriores, para efectos de determinar los beneficios ambientales, se utiliza el modelo de emisiones MOVES México para la obtención de factores de emisión y para el cálculo de emisiones se utiliza la metodología referida en la guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas. Por lo que se calibro el modelo para cada una de las ciudades del presente estudio en cuanto a: Meteorología (humedad, presión y temperatura), Composición y tamaño de la flota vehicular (fracción por año modelo y número total de unidades), Tipo de combustible, Actividad vehicular, Programa de verificación vehicular.

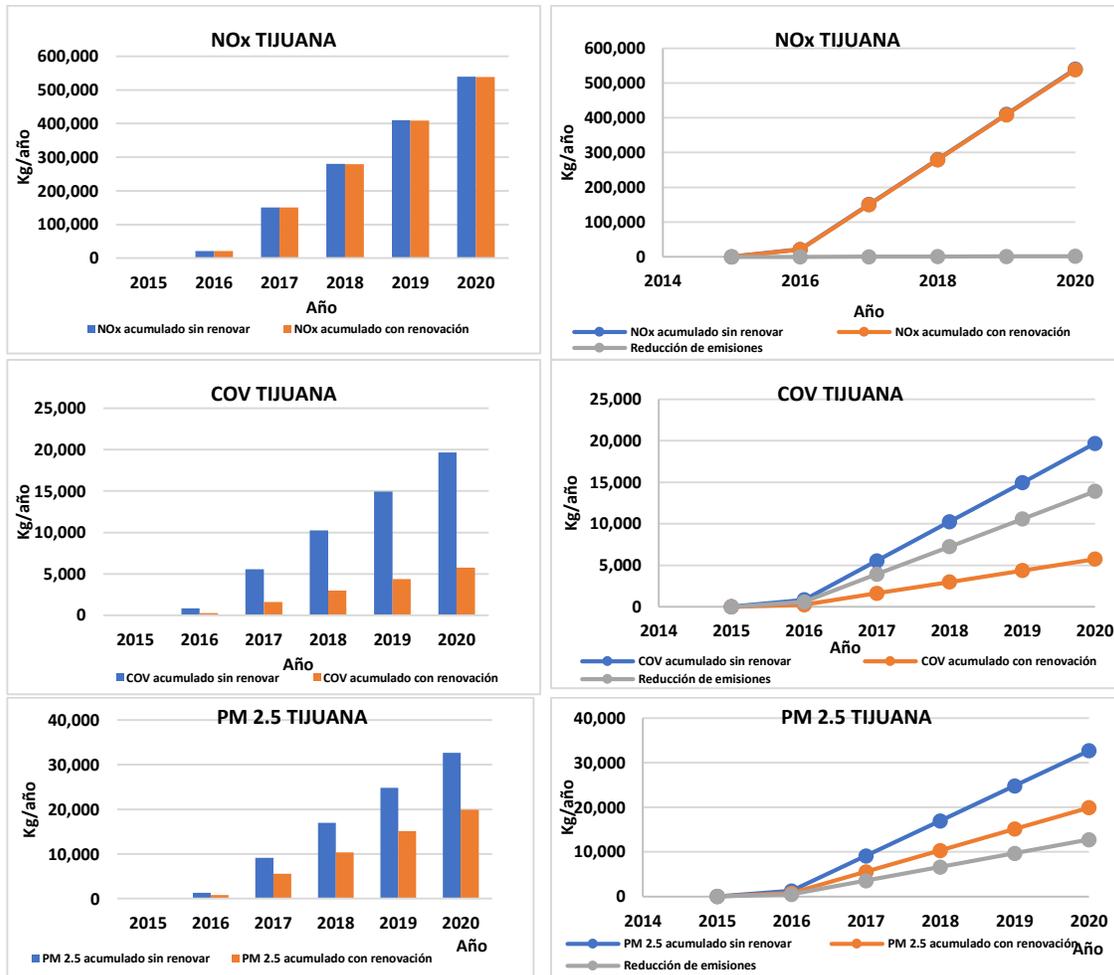
En cuanto a valores predeterminados se utilizó: Bines de velocidad y Distribución por tipo de vialidad. Los factores de emisión que se determinaron con el modelo se encuentran anexos a este documento.

