

Evaluación de la red de monitoreo de la calidad del aire en Ciudad Juárez, Chihuahua, 2024

- Informe Final -



Elaborado por:

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático – INECC

Coordinación General de Laboratorios de Referencia en Investigación sobre Contaminación y Salud Ambiental

Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos

Para:

Banco de Desarrollo de América del Norte – NADBank

CONTRATO No NADBC23-150
PID: 9TA2023_1102

Blvd. Adolfo Ruiz Cortines, No. 4209, Col. Jardines en la Montaña, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14210. Ciudad de México.
Tel. +52 (55) 54246400. www.gob.mx/inecc

Directorio

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Lic. Mariana Hernández Morales

Encargada de despacho de la Dirección General del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Dr. José Abraham Ortinez Álvarez

Encargado de despacho de la Coordinación General de Laboratorios de Referencia en Investigación sobre Contaminación y Salud Ambiental

Biól. Rodolfo Iniestra Gómez

Director de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos

Mtro. Francisco Hernández Ortega

Subdirector de Modelación y Salud

Dr. José Andrés Aguilar Gómez

Subdirector de Movilidad Sustentable

Act. María Guadalupe Tzintzun Cervantes

Subdirectora de Calidad del Aire

M. en G. Josefina Gabriel Morales

Jefa de Departamento de Modelación Ambiental y Salud

I.Q.I. Becki Jiménez Gatica

Jefa de Departamento de Caracterización de Fuentes Móviles

TSUTIC. Jazmín Quezada Herrera

Jefa de Departamento de Información de Calidad del Aire

Téc. Francisco Fernando Guardado López

Técnico Superior

Ing. Luis Iván Ávila García

Enlace Informático

Dirección de Ecología de Ciudad Juárez

Lic. César René Díaz Gutiérrez

Director de Ecología del Municipio de Juárez

Ing. Ricardo Aragón Burciaga

Jefe del Departamento de Verificación Vehicular y Calidad del Aire

Ing. Gerardo Borunda Almada

Técnico del Programa de Verificación Vehicular

Ing. Germán Pérez González

Técnico del Programa de Verificación Vehicular

Banco de Desarrollo de América del Norte - NADBank

John Beckham

Director General del NADB

Salvador López

Director Ejecutivo de Asuntos Ambientales

Fernando Ortiz

Titular de la Unidad de Gestión Ambiental y Conocimiento

Tomás Balarezo

Director Asociado de Gestión del Conocimiento y Desarrollo Institucional

**PROYECTO FINANCIADO CON RECURSOS DEL BANCO DE
DESARROLLO DE AMÉRICA DEL NORTE - NADBANK**

Contenido

Directorio.....	i
Contenido.....	iii
Lista de figuras.....	iv
Lista de tablas.....	vi
Resumen ejecutivo.....	7
1. Introducción.....	16
2. Antecedentes.....	19
3. Objetivo.....	22
4. Metodología.....	23
4.1 Caracterización del entorno físico de las estaciones de monitoreo en operación en el año 2024.....	23
4.2 Modelación de Aptitud: identificación de sitios más aptos para la ubicación de estaciones de monitoreo.....	27
4.3 Identificación de sitios para realizar monitoreo de calidad del aire con base en el riesgo a la salud humana.....	32
5. Resultados.....	38
5.1 Caracterización de entorno de las estaciones de monitoreo en operación en el año 2024.....	38
5.2 Modelación de Aptitud: identificación de sitios más aptos para la ubicación de estaciones de monitoreo.....	41
5.3 Dosificación ambiental: identificación de para realizar monitoreo de calidad del aire con base en el riesgo a la salud humana.....	51
6. Análisis de resultados.....	64
6.1. Propuesta de red de monitoreo.....	64
6.2. Contaminantes por considerar.....	77
6.3. Elementos que deberán integrar el SMCA.....	78
6.4. Consideraciones finales.....	82
7. Conclusiones.....	84
8. Bibliografía.....	88

Lista de figuras

Figura RE.1. Sitios potenciales de monitoreo a nivel de celda de modelación.....	11
Figura 4.1. Distancia recomendada, en metros, de equipos muestreadores de partículas respecto a vialidades según intensidad de tráfico.....	26
Figura 4.2. Elementos usados para caracterizar el entorno de una estación de monitoreo y definir su escala espacial de representatividad.....	27
Figura 4.3. Aproximación conceptual usada para desarrollar una evaluación de Aptitud.....	28
Figura 4.4. Criterios usados para definir la mayor Aptitud de un sitio para instalar una estación de monitoreo de calidad del aire.....	30
Figura 4.5. Identificación de sitios potenciales de monitoreo de la calidad del aire en Ciudad Juárez con base en la dosificación ambiental.....	33
Figura 4.5. Cobertura geográfica del dominio de modelación fotoquímica para estimar concentraciones de contaminantes en Ciudad Juárez.....	34
Figura 5.1. Resultados de la modelación de Aptitud para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire en Ciudad Juárez bajo cuatro distintos escenarios.....	46
Figura 5.2. Ubicación geográfica de las colonias, con áreas de mayor Aptitud en los escenarios 1, 2, 3 y 4 para la instalación de estaciones de monitoreo en Ciudad Juárez.....	50
Figura 5.3. Cobertura geográfica del dominio de modelación fotoquímica para estimar concentraciones de contaminantes en Ciudad Juárez.....	52
Figura 5.4. Partículas suspendidas PM _{2.5} . Conglomerados por día formados a partir de celdas con MI > VR, en ambos periodos modelados.....	54
Figura 5.5. Resultado del cálculo de la Eficiencia de la Estación, se aprecian los valores de porcentajes ilustrados en colores, asignados a cada celda.....	57
Figura 5.6. Celdas donde se ubican los sitios determinados para monitoreo con base en riesgos a la salud por partículas PM _{2.5} , utilizando los valores límites de 25 µg/m ³ (diciembre) y 15 µg/m ³ (julio), como promedio de 24 horas.....	58
Figura 5.7. Ozono. Conglomerados por día formados a partir de celdas con MI > VR; periodo del 3 al 10 de julio de 2018.....	60

Figura 5.8. Ubicación, eficiencia y cobertura de los sitios potencial de monitoreo de ozono en Ciudad Juárez, Chihuahua.....	61
Figura 5.9. Ubicación de los 4 sitios de monitoreo de la red mostrada en la Tabla 5.4.....	63
Figura 6.1. Sitios potenciales de monitoreo resultantes de la sobre posición de resultados obtenidos para partículas PM _{2.5} y ozono.....	67
Figura 6.2. Sitios potenciales de monitoreo resultantes de la sobre posición espacial de resultados obtenidos para partículas PM _{2.5} y ozono y eliminación de sitios potencialmente redundantes.....	68
Figura 6.3. Vialidades con y sin pavimento en Ciudad Juárez	69
Figura 6.4. Punto adicional de monitoreo sugerido para evaluar el impacto de los caminos no pavimentados a las concentraciones de partículas suspendidas en la región.....	70
Figura 6.5. Imágenes de satélite y uso de suelo en las celdas identificas como sitios potenciales de monitoreo	71
Figura 6.6. Ubicación sitios potenciales de monitoreo y de estaciones de monitoreo actualmente en operación en Ciudad Juárez.....	72
Figura 6.7. Áreas más aptas para el monitoreo de la calidad del aire dentro o en la proximidad de cada celda o punto potencial de monitoreo	74
Figura 6.8. Instalaciones públicas identificadas al interior de cada sitio (celda) potencial de monitoreo para la ubicación de las 6 estaciones de monitoreo que se sugiere conformen el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire de Ciudad Juárez.....	75
Figura 7.1. Sitios potenciales de monitoreo a nivel de celada de modelación.....	84