En cuanto a la Actividad vehicular, se obtuvieron los días acumulados determinando los días recorridos por las unidades que fueron sustituidas, se calculó el número con base en la fecha de disposición de la unidad, para ello se conforman dos bases de datos, esto debido al tipo de combustible (diésel y gas) de igual forma se integran los campos 2015_A, 2016_A, 2017_A, 2018_A, 2019_A y 2020_A, que indica el número de días con que cuenta la unidad año con año de manera acumulada siendo el 2020 el año en que termina dicho cálculo, adicionalmente las bases de datos se conforman por Ciudad. Los resultados se encuentran anexos al documento por unidades sustituidas a diésel y gas, y para cada ciudad.

Las emisiones resultantes de cada año calendario (año) se analizaron considerando la comparación de las unidades sustituidas en EL PROGRAMA los años de implementación (renovación) por tipo de combustible y año de ingreso y la comparación con la flota existente en cada ciudad (sin renovar) por año. La Figura 7-6, muestra los resultados de la emisión con y sin renovar las unidades a diésel para cada contaminante evaluado para la ciudad de Tijuana, por año.

Figura 7-6: Emisiones con y sin renovar a Diésel en el PROGRAMA para Tijuana de CO, COV, PM2.5 y NOx. Por año.





CINPRO con datos obtenidos de la modelación de emisiones con el modelo MOVES MEXICO

De acuerdo a la figura anterior, con la sustitución de los vehículos se tiene una reducción de 98.8 toneladas de CO, equivalentes al 72.6% acumulado al 31 de diciembre de 2020. De manera general, en óxidos de nitrógeno no se observan grandes reducciones y a lo largo del tiempo solo se reduce 1.7 toneladas. Con la sustitución de los vehículos se tiene una reducción de 13.9 toneladas de COV, equivalentes al 70.7% acumulado al 31 de diciembre de 2020. La sustitución de los vehículos se tiene una reducción de 12.7 toneladas de PM_{2.5}, equivalentes al 39% acumulado al 31 de diciembre de 2020.

Los resultados y gráficos para Ciudad Juárez, Hermosillo y ZMM se encuentran anexos al documento. Sin embargo los resultados para la flota a diésel presenta los siguientes resultados.

Para Ciudad Juárez con la sustitución de los vehículos se tiene una reducción de 65.9 toneladas de CO. En óxidos de nitrógeno se reduce 1.1 toneladas al 2020, se tiene una reducción de 7.6 toneladas de COV al 2020 y una reducción de 9.04 toneladas de PM_{2.5} al 31 de diciembre de 2020.

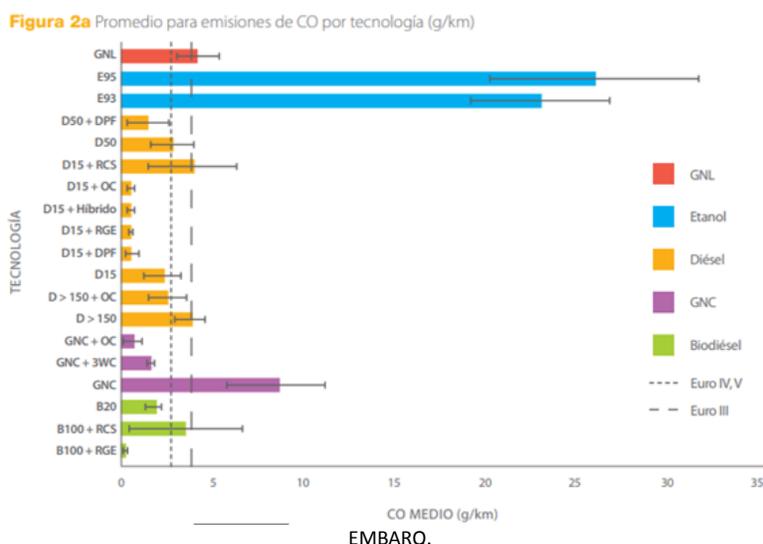
Para la ZMM con la sustitución de los vehículos se tiene una reducción de 279.2 toneladas de CO equivalentes a una reducción del 72.6%. En óxidos de nitrógeno se reducen 4.5 toneladas al 2020. Una reducción de 32.3 toneladas de COV al 2020, equivalentes al 71.2% y se tiene una reducción de 30.8 toneladas de PM_{2.5} al 31 de diciembre de 2020, equivalentes al 39%.

En el caso de Hermosillo con la sustitución de los vehículos se tiene una reducción de 150.2 toneladas de CO equivalentes a una reducción del 72.6%, para óxidos de nitrógeno se reducen 2.4 toneladas al 2020, para COV una reducción de 33.5 toneladas al 2020 y una reducción de 16.5 toneladas de PM_{2.5} al 31 de diciembre de 2020.

En cuanto a las emisiones de gas es importante mencionar que los factores de emisión para gas, se obtuvieron del modelo MOVES Estados Unidos para el condado del Paso-Texas, esto debido a que el modelo MOVES-MEXICO no cuenta con la opción de modelar vehículos a gas en cualquiera de sus modalidades.

Otro aspecto que se encontró en los factores obtenidos, es que para monóxido de carbono presentan valores mucho más altos que los obtenidos en vehículos a diésel, esto empata con el estudio, desarrollado por EMBARQ¹⁰², donde se presentan diferentes tecnologías y combustibles en la Figura 7-7 se muestra el comportamiento del monóxido de carbono que reporta dicho estudio siendo congruente con los factores de emisión obtenidos con el modelo MOVES.

Figura 7-7: Emisiones de escape de autobuses de transporte público, EMBARQ



Para el caso de vehículos a gas los resultados completos y las gráficas correspondientes se presentan anexos al documento, los resultados generales son los siguientes:

Para el caso de vehículos a gas el PROGRAMA solo los incorporo en ZMM y Ciudad Juárez.

Para Ciudad Juárez con la sustitución de los vehículos se tiene un aumento de **325.6** toneladas de CO, es decir se aumenta la emisión en una magnitud de 3.3 veces con relación a la emisión de un vehículo a diésel.

En óxidos de nitrógeno se reduce 524.4 toneladas al 2020, equivalentes al 97.7% en comparación de los vehículos sustituidos a diésel. Se tiene una reducción de 8.4 toneladas de COV al 2020, equivalentes al 51% de reducción. Para PM_{2.5} se tiene una reducción de 31.4 toneladas al 31 de diciembre de 2020 equivalentes a una reducción del 99.6%.

Para la ZMM con la sustitución de los vehículos se tiene un aumento de 1,335.7 toneladas de CO. En óxidos de nitrógeno se reducen 1,434 toneladas al 2020, equivalentes al 96.9% en