Lista de tablas

Tabla RE.1. Nivel de Aptitud de la ubicación actual de las estaciones de monitoreo existentes en Ciudad Juárez conforme a las condiciones de cada uno de los escenarios evaluados.	10
Tabla RE.2. Ubicación geográfica de sitios potenciales de monitoreo (centro de celda).....	11
Tabla RE.3. Alternativas para la instalación de las estaciones de monitoreo que conformarán el nuevo SMCA de Ciudad Juárez.....	12
Tabla 4.1. Resumen de los criterios de localización de toma de muestra o trayectoria de muestreo.	25
Tabla 4.1a. Distancia de separación mínima entre vialidades y estaciones de monitoreo de escala vecinal para la medición de monóxido de carbono.	26
Tabla 4.1b. Distancia de separación mínima entre vialidades y estaciones de monitoreo de escala vecinal y urbana para la medición de ozono (O ₃) y óxidos de nitrógeno (NO, NO ₂ , NO _x y NO _y).	26
Tabla 4.2. Escenarios de ponderación de variables en la modelación de Aptitud del terreno.....	32
Tabla 5.1. Escala espacial de representatividad por contaminantes en cada una de las estaciones que conforman el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire de Ciudad Juárez, Chihuahua.....	42
Tabla 6.1. Edificios públicos propuestos para la instalación de las estaciones de monitoreo que conformarán el nuevo SMCA de Ciudad Juárez.....	76
Tabla 7.1. Ubicación geográfica de sitios potenciales de monitoreo (centro de celda).....	84
Tabla 7.2. Alternativas para la instalación de las estaciones de monitoreo que conformarán el nuevo SMCA de Ciudad Juárez.....	85

Resumen ejecutivo

El monitoreo de la calidad del aire toma una importancia fundamental para identificar y proveer la información necesaria a fin de evaluar la calidad del aire de cada región y sus tendencias, así como una herramienta para desarrollar estrategias de prevención y control, planes de manejo de la calidad del aire y políticas ambientales, entre otras aplicaciones. En este contexto, los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA), se han convertido en una herramienta que permite conocer, con niveles aceptables de confiabilidad, la calidad del aire con respecto a contaminantes específicos y formular, con base en los datos obtenidos, las estrategias de control y las medidas adecuadas para una efectiva gestión ambiental.

Una vez que un SMCA está operando, es conveniente llevar a cabo evaluaciones periódicas del mismo a fin de determinar si sigue cumpliendo con el objetivo para el que fue originalmente diseñado, si se requieren nuevos sitios de monitoreo, si alguno o algunos de los sitios de monitoreo existentes ya no son necesarios o si nuevas tecnologías son apropiadas para su incorporación al mismo. Esta evaluación tiene su fundamento en el hecho de que a través del tiempo pueden presentarse una serie de factores que contribuyen a replantear los objetivos del monitoreo en un lugar determinado, por ejemplo: cambios en la calidad del aire, modificaciones en el tamaño, distribución y/o estructura de la población, modificaciones en los patrones de emisión de contaminantes provenientes de las diferentes fuentes, en la aparición o actualización de nuevas regulaciones ambientales, o el mejor entendimiento de la dinámica atmosférica.

En este contexto, el Banco de Desarrollo de América del Norte (NADBank, por sus siglas en inglés), solicitó al INECC el desarrollo del presente proyecto que tuvo el objetivo de evaluar el diseño de la actual red de monitoreo automático de la calidad del aire en Ciudad Juárez y, en su caso, proponer la reubicación y/o la instalación de estaciones de monitoreo adicionales que permitan mejorar la representatividad de los niveles de concentración a los que está expuesta la población.

Actualmente la red de monitoreo de la calidad del aire de Ciudad Juárez es operada por la Dirección de Ecología del Municipio de Juárez, en colaboración con la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, y está conformada por 5 estaciones automáticas. Las estaciones de mayor antigüedad operan desde el año 1996 y la más reciente desde el año 2023. De las cinco estaciones sólo dos (Clínica de Nutrición e Instituto de Ingeniería y Tecnología) miden todos los contaminantes criterio (partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$, ozono, dióxido de azufre, dióxido de

nitrógeno y monóxido de carbono), en tanto que las tres restantes (Advance, Canales Lira y Planta de Tratamiento) sólo miden ozono y monóxido de carbono.

De acuerdo con la información proporcionada por personal de la Dirección de Ecología del Municipio de Juárez, no se cuenta con documentación que permita identificar los criterios y/o metodología empleada en su momento para determinar la ubicación y el objetivo de cada una de las estaciones que conforman este sistema de monitoreo. Así mismo, se ignora si la ubicación actual de cada estación ha sido la misma desde que entró en operación o si bien alguna de ellas ha experimentado alguna reubicación y los motivos de ésta.

Con este antecedente, para lograr el objetivo antes descrito, se desarrollaron tres grandes actividades: 1) caracterización del entorno físico de cada estación de monitoreo; 2) evaluación de la aptitud del terreno donde se ubican las estaciones para realizar el monitoreo de la calidad del aire; y, 3) identificación de sitios para realizar monitoreo de la calidad del aire con base en el riesgo a la salud.

La caracterización del entorno tuvo como meta evaluar cada una de las estaciones y determinar su escala espacial de representatividad para cada contaminante medido. Esta evaluación se realizó conforme a los criterios descritos en el Título 40 del Código Federal de Regulaciones, específicamente en la Parte 58, apéndices D y E. Dichos lineamientos contemplan, entre otros aspectos: altura de la toma de muestra, distancia horizontal o vertical entre la toma de muestra y estructuras de soporte, distancia entre la toma de muestra y áreas arboladas y distancia respecto a vialidades en función de su aforo vehicular, presencia de obstáculos como bardas o árboles que impidan el libre flujo del viento.

La escala espacial de la representatividad de una estación de monitoreo se describe en términos de las dimensiones físicas de la parcela de aire más cercana a éste a lo largo de la cual las concentraciones de contaminantes son razonablemente similares. La escala espacial de representatividad está íntimamente ligada con los objetivos del monitoreo de la calidad del aire, por lo que esta actividad permitió determinar si la escala espacial de representatividad determinada para cada estación correspondía o no con el objetivo prioritario de la red, que a decir de las autoridades responsables de su gestión incluye: a) evaluar el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental, b) evaluar el estado de la calidad del aire respecto a la concentración de contaminantes criterio, y, c) informar y prevenir a la población sobre los niveles de contaminación.