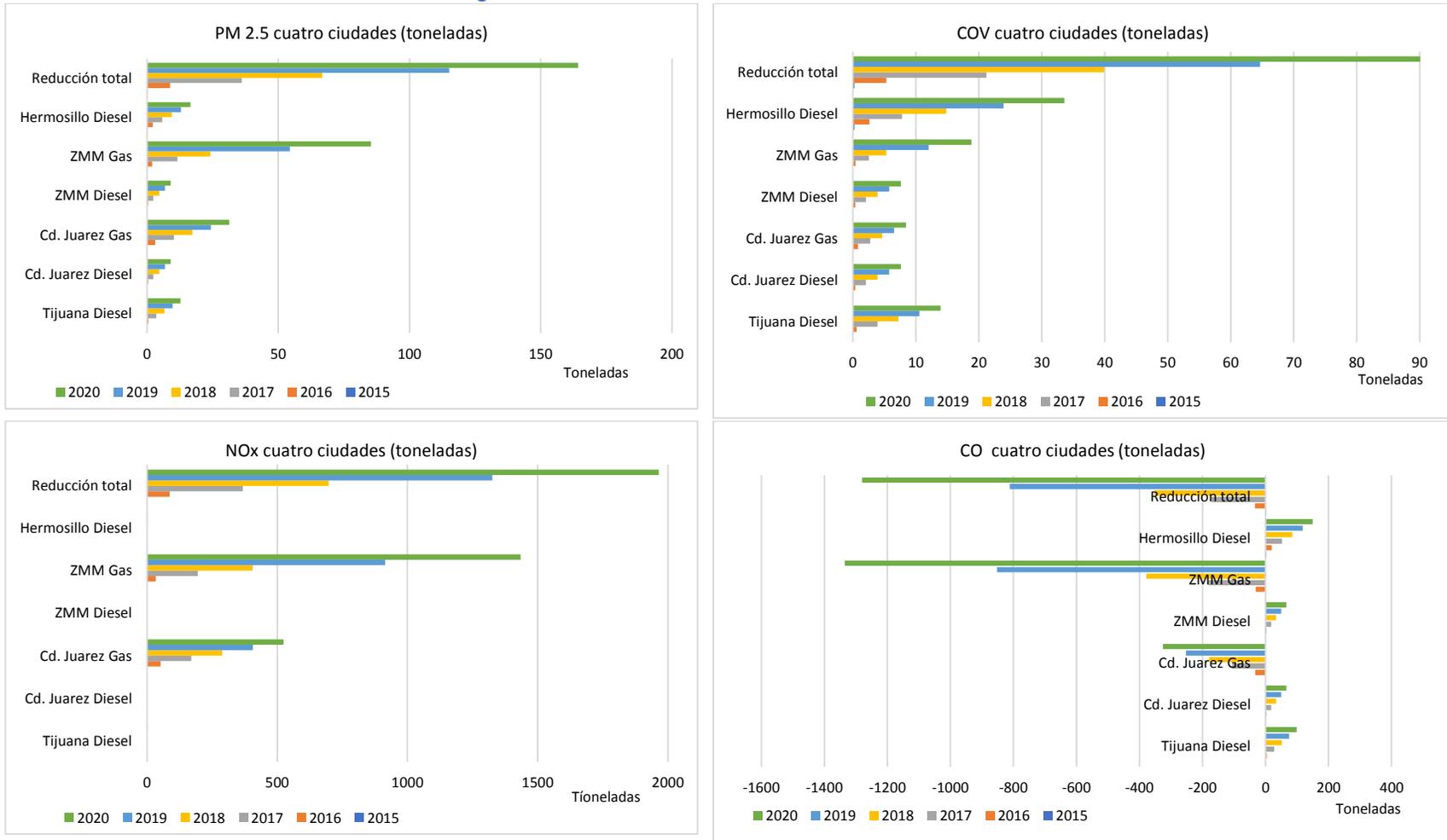
¹⁰² (EMBARQ, 2012). EMISIONES DE ESCAPE DE AUTOBUSES DE TRANSPORTE PÚBLICO, p.p 16. la figura 2.a. <https://wrirosscities.org/sites/default/files/Spanish-Exhaust-Emissions-Transit-Buses-EMBARQ.pdf>

comparación de los vehículos sustituidos a diésel, se tiene una reducción de 18.8 toneladas de COV al 2020, equivalentes al 38% de reducción y una reducción de 85.3 toneladas de PM_{2.5} al 31 de diciembre de 2020 equivalentes a una reducción del 99.5%

Con estos resultados se presenta una comparación de la reducción de emisiones obtenidas en las cuatro ciudades, Las

Figura 7-8 presenta esta comparación en la reducción de las emisiones en toneladas hasta el 31 de diciembre de 2020.

Figura 7-8: Reducción de emisiones en las cuatro ciudades



CINPRO con datos obtenidos de la modelación de emisiones con el modelo MOVES MEXICO

Los resultados globales de las reducciones por contaminante de los cuatro contaminantes y ciudades evaluadas, se presente en la Figura 7-9. Cabe aclarar que las emisiones de CO son las emisiones que aumentarían.

Figura 7-9: Reducción total de emisiones por contaminante para las 4 ciudades

Contaminante	Toneladas
CO	-1280.36
NOx	1965.23
COV	90.11
PM _{2.5}	164.20

7.4. Discusión de resultados y conclusiones del capítulo

De manera general, los beneficios ambientales obtenidos por la sustitución de unidades de transporte, presenta gran relevancia de acuerdo a los resultados obtenidos en cuanto a reducción de emisiones, aún y cuando se tiene un incremento en la emisión de monóxido de carbono por el uso de combustible a gas natural, no obstante al utilizar este combustible se abaten los dos principales contaminantes de los vehículos a diésel que son los óxidos de nitrógeno y el material particulado, principales causantes de enfermedades respiratorias.

Con relación a los óxidos de nitrógeno pudieran parecer en apariencia mínimos, se debe considerar que la tecnología en México aún no cumple estándares estrictos en materia de este contaminante como lo sería la adopción de estándares EPA 2007 o EURO VI, los cuales incorporan tecnologías de control de emisiones de este contaminante.

Otro aspecto que debe considerarse son los insumos alimentados al modelo, relacionados a la actividad vehicular y al padrón vehicular utilizado, como referencia el estudio **Diseño Operacional de las Rutas Troncales 1 y 2 del Sistema Integrado de Transporte de Ciudad Juárez 2019**, realizado por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, con dicho estudio, las autoridades actualizaron el inventario de rutas (2018) por lo que en la actualidad existen 70 rutas en operación (1 ruta troncal y 69 rutas convencionales). La flota está constituida por 1,140 autobuses convencionales de 70 pasajeros y 61 autobuses de la ruta troncal con capacidad de 90 pasajeros, con relación a la edad promedio de los autobuses convencionales, ésta es de 19.9 años y de 2.9 años en los autobuses de la ruta troncal. En este estudio se menciona que existe muy poca renovación de los autobuses, otro aspecto importante del estudio en la situación base del año 2018 es el tiempo de viaje de 29.0 min, ya que aún y cuando se obtuvo información para las demás ciudades, en algunas de ellas fue muy difícil determinar la actividad por la ausencia de información.

Con relación al material particulado se resalta su reducción, tomando en cuenta el contenido de azufre en el diésel, asimismo la composición de la flota vehicular ya que como se mencionó en párrafos anteriores, aún existe una composición en la flota vehicular de unidades año modelo 1990 y anteriores las cuales carecen de regulaciones ambientales.

Los beneficios ambientales se verán incrementados a lo largo del tiempo, no obstante, es importante señalar que el mayor efecto se lograra al sustituir la flota vehicular por tecnologías más recientes que incorporen los últimos adelantos a nivel internacional.

8. Conclusiones y hallazgos finales del estudio

Los estados de la zona fronteriza norte de México es un escenario de actividades intensas y variadas, la interacción de los mismos se da en perjuicio de la movilidad conjunta, es decir, las actividades encuentran un espacio urbano incongruente con las necesidades de desplazamiento, que deriva en congestión o inmovilidad. Ante esta realidad el uso del transporte público es la solución para la movilidad.

En Ciudad Juárez, Hermosillo, Tijuana y ZMM se producen altos niveles de contaminación a través de las emisiones principalmente de material particulado, por lo general, estos se encuentran fuera de los valores máximos de concentración aceptadas por las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiente, en específico por $PM_{2.5}$ donde también se tienen riesgos a la salud altos a muy altos en el periodo analizado (2010-2019), este contaminante se asocia a diversas actividades humanas (antropogénicas) considerando el transporte público una de ellas. De esta forma la calidad del aire que se presenta en un área urbana está íntimamente relacionada a su movilidad.

En el presente estudio donde se evalúa el impacto de la calidad del aire por el programa de sustitución y ampliación de autobuses de transporte urbano en estas 4 ciudades de la frontera norte del país desarrollado por el BDAN, podemos considerar los siguientes aspectos:

1. Como se ha reportado en otros estudios y se pudo ver en el presente las emisiones vehiculares tiene una contribución muy importante en la exposición a contaminantes de la población, por lo que es recomendable el restringir la circulación de vehículos altamente contaminantes y promover e incentivar modos sustentables de transporte como podría ser el uso de bicicleta, la implementación de corredores peatonales, entre otros.
2. Se observó que las concentraciones de CO_2 medidos en el BRT1 (ruta “ unidades nuevas”) fue menores que los determinados en las rutas de transporte “unidades mixtas” y “unidades antiguas”, en el caso de $PM_{2.5}$, hubo una contribución importante de las fuentes presentes en los recorridos, sobre todo las obras de construcción en la ciudad y la resuspensión de partículas por suelos desprovistos de vegetación, para concluir respecto a la exposición de contaminantes de los usuarios del transporte público es necesario realizar un estudio más amplio.
3. Aun y cuando no se observó un efecto significativo a la mejora de la calidad del aire por la implementación de EL PROGRAMA, si se puede confirmar que una de las fuentes principales de la mala calidad del aire por partículas es el transporte público, por tanto, el funcionamiento de este y otros programas impactaran positivamente a mediano plazo considerando el precedente, en este sentido se debe atender los problemas de calidad del aire en cada ciudad, toda vez que si el problema reside en el material particulado u ozono, los autobuses a gas son la mejor opción, de igual forma debe tratar de privilegiarse o incentivar el uso de vehículos de gran capacidad.
4. La importancia de EL PROGRAMA a la mejora de la edad promedio de los autobuses es evidente, al relacionar la edad promedio de los autobuses de EL PROGRAMA, con la edad promedio de toda la flota de autobuses en cada ciudad. Esto refleja la efectividad a esta clase de programas a la reducción de las emisiones originadas por esta fuente, ya que según los estratos tecnológicos planteados y sus estándares de emisiones un vehículo, año modelo más reciente contamina hasta el 80% menos que uno sin regulación, asimismo es importante resaltar que no es suficiente la sustitución, ya que el programa debe asegurar que los vehículos siempre se encuentren con un desempeño ambiental óptimo y esto solo se logrará a través de un mantenimiento adecuado.