La modelación de Aptitud es una aplicación común y valiosa de los Sistemas de Información Geográfica (GIS) que ha sido aplicada para identificar los sitios más

apropiados para un uso o actividad particular de acuerdo con requerimientos o preferencias específicas. En este proyecto el concepto de “Aptitud” se asumió como la capacidad de un sitio o área determinada para soportar el monitoreo de la calidad del aire. En este contexto, la modelación de Aptitud aplicada en este trabajo tuvo por objeto identificar las zonas más aptas en el área urbana de Ciudad Juárez para albergar estaciones de monitoreo de la calidad del aire.

Para identificar los sitios más adecuados para realizar monitoreo de la calidad del aire con base en el riesgo a la salud se aplicó una metodología desarrollada por Noll y Mitsutomi (1983) que jerarquiza los sitios potenciales para monitoreo atmosférico de acuerdo con su habilidad para representar el patrón de “dosificación ambiental”, entendida ésta como un indicador de riesgo a la salud de la población, que para su estimación toma en consideración tanto la concentración ambiental del contaminante como la concentración de población en un lugar determinado, así como la frecuencia con que se registran, en dicho punto, excedencias a algún valor de referencia orientado a la protección de la salud.

En esta metodología, para obtener la concentración del contaminante se modela la dispersión de los contaminantes en el aire. Se selecciona una concentración límite que no debe ser excedida. Un grupo de receptores contiguos que excedan el límite establecido son identificados en un conglomerado. A cada conglomerado se le asigna una dosificación ambiental representativa. Los receptores que se encuentren en un alto número de conglomerados son identificados como áreas de alta dosificación y se convierten en sitios potenciales de monitoreo. Tales sitios potenciales de monitoreo se jerarquizan de acuerdo con un valor de eficiencia. Dicha eficiencia es un indicador de la cantidad de contaminante que se recibe en el sitio seleccionado y en las áreas contiguas con respecto a la cantidad total de contaminante que se tiene en la zona de estudio durante todo el periodo modelado. Los puntos de monitoreo se eligen con base a dicha eficiencia.

En general, los resultados de la caracterización del entorno indican que, a nivel regional, las cinco estaciones analizadas, permiten caracterizar el estado de la calidad del aire bajo diferentes escenarios o condiciones de actividad comercial, industrial, vehicular, densidad poblacional y de uso de suelo. En principio, todas las estaciones, salvo ADVANCE-Keytronic, tendrían un entorno favorable para la medición de la calidad del aire. La estación ADVANCE, por su ubicación, se asume que es impactada de manera directa por las emisiones generadas por un parque ladrillero cercano y a favor del viento.

Los resultados de la modelación de Aptitud mostraron que, salvo la estación Clínica de Nutrición, todas las demás son susceptibles de reubicación a sitios con

mejores condiciones para el monitoreo (Tabla RE1). Especialmente en el escenario donde se ponderó con mayor peso a la población, es donde la mayoría de las estaciones de monitoreo actualmente en operación se ubican en sitios con el nivel de Aptitud más bajo (entre 5 y 7, en una escala de cero a diez, donde diez es el sitio más adecuado o Apto para el monitoreo de la calidad del aire y cero el sitio menos Apto para esta actividad). Este hecho, es por demás importante, si se considera que uno de los objetivos prioritarios que se persigue con el monitoreo de la calidad del aire es el de caracterizar los niveles de contaminación a los cuales está expuesta la población de un lugar determinado.

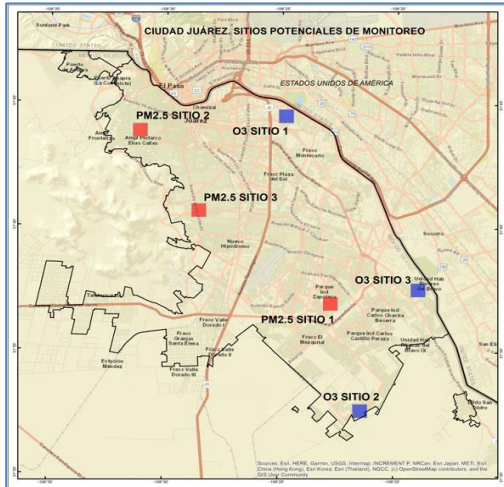
Tabla RE.1. Nivel de Aptitud de la ubicación actual de las estaciones de monitoreo existentes en Ciudad Juárez conforme a las condiciones de cada uno de los escenarios evaluados.

Estación de monitoreo	Nivel de aptitud de la ubicación actual				
	Clave	Escenario 1 (Todas las variables se ponderan igual)	Escenario 2 (Mayor ponderación a población y emisiones)	Escenario 3 (Mayor ponderación a emisiones)	Escenario 4 (Mayor ponderación a población)
Advance - Keytronic	ADV	7	7	7	7
Clínica de Nutrición	AUCJ	9	9	9	9
Canales Lira	CLB	7	8	7	7
Instituto de Ingeniería y Tecnología	IIT	5	5	5	5
Planta de Tratamiento	PTR	7	6	6	5

En general, los resultados tanto de la caracterización del entorno como la modelación de Aptitud revelaron que la mayoría de las estaciones de monitoreo presentaban áreas de oportunidad para mejorar la representatividad de las mediciones que realizan y cumplir con el objetivo de evaluar los niveles de concentración de contaminantes a los que está expuesta la población

Los resultados obtenidos a través de la aplicación de la metodología para estimar la dosificación ambiental permitieron verificar que prácticamente todas las estaciones actuales podrían ser reubicadas a efecto de lograr una mejor caracterización de la calidad del aire en la ciudad teniendo como prioridad la vigilancia del riesgo a la salud. Así mismo, esta metodología identificó la posibilidad de incrementar el número de estaciones de monitoreo para caracterizar el riesgo a la salud en toda el área urbana de Ciudad Juárez. En general, los resultados sugieren que el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire de la ciudad quede conformado por seis estaciones, conforme a la ubicación mostrada en la RE1 y Tabla RE2.

Figura RE.1. Sitios potenciales de monitoreo a nivel de celda de modelación



Fuente: Elaboración propia

Tabla RE.2. Ubicación geográfica de sitios potenciales de monitoreo (centro de celda)

Estación de monitoreo	Identificador	Coordenadas centro de celda	
		Latitud	Longitud
1	PM2.5 SITIO 1	31.615417	-106.37967
2	PM2.5 SITIO 2	31.731111	-106.518594
3	PM2.5 SITIO 3	31.677492	-106.475526
4	O3 SITIO 1	31.741345	-106.413202
5	O3 SITIO 2	31.543484	-106.357543
6	O3 SITIO 3	31.625105	-106.31655

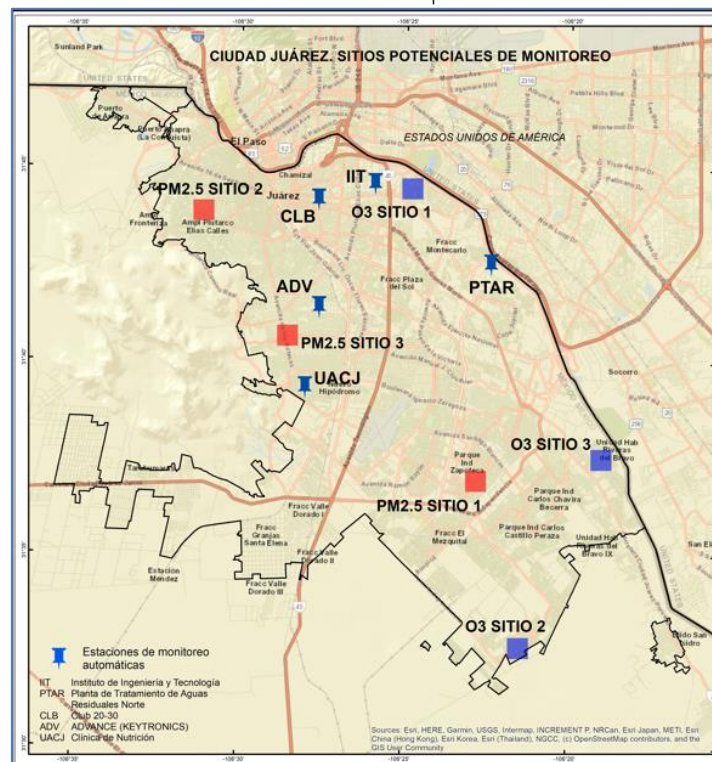
A partir de la sobreposición espacial de las coberturas relativas a las áreas de mayor Aptitud para realizar el monitoreo de la calidad del aire y las áreas de la ciudad identificadas como sitios potenciales de monitoreo indicadas la Tabla RE1 y Figura RE1, así como con la base de datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas, se identificaron instalaciones públicas, al interior de cada celda potencial de monitoreo o en su entorno inmediato, que pudieran dar alojamiento a las estaciones de monitoreo. El listado de alternativas identificadas por sitio propuesto es incluido en la Tabla RE.2. Es importante destacar, que será necesario realizar una evaluación general de cada opción a fin de identificar cual es la que ofrece las mejores condiciones para la instalación de las estaciones. Entre las consideraciones a tomar en cuenta deberán incluirse las siguientes: accesibilidad al sitio, suficiencia de espacio para la instalación de estaciones, acceso a energía eléctrica, acceso a servicio de internet, vigilancia para evitar actos de vandalismo, ausencia de edificios, muros y/o áreas arboladas que impidan el libre flujo del viento y distancia prudente de vialidades de alto flujo vehicular acorde con las recomendaciones de la USEPA.

Tabla RE.3. Alternativas para la instalación de las estaciones de monitoreo que conformarán el nuevo SMCA de Ciudad Juárez

Estación de monitoreo	Sitios potenciales de instalación	Coordenadas		Comentario
		Latitud	Longitud	
1	1. COLEGIO DE BACHILLERES DEL ESTADO DE CHIHUAHUA PLANTEL 11 TV	1. 31.611113	-106.374387	Ninguno
	2. ESCUELA PRIMARIA ALFONSO HEN	31.612485	-106.383896	
	3. ESCUELA PRIMARIA FEDERAL OTH	31.612847	-106.383803	
	4. JARDÍN DE NIÑOS VÍCTOR ALDRETE	31.615350	-106.375202	
	5. ESCUELA PRIMARIA NATALIA RAMOS MÁRQUEZ	31.618359	-106.379237	
	6. HOSPITAL GENERAL REGIONAL NÚMERO 66	31.618389	-106.383824	
	7. ESCUELA PRIMARIA MIGUEL ANGEL ACOSTA	31.618400	-106.379187	
	8. ESTANCIA INFANTIL BEBITOS	31.619512	-106.376656	
2	1. JARDÍN DE NIÑOS JUANA DE IBARBOUROU	31.731254	-106.513760	Ninguno
	2. ESCUELA PRIMARIA JUAN JOSÉ MARTÍNEZ EL PIPILA	31.732862	-106.518911	
3	1. ESTACIÓN ACTUAL UACJ	31.55519	-106.466418	Si la reubicación de la estación ADVANCE y/o UACJ en la celda identificada como sitio potencial de monitoreo no fuera posible porque no existen instalaciones que puedan alojar la instalación de la estación o bien en el entorno inmediato de las edificaciones existentes hay abundancia de calles y vialidades sin pavimentar, entonces sería recomendable mantener en funcionamiento la estación de monitoreo UACJ en el sitio en donde está actualmente, pero el análisis de los datos de partículas suspendidas se deberá tener presente el riesgo de registrar picos de concentración asociados a la resuspensión de polvo, tanto por el tránsito vehicular como por la acción del viento.
	2. COMUNITARIO KIKI ROMERO	31.673017	-106.473345	
	3. PRIMARIA LUIS G. INCLÁN	31.673588	-106.479281	
	4. ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA # 30	31.676883	-106.472959	
	5. CENTRO COMUNITARIO MORELOS	31.678814	-106.477163	
	6. CENTRO DE SALUD NO 6	31.680108	-106.475597	
	7. CENTRO COMUNITARIO INDEPENDENCIA II	31.680934	-106.475840	
	8. CENTRO DE SALUD	31.681354	-106.479920	
4	1. ESTACIÓN ACTUAL IIT	31.743138	-106.431999	Se recomienda como prioridad, mantener en operación en su sitio actual la estación de monitoreo IIT, observando las recomendaciones relativas a vigilar la modificación del entorno inmediato para mantener la representatividad de las mediciones de calidad del aire. Tales recomendaciones incluyen: <ul style="list-style-type: none"> Vigilar crecimiento de árboles cercanos y realizar actividades de poda cuando el tamaño les haga actuar como barrera al libre flujo de viento. Existe la posibilidad de incrementar la altura de la toma de muestra para reducir el impacto de la zona arbolada sobre la medición de la calidad del aire.
	2. ESCUELA PRIMARIA FEDERAL DAVID ALFARO SIQUEIROS	31.739770	-106.416574	
	3. JARDÍN DE NIÑOS MÉXICO	31.740242	-106.416410	
	4. CENTRO DE CAPACITACIÓN DE EDUCACIÓN ESPECIAL ZONA 20	31.742170	-106.410860	
	5. CENTRO DE ATENCIÓN MÚLTIPLE NÚMERO 25	31.742750	-106.410439	
	6. SECUNDARIA TÉCNICA NÚM. 38	31.743220	-106.410099	
	7. CECATI 87	31.744691	-106.410882	
5	1. ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA 93	31.539294	-106.359473	Ninguno
	2. ESCUELA PRIMARIA JAIME TORRES BODET	31.545681	-106.361424	
	3. JARDÍN DE NIÑOS LUCINA SAENZ HERRERA	31.546074	-106.359142	
6	1. JARDÍN DE NIÑOS MARÍA SOLEDAD MOTA VÁZQUEZ	31.622482	-106.320806	Ninguno
	2. JARDÍN DE NIÑOS FRANCISCO MUÑOZ LÓPEZ	31.624589	-106.317008	
	3. PRE ESCOLAR UN SIGLO DE SERVICIO	31.624599	-106.316990	
	4. ESCUELA PRIMARIA CARLOS URQUIDI GAYTÁN	31.626650	-106.314149	
	5. ESCUELA PRIMARIA RIVERAS DEL BRAVO	31.626685	-106.314103	
	6. ESCUELA PRIMARIA ESTATAL BENITO JUÁREZ	31.629084	-106.320733	