5. Es indudable que se debe proseguir con la implementación de esta clase de programas en la región, pero como se observó cuando se trabaja más de una ciudad, se debe priorizar la cantidad de unidades de sustitución y ampliación en cada sitio considerando tamaño de flota, antigüedad de los vehículos, demanda atendida, porcentaje de contribución a la emisión de distintos contaminantes, riesgo a la población considerando el índice de calidad del aire y salud, de manera general se puede decir que EL PROGRAMA presenta grandes reducciones de emisiones de contaminantes al ambiente, las cuales se determinaron en 939 toneladas hasta el 31 de diciembre de 2020, con una flota relativamente baja en tamaño (722 unidades).
6. Es de suma importancia sumarse a programas ya existentes como los establecidos en los distintos PIMUS de cada Estado, para mejorar la calidad de vida de los habitantes, con ello se definirán estrategias más puntuales atendiendo zonas de gran demanda, elevando el número de pasajeros transportados.
7. Es importante mencionar que los incentivos para pasar del transporte público concesionado a sistemas de transporte sustentable, como lo son los corredores BRT, deben ir acompañados de normas y políticas de planificación urbana, como carriles exclusivos, mejor ventilación en vehículos y en estaciones de transporte público, y otros instrumentos destinados a reducir las emisiones generadas por el sector transporte público de pasajeros.
8. Se deberán realizar estudios que recaben información actualizada respecto a la actividad que presenten los autobuses, incluyendo patrones de conducción por ciudad, esto permitirá realizar estimaciones de contaminantes de manera más precisa.
9. De manera general, los beneficios ambientales obtenidos por la sustitución de unidades de transporte, presenta gran relevancia de acuerdo a los resultados obtenidos en cuanto a reducción de emisiones, aún y cuando se tiene un incremento en la emisión de monóxido de carbono por el uso de combustible a gas natural, no obstante al utilizar este combustible se abaten los dos principales contaminantes de los vehículos a diésel que son los óxidos de nitrógeno y el material particulado, principales causantes de enfermedades respiratorias.
10. Los beneficios ambientales se verán incrementados a lo largo del tiempo, no obstante, es importante señalar que el mayor efecto se lograra al sustituir la flota vehicular por tecnologías más recientes que incorporen los últimos adelantos a nivel internacional.

9. Referencia

- Agencia Estatal de Transporte. (2021). *Información por Ruta " catalogo de Rutas de la ZMM"*. Recuperado el 20 de Agosto de 2020, de <http://www.cetyv.gob.mx/transporte/fichas.htm>
- Ashmore M R, e. (2000). Effects of Traffic Management and Transport Mode on the Exposure of Schoolchildren to Carbon Monoxide. *Environmental Monitoring and Assessment*, 49–57. Recuperado el 15 de Enero de 2021
- Banco de Desarrollo de America del Norte (BDAN). (2020). *RESUMEN DE ACTIVIDADES DE IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS*. Recuperado el 5 de Agosto de 2020, de https://www.nadb.org/uploads/files/avance_de_proyectos_activos.pdf
- BDAN. (2020). Banco de Desarrollo de America del Norte. *Bases de datos con la unidades incorporadas en el programa*.
- BDAN. (2021). *Visión, Misión y Valores Centrales*. Recuperado el 5 de Agosto de 2020, de https://www.nadb.org/uploads/files/avance_de_proyectos_activos.pdf
- Bryan N. Duncan, e. (2014). Satellite data of atmospheric pollution for U.S. air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid. *Atmospheric Environment*, 647-662. Recuperado el 20 de Diciembre de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231014004270#!>
- Consejo Ciudadano del Transporte Público Sustentable del Estado de Sonora (CCT). (2019). *ESTUDIO TÉCNICO PARA LA DETERMINACIÓN DE TARIFAS DEL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO EN HERMOSILLO 2017*. Recuperado el 5 de Agosto de 2020, de https://0201.nccdn.net/1_2/000/000/13b/762/ESTUDIO-T--CNICO-PARA-LA-DETERMINACI--N-DE-TARIFAS-DEL-TRANSPORTE-P--BLICO-URBANO-EN-HERMOSILLO-2017.pdf
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2018). Recuperado el 4 de Enero de 2021, de *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/delimitacion-de-las-zonas-metropolitanas-de-mexico-2015.html>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (23 de 12 de 1994a). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire, monóxido de carbono (CO)*. Recuperado el 5 de Agosto de 2020, de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4780110&fecha=23/12/1994
- DOF. (23 de 12 de 1994b). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2020, de *NORMA Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO2)*.: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4780125&fecha=23/12/1994