Como se puede apreciar en la Tabla anterior, se plantea la posibilidad de que dos de las cinco estaciones de monitoreo actualmente en operación se mantengan en el sitio donde actualmente están operando, ello debido a la cercanía con respecto a los puntos identificados con la metodología aplicada como mejor ubicación para caracterizar el riesgo a la salud. Estas estaciones son: Clínica de Nutrición (UACJ) e Instituto de Ingeniería y Tecnología (Figura RE2). Esta posibilidad además de reducir los costos asociados a una posible reconfiguración espacial de la red de monitoreo permite mantener el uso académico que se le da a una de estas estaciones, así como la información histórica de calidad del aire y meteorológica generada en ellas. En ambos casos, si se concreta esta posibilidad, se recomienda atender las sugerencias planteadas en la columna de comentarios a efecto de mantener la representatividad de las mediciones, así como claridad en la interpretación de los registros de concentración de contaminantes y la posible influencia del entorno inmediato.

Figura RE2. Sitios potenciales de monitoreo vs estaciones en operación.



Fuente: Elaboración propia INECC

Se sugiere que todas las estaciones de monitoreo cuenten con el equipamiento necesario para llevar a cabo la medición de todos los contaminantes criterio salvo el dióxido de azufre. Esta sugerencia se fundamenta en los criterios definidos por la USEPA en el Título 40 del Código Federal de Regulaciones, Parte 58, Subparte B, Apéndice D, numeral 4. Criterios de diseño específicos de contaminantes para

estaciones estatales y locales de monitoreo de calidad del aire (SLAMS, por sus siglas en inglés), donde se definen criterios específicos para determinar el número adecuado de estaciones para el monitoreo de cada contaminante en función del tamaño de población y niveles de concentración registrados en el sitio de interés. **Criterios que se asumieron como válidos en este trabajo para determinar la conveniencia o no de llevar cabo el monitoreo de cada contaminante. Entre las consideraciones** hechas para recomendar la medición de todos los contaminantes criterio, salvo el dióxido de azufre destacan los siguientes:

- **Niveles de concentración registrados en la ciudad superiores a los límites normados** de protección a salud con respecto a partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como de ozono.
- **Población superior a un millón de habitantes. Condición requerida por la USEPA para requerir la instalación de al menos una estación de monitoreo para la vigilancia de las concentraciones ambientales de monóxido de carbono y dióxido de azufre.**
- **Índice de Emisiones de Dióxido de Azufre ponderado por Población** estimado para Ciudad Juárez menor al índice sugerido por la USEPA para instalar una estación de monitoreo para vigilar las concentraciones de este contaminante.

En general, las principales ventajas que ofrece la propuesta de diseño de red de monitoreo que se presenta en este trabajo incluye:

- **Una mejor caracterización del riesgo a la salud asociada** a la calidad del aire que se registra en la ciudad
- **Se tiene una mayor cobertura espacial de la caracterización de la calidad de aire, pues se agregan estaciones** que permiten caracterizar la calidad del aire en la zona sur del área urbana de Ciudad Juárez, zona hacia donde se registra el crecimiento de la ciudad.
- **Se minimiza el impacto de fuentes específicas de emisión sobre las mediciones de calidad del aire realizadas** en algunas estaciones de monitoreo.
- **Compatibiliza de una mejor manera** la escala espacial **de representatividad de las mediciones de calidad del aire** que se pueden realizar en los sitios propuestos de monitoreo con el objetivo de caracterizar la calidad del aire a la que está expuesta la población.
- **Se aprovecha la información histórica generada** por dos de las estaciones de monitoreo actualmente en operación.

El establecimiento y operación de una red de monitoreo con la configuración propuesta se estima que será de utilidad para:

- Proveer información de manera oportuna a la población sobre los niveles de contaminación en la ciudad.
- Evaluar el cumplimiento de la normatividad mexicana en la materia.
- Activar procedimientos de control de emergencia para prevenir y/o controlar episodios de alta contaminación.
- Observar tendencias de contaminación en la región.
- Proveer datos para apoyar trabajos de investigación en materia de calidad del aire.

1. Introducción

El aire limpio es uno de los requisitos básicos de la salud y el bienestar de la sociedad. Sin embargo, la contaminación del aire, que es un problema causado principalmente por el desarrollo urbano, industrial y demográfico que demanda el uso de bienes y servicios con la consecuente generación de emisiones contaminantes a la atmósfera, sigue suponiendo una importante amenaza para la salud en todo el mundo (WHO, 2006).

Desde hace años la literatura, tanto a nivel nacional como internacional, ha documentado que elevaciones temporales en la contaminación del aire están asociadas con efectos a la salud (Lai et al., 2013, Lu et al., 2015 y Shang et al., 2013). Por ejemplo, se ha identificado que la contaminación del aire puede inducir efectos tales como: aumento de la incidencia de infecciones respiratorias (Torres-Meza, 2000; Hernández-Cadena et al., 2000), síntomas respiratorios como tos y respiración difícil o dolorosa y reducción de la función pulmonar (Orduz García et al., 2013; Samoli et al., 2016; Chen et al., 2016; y, Mirowsky et al., 2016), bronquitis crónica (Romano, 2000 y Orduz García et al., 2013), ataques de asma (Romieu et al., 1995; Rosas et al., 1998), reducción en la variabilidad cardiaca (Holguín et al., 2003) e incremento en el número de defunciones (Pope et al., 2002; Evans et al., 2002; Curtis et al., 2006; Samet y Krewsky, 2007; Romieu, 2007; Lepeule et al., 2012; Reyna et al., 2012; Romieu, et al., 2012, Hoek et al., 2013; y, He et al., 2016) y visitas hospitalarias (Romieu, et al., 1995; Téllez-Rojo et al., 1997; Torres-Meza, 2000; y Atkinson et al., 2014). Así mismo, la exposición a la contaminación del aire durante el embarazo y periodos tempranos de la vida se han asociado con nacimientos prematuros, retraso en el crecimiento intrauterino, bajo peso al nacer, síndrome de muerte temprana y mortalidad infantil (Maisonet et al., 2004; Lacasana et al., 2005; Curtis et al., 2006; Wigle et al., 2007; Kampa y Casatanas, 2008).

Dada la relación entre la contaminación atmosférica y sus efectos en la salud de la población el monitoreo de la calidad del aire debe ser una actividad prioritaria para las autoridades ambientales en México, ya que es una herramienta básica que ayuda a evaluar si una ciudad se aproxima o se aleja de lo que puede considerarse como sustentable en materia de calidad del aire, así como para estimar, en su caso, la magnitud del problema que se pretende atender.

El monitoreo de la calidad del aire toma una importancia fundamental para identificar y proveer la información necesaria a fin de evaluar la calidad del aire de cada región y sus tendencias, así como una herramienta para desarrollar estrategias de prevención y control, planes de manejo de la calidad del aire y

políticas ambientales integrales, entre otras aplicaciones. En este contexto, los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA), se han convertido en una herramienta que permite conocer, con niveles aceptables de confiabilidad, la calidad del aire con respecto a contaminantes específicos y formular, con base en los datos obtenidos, las estrategias de control y las medidas adecuadas para una efectiva gestión ambiental. En general, entre los objetivos del monitoreo de la calidad del aire destacan (Martínez y Romieu, 1997):

- Evaluar el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental.
- Evaluar el estado de la calidad del aire con respecto a la concentración de contaminantes criterio.
- Cuantificar los niveles de exposición de la población a la contaminación del aire ambiente.
- Proporcionar información inmediata para la activación o desactivación de alertas o procedimientos de emergencia, derivados de una concentración de contaminantes asociada a actividades humanas y/o a fuentes naturales, que pueda representar un riesgo para la salud o el medio ambiente.
- Informar de manera oportuna a la población sobre el estado que guarda la calidad del aire.
- Generar información para la evaluación de la distribución espacial y el transporte de los contaminantes atmosféricos.
- Generar datos confiables para la evaluación y seguimiento de las estrategias de gestión de la calidad del aire.

Una vez que un SMCA está operando, es conveniente llevar a cabo evaluaciones periódicas del mismo a fin de determinar si sigue cumpliendo con el objetivo para el que fue originalmente diseñado, si se requieren nuevos sitios de monitoreo, si alguno o algunos de los sitios de monitoreo existentes ya no son necesarios o si nuevas tecnologías son apropiadas para su incorporación al mismo. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA, por sus siglas en inglés), sugiere que dicha evaluación se realice cada cinco años (USEPA, 40 CFR 58.10).

Esta evaluación periódica tiene su fundamento en el hecho de que a través del tiempo pueden presentarse una serie de factores que contribuyen a replantear los objetivos del monitoreo en un lugar determinado, por ejemplo: cambios en la calidad del aire, modificaciones en el tamaño, distribución y/o estructura de la población, modificaciones en los patrones de emisión de contaminantes provenientes de las diferentes fuentes, en la aparición o actualización de nuevas regulaciones ambientales, o el mejor entendimiento de la dinámica atmosférica.

Situaciones que pueden motivar la reorientación de los recursos disponibles para el monitoreo de la calidad del aire, de tal forma que éste sea más eficiente y efectivo para alcanzar los objetivos de este. En este contexto general, el presente reporte describe los resultados del trabajo desarrollado con el objeto de evaluar el diseño de la actual red de monitoreo de calidad del aire de Ciudad Juárez, Chihuahua.

2. Antecedentes

Ciudad Juárez, Chihuahua, es uno de los municipios fronterizos más importantes del país. El municipio se caracteriza por tener un importante número de industrias maquiladoras, lo que ha favorecido en gran medida el crecimiento urbano y demográfico de la ciudad, sin olvidar también el papel que tiene el intercambio comercial y turístico debido a su vecindad con los Estados Unidos de América. Si bien, su dinámica socioeconómica ha traído beneficios, también ha generado problemas relacionados con la contaminación ambiental, en particular la del aire.

Dada esta situación, la ciudad enfrenta el reto de contar con un sistema de monitoreo confiable en beneficio de la protección de la salud de la población. Por este motivo, desde el año 1993, con el apoyo del Programa Ambiental Fronterizo y por el actual TCEQ (Texas Commission for Environmental Quality) antes TNRCC (Texas Natural Resources Conservation Commission), inició su operación la "Red de Monitoreo Atmosférico" con cinco equipos manuales para la medición de partículas suspendidas - PM_{10} que se colocaron en cuatro zonas de la ciudad; posteriormente se adicionaron analizadores automáticos para monóxido de carbono y ozono. Actualmente esta red es operada por la Dirección de Ecología del Municipio de Juárez, en colaboración con la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, y está conformada por 5 estaciones automáticas. De ellas, una pertenece a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, específicamente al Instituto de Ingeniería y Tecnología. La Tabla 2.1 muestra las estaciones de monitoreo que conforman este sistema de monitoreo, sus capacidades de medición de contaminantes y el año en que cada una de ellas inició su operación. Por otra parte, la Figura 2.1, muestra la ubicación geográfica de cada una de las estaciones de monitoreo antes referidas.

A pesar de que la selección del lugar de medición es una de las tareas más importantes en el diseño de una red de monitoreo, ya que debe ser una ubicación representativa para monitorear las condiciones de la calidad del aire y cumplir con el objetivo de su diseño, de acuerdo con la información proporcionada por personal de la Dirección de Ecología del Municipio de Juárez, no se cuenta con documentación que permita identificar los criterios y/o metodología empleada en su momento para determinar la ubicación y el objetivo de cada una de las estaciones que conforman este sistema de monitoreo de calidad del aire. Así mismo, se ignora si la ubicación actual de cada estación ha sido la misma desde que entró en operación o si bien alguna de ellas ha experimentado alguna reubicación y los motivos de esta.

Tabla 2.1. Estaciones que conformaron el SMCA de Ciudad Juárez y capacidades de medición de contaminantes.