- DOF. (16 de 7 de 2012). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2020, de NORMA Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire.:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16/07/2012
- DOF. (20 de 08 de 2014). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2020, de NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación.:
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014
- DOF. (19 de 02 de 2018). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de NORMA Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos no metano, hidrocarburos no metano más óxidos de nitrógeno, partículas y amoniaco....:
https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5513626&fecha=19/02/2018
- DOF. (2018). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 4 de enero de 2021, de NORMA Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017,,:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5513626&fecha=19/02/2018
- DOF. (29 de 8 de 2018). *Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, Especificaciones de calidad de los petrolíferos*. Recuperado el 4 de Enero de 2021, de
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016
- DOF. (20 de 11 de 2019). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2020, de NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud.:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019
- DOF. (25 de 09 de 2020a). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 5 de Agosto de 2020, de PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-SSA1-2020, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al monóxido de carbono (CO).: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5601282&fecha=25/09/2020
- DOF. (28 de 09 de 2020b). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2020, de PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-023-SSA1-2020, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de nitrógeno (NO2).: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5601338&fecha=28/09/2020
- EMBARQ. (2012). *EMISIONES DE ESCAPE DE AUTOBUSES DE TRANSPORTE PÚBLICO*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2020, de <https://wrirosscities.org/sites/default/files/Spanish-Exhaust-Emissions-Transit-Buses-EMBARQ.pdf>
- Environmental Protection Agency, EPA. (2020). *40 CFR Part 86 - CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE HIGHWAY VEHICLES AND ENGINES*. Recuperado el 5 de Agosto de 2020, de <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-86>

- Giovanni. (2021). Recuperado el 20 de Diciembre de 2020, de <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- Gómez-Perales, e. (2004). Commuters' exposure to PM2.5, CO, and benzene in public transport in the metropolitan area of Mexico City. *Atmospheric Environment*, 1219-1229.
- Gómez-Perales, et.al. (February de 2007). Bus, minibus, metro inter-comparison of commuters' exposure to air pollution in Mexico City. *Atmospheric Environment, Volume 41*(Issue 4), 890-901.
- INECC. (2021). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Recuperado el 10 de Agosto de 2020, de Sistema de Consultas de indicadores de Calidad del Aire: (<http://scica.inecc.gob.mx/exec/datadl>)
- INECCa. (2018). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2021, de VERIFICACIÓN DE DATOS Y GENERACIÓN DE INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AIRE EN CIUDADES MEXICANAS: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/370495/Reporte_Final_INECC-LPN-007_2017_vINECC_para_pagina__3_.pdf
- INECCb. (2018). *Instituto Nacional de Ecología y cambio Climático*. Recuperado el 10 de Enero de 2021, de INFORME NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE 2017: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2017.pdf>
- INECCc. (2019). *INFORME NACIONAL DE LA CALIDAD DEL AIRE MÉXICO*. Recuperado el 10 de Agosto de 2020, de <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2018.pdf>
- INECC-SEMARNAT. (2016). *Elaboración de la línea base de exposición personal a contaminantes atmosféricos en la Ecozona de Cuernavaca Morelos*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado el 30 de Septiembre de 2020
- INECC-SEMARNAT-JICA. (2013). *Exposición personal a carbonilos (aldehídos), CO, BTEX y PM2.5 en microambientes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado el 10 de Octubre de 2020
- INEGI. (2020). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 4 de Enero de 2021, de Vehículos de Motor Registrados en Circulación: <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est>
- INEGI. (01 de 2021). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 5 de Enero de 2021, de Censo de Población y Vivienda 2020: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Tabulados>
- INE-SEMARNAT. (2005). *Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 2021, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/447321/Guia_Inventario_de_Emisiones.pdf