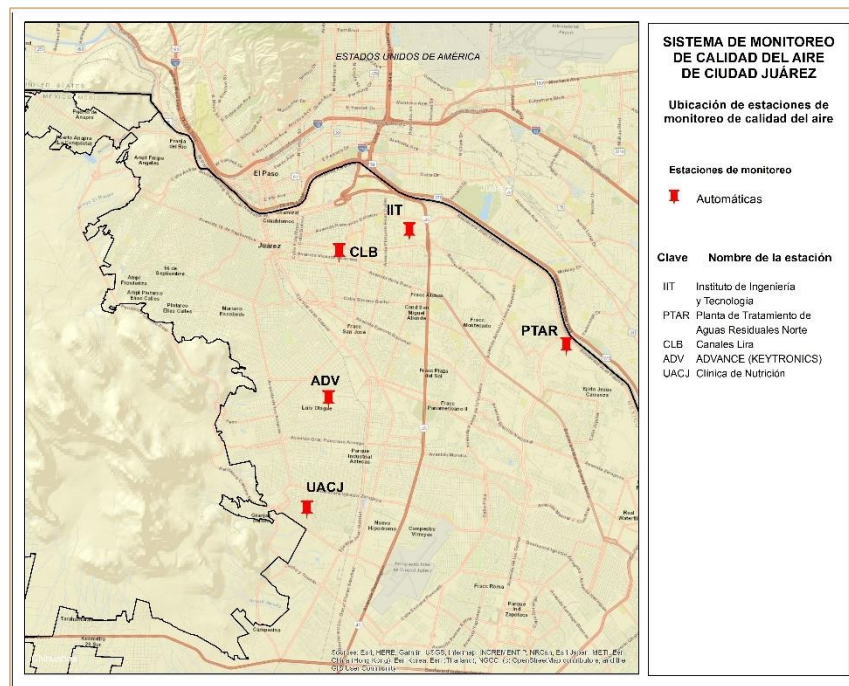
Red de Monitoreo	Estación	Clave	Tipo de equipo y año de inicio de operación	Contaminantes medidos					
				PM ₁₀	PM _{2.5}	O ₃	SO ₂	NO ₂	CO
Ciudad Juárez Municipal	Advance	ADV	Automático (1996)	✗	✗	✓	✗	✗	✓
	Canales Lira	CLB	Automático (1996)	✗	✗	✓	✗	✗	✓
	Planta de tratamiento	PTAR	Automático (2021)	✗	✗	✓	✗	✗	✓
	Clínica de nutrición	UACJ	Automático (2023)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ciudad Juárez Universidad	Instituto de Ingeniería y Tecnología	IIT	Automático (2018)	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓= Se cuenta con equipo de monitoreo de este contaminante.

✗= No cuenta con equipo de monitoreo de este contaminante

Fuente: Elaboración propio con información proporcionada por la Dirección de Ecología del Municipio de Juárez y la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Figura 2.1. Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire de Ciudad Juárez, 2024.



Fuente: Elaboración propio con información proporcionada por la Dirección de Ecología del Municipio de Juárez y la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

En este contexto general, en el transcurso del año 2024 el INECC, por encargo del Banco de Desarrollo de América del Norte – NADBank, realizó, en colaboración con la Dirección de Ecología del Municipio de Juárez, el presente estudio

orientado a evaluar la red de monitoreo de Ciudad Juárez, a través de: 1) la caracterización del entorno inmediato de cada estación de monitoreo actualmente en operación; 2) la evaluación de la aptitud del terreno donde se ubican las estaciones para realizar el monitoreo de la calidad del aire; y, 3) de la aplicación de una metodología basada en el riesgo a la salud para identificar los sitios o áreas donde potencialmente se presentan los mayores riesgos a la salud por exposición a altos niveles de contaminación.

El análisis de los resultados derivados de estas actividades permitió la evaluación de la red de monitoreo de Ciudad Juárez, así como el desarrollo de una propuesta orientada a fortalecer dicha red, para mejorar la representatividad de sus mediciones a fin de cumplir con los siguientes objetivos básicos: a) evaluar el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental, b) evaluar el estado de la calidad del aire respecto a la concentración de contaminantes criterio; y, c) informar y prevenir a la población sobre los niveles de contaminación. Este reporte presenta los resultados finales del trabajo realizado.

3. Objetivo

El objetivo principal de este trabajo fue: evaluar el diseño de la actual red de monitoreo automático y, en su caso, proponer la reubicación y/o la instalación de estaciones de monitoreo adicionales que mejoren la representatividad de los niveles de concentración a los que está expuesta la población.

4. Metodología

En las ciudades mexicanas que cuentan con redes de monitoreo atmosférico, la ubicación de las estaciones de monitoreo ha sido generalmente determinada de manera subjetiva, utilizando como criterio las zonas donde se sospecha existe altas emisiones contaminantes o concentraciones de población importantes. En ocasiones lo que se busca son lugares que cuenten con seguridad para el equipo y disponibilidad de energía eléctrica para su funcionamiento, sin considerar prioritariamente si el sitio elegido es el más representativo del estado de la calidad del aire en la localidad.

Si se cuenta con pocos recursos económicos y humanos para el monitoreo de la calidad del aire, como es el caso en la mayoría de las ciudades mexicanas, es de mayor importancia aún la elección adecuada de la ubicación de puntos de monitoreo, de manera que sean lo más representativos posible del estado de la calidad del aire, sobre todo para cumplir el objetivo de la protección de la salud humana.

En este contexto, en el presente trabajo se realizaron las siguientes actividades: a) caracterización del entorno físico inmediato y determinación de la escala espacial de representatividad de cada una de las estaciones de monitoreo actualmente en operación, siguiendo criterios definidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2017); b) identificación de los sitios más aptos para la instalación de equipos de monitoreo a partir de la aplicación del método denominado Modelación de Aptitud (USEPA, 2007), y; c) determinación de la cantidad y ubicación de estaciones de monitoreo que se recomienda, debe conformar la red de monitoreo con base en el riesgo a la salud de la población (Noll y Mitsutomi, 1983). A continuación, se describe brevemente en qué consistió cada actividad y la metodología empleada en cada caso.

4.1 Caracterización del entorno físico de las estaciones de monitoreo en operación en el año 2024.

Las estaciones de monitoreo de calidad del aire tienen una representatividad espacial característica dentro de una red y es un indicador a través del cual se refleja alguna característica de una población, las variaciones de un parámetro en un punto de muestreo o las condiciones de un proceso. La escala de representatividad de una estación de monitoreo depende de la topografía del territorio, de su entorno, de la meteorología, de las fuentes de contaminación y del tipo de contaminante o parámetro meteorológico que midan. Esto es, la escala

espacial de la representatividad de una estación de monitoreo se describe en términos de las dimensiones físicas de la parcela de aire más cercana a éste a lo largo de la cual las concentraciones de contaminantes son razonablemente similares. Entre más pequeña sea la escala de representatividad, más limitados y específicos son los objetivos de medición.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA, por sus siglas en inglés) ha definido la escala de una estación como micro, media, vecinal, urbana o regional, de acuerdo con las siguientes definiciones:

- **Escala micro:** define las concentraciones en los volúmenes de aire asociados con dimensiones de área que van desde varios metros hasta aproximadamente 100 metros.
- **Escala media:** define la concentración típica de áreas con dimensiones que varían desde aproximadamente 100 metros hasta 0.5 kilómetros.
- **Escala de vecindario:** Define las concentraciones para un área extendida de la ciudad que tiene un uso de suelo relativamente uniforme con dimensiones en el rango de 0.5 a 4.0 kilómetros.
- **Escala urbana:** define concentraciones dentro de un área de dimensiones tipo ciudad, del orden de 4 a 50 kilómetros.
- **Escala regional:** define generalmente un área rural de una geografía razonablemente homogénea sin grandes fuentes, y se extiende desde decenas hasta cientos de kilómetros.