- Instituto Nacional de Ecología (INE). (2005). *Guía de Elaboración y Uso de Inventario de Emisiones*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2020, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/447321/Guia_Inventario_de_Emisiones.pdf
- Intituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016a). *Elaboración de la línea base de exposición personal a contaminantes atmosféricos en el corredor de transporte masivo Tuzobus en Pachuca, Hidalgo*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- ITDP. (Octubre de 2012). *La importancia de reducción del uso del automóvil en México*. Recuperado el 15 de Enero de 2021, de <https://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Importancia-de-reduccion-de-uso-del-auto.pdf>
- Luke D.Knibbs, e. (2011). A review of commuter exposure to ultrafine particles and its health effects. *Atmospheric Environment*, 2611-2622. Recuperado el 30 de Septiembre de 2020
- M. Tögel, e. (2014). Low-Emission Zones in European Countries. *TRANSACTIONS ON TRANSPORT SCIENCES*, 97-108. Recuperado el 15 de Enero de 2021
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2016). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 4 de Enero de 2021, de <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/>
- Secretaria de economia del gobierno del estado de Baja California. (2020). Padrón vehicular 2019.
- Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU). (2019). *ANATOMÍA DE LA MOVILIDAD EN MÉXICO*. Recuperado el 5 de Enero de 2021, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/411314/Anatom_a_de_la_movilidad_en_M_xico.pdf
- Secretaria de desarrollo urbano y ecología (SDUE) y Univerisdad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ). (2019). *Diseño operacional de las rutas troncales 1 y 2 del sistema integrado de transporte Ciudad Juárez*.
- SEMARNAT. (2017). *Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naurales*. Recuperado el 4 de Enero de 2021, de Estrategia Nacional de Calidad del Aire: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/calidad-del-aire-98085>
- SEMARNAT. (2018). *Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 4 de Agosto de 2020, de PROAIRE. Programa de Gestión para la Mejora de la Calidad del Aire del estado de Sonora (2017-2026): <https://cedes.gob.mx/images/pdf/ProAireSonora.pdf>
- SEMARNAT. (2019). *Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2020, de Documento del Inventario Nacional de Emisiones 2005: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>
- SEMARNAT a. (2019). *Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2020, de Bases de datos de los Inventarios Nacional de Emisiones 2005,

2008, 2013 y 2016: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>

Sistema Meteorológico Nacional. SMA. (2012). *Normales Climatológicas por Estado*. Recuperado el 20 de Agosto de 2020, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>

SMN. (2020). Recuperado el 20 de Agosto de 2020, de Bases de datos sobre parámetros meteorológicos de Cd. Juárez, Tijuana, ZMM y Hermosillo 2010-2019: <https://smn.conagua.gob.mx/es/variables-meteorologicas>

Subsecretaría de Desarrollo sustentable y Secretaría de Economía Sustentable y Turismo. Gobierno de Baja California. (SEST). (Enero de 2021). En respuesta al oficio TAD/TB 0929-8/20 del BDAN, se entregaron las bases de datos crudas del periodo 2010-2019 de sus estaciones de la red de monitoreo del periodo 2010-2019.

UACJ-SDUE. (2019). *Diseño operacional de las rutas troncales 1 y2 del sistema integrado de transporte Ciudad Juárez 2019*. Chihuahua: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

UNE transporte urbano del Estado de Sonora. (2020). *Rutas de Hermosillo*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2020, de <http://une.sonora.gob.mx/rutas/ubica-tu-camion.html>

WHO. (2009). *WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould*. Germany: WHO Regional Office for Europe. Recuperado el 5 de Septiembre de 2020, de <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2009/damp-and-mould-health-risks,-prevention-and-remedial-actions2/who-guidelines-for-indoor-air-quality-dampness-and-mould>

WHO. (2010). *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe. Recuperado el 30 de Septiembre de 2020

10. Anexos

- Resultados del control de calidad del monitoreo de exposición personal
- Bases de datos del monitoreo de exposición personal
- Bases de datos procesadas de meteorología
- Bases de datos procesadas de calidad del aire
- Gráficos del comportamiento y tendencia del monitoreo de la calidad del aire
- Bases de datos de entrada y salida de modelo MOVES
- Calibración del modelo MOVES