Para evaluar una estación de monitoreo y establecer su escala espacial de representatividad, la USEPA ha definido algunos lineamientos básicos que contempla, entre otros, aspectos tales como: altura de la toma de muestra, distancia horizontal o vertical entre la toma de muestra y estructuras de soporte, distancia entre la toma de muestra y áreas arboladas, distancia respecto a vialidades en función de su aforo vehicular y presencia de obstáculos como bardas o árboles que impidan el libre flujo del viento. Dichos criterios están descritos en el Código Federal de Regulaciones (Título 40, Parte 58, apéndices D - Network Design Criteria for Ambient Air Quality Monitoring y E - Probe and monitoring path siting criteria for ambient air quality monitoring) y se resumen en la Tabla 4.1.

Adicionalmente a los criterios mostrados en la Tabla 4.1, en este trabajo se recopiló, procesó y analizó información con respecto a: uso de suelo (INEGI, 2018 y SEDATU-IMIP, 2016), pendiente del terreno (INEGI, 2013), comercios y servicios (INEGI, 2022), ubicación de fuentes fijas de emisión presentes en el entorno (SEMARNAT, 2023), y datos de calidad del aire generados por cada estación de monitoreo (INECC, 2024).

La metodología aplicada se resume en la Figura 4.2, en tanto que el detalle metodológico de esta actividad puede ser consultado en el primer informe de este proyecto, el cual se incluye como Anexo 1. “Reporte sobre la caracterización y análisis del entorno físico de las estaciones de monitoreo automático en Ciudad Juárez, Chihuahua”, de este documento

Tabla 4.1. Resumen de los criterios de localización de toma de muestra o trayectoria de muestreo.

Contaminante	Escala de representatividad	Altura de toma de muestra sobre nivel del suelo (m)	Distancia horizontal y vertical a estructuras de soporte ¹ (m)	Distancia de la toma de muestra respecto a follaje de árboles (m)	Distancia de toma de muestra respecto a vialidades (m)
Dióxido de azufre (SO ₂) ^{2,3,4}	Media Vecinal Urbana Regional	2 - 15	>1	>10	NA
Monóxido de carbono (CO) ^{2,4}	Micro Media Vecinal	2.5 – 3.5 2 – 7 2 - 15	>1	>10	≤ 50 Ver Tabla 4.1a para escalas media y vecinal
Ozono (O ₃) ^{2,4}	Micro Media Vecinal	2 - 15	>1	>10	Ver Tabla 4.1b para todas las escalas
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂) ^{2,4}	Micro Media Vecinal Urbana Regional	2 – 7 2- 15 2- 15 2- 15	>1	>10	≤ 50 Ver Tabla 4.1b para las escalas Media, Vecinal, Urbana y Regional
Partículas (PM) ^{2,3,4 y 5} y Plomo (Pb) ^{2,3,4}	Micro Media Vecinal Urbana Regional	2 – 7 2 – 7 2- 15 2- 15 2- 15	>2 (sólo distancia horizontal)	>10	2- 10 Ver Figura 4.1 para las escalas Media, Vecinal, Urbana y Regional

¹ cuando la estación se encuentra en la azotea, esta distancia de separación se refiere a las paredes o parapetos ubicados en el techo.

² se debe garantizar un flujo de aire sin restricciones de 270 grados alrededor de la toma muestra.

³ la toma de muestra debe estar lejos de fuentes menores, como hornos de incineración o chimeneas. La distancia de separación depende de la altura del punto de emisión de la fuente menor (como una combustión), el tipo de combustible o residuos quemados, y la calidad del combustible (azufre, cenizas o contenido de plomo). Este criterio está diseñado para evitar influencias indebidas de fuentes menores.

⁴ la distancia de la toma de muestra respecto a un posible obstáculo debe ser de al menos el doble de la altura que sobresale el obstáculo.

⁵ los monitores de partículas suspendidas deben colocarse en sitios pavimentados o con cubierta vegetal durante todo el año, para reducir al mínimo el impacto de la suspensión de polvo por el viento.

Tabla 4.1a. Distancia de separación mínima entre vialidades y estaciones de monitoreo de escala vecinal para la medición de monóxido de carbono.

Tráfico diario promedio (vehículos por día)	Distancia mínima* (metros)
≤ 10,000	10
15,000	25
20,000	45
30,000	80
40,000	115
50,000	135
≥ 60,000	150

* Distancia desde el borde del carril de tráfico más cercano. La distancia para recuentos intermedios de tráfico se debe interpolar a partir de los valores de la tabla en función del recuento real de tráfico.

Fuente: 40 CFR, Part 58, Appendix E, Probe and monitoring path siting criteria for ambient air quality monitoring

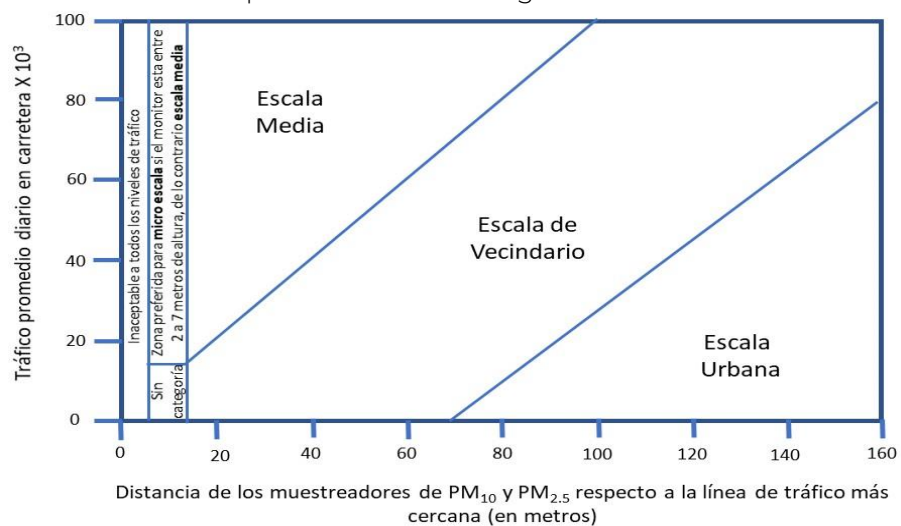
Tabla 4.1b. Distancia de separación mínima entre vialidades y estaciones de monitoreo de escala vecinal y urbana para la medición de ozono (O₃) y óxidos de nitrógeno (NO, NO₂, NO_x y NO_y).

Tráfico diario promedio (vehículos por día)	Distancia mínima* (metros)
≤ 1,000	10
10,000	10
15,000	20
20,000	30
40,000	50
70,000	100
≥ 110,000	250

* Distancia desde el borde del carril de tráfico más cercano. La distancia para recuentos intermedios de tráfico se debe interpolar a partir de los valores de la tabla en función del recuento real de tráfico.

Fuente: 40 CFR, Part 58, Appendix E, Probe and monitoring path siting criteria for ambient air quality monitoring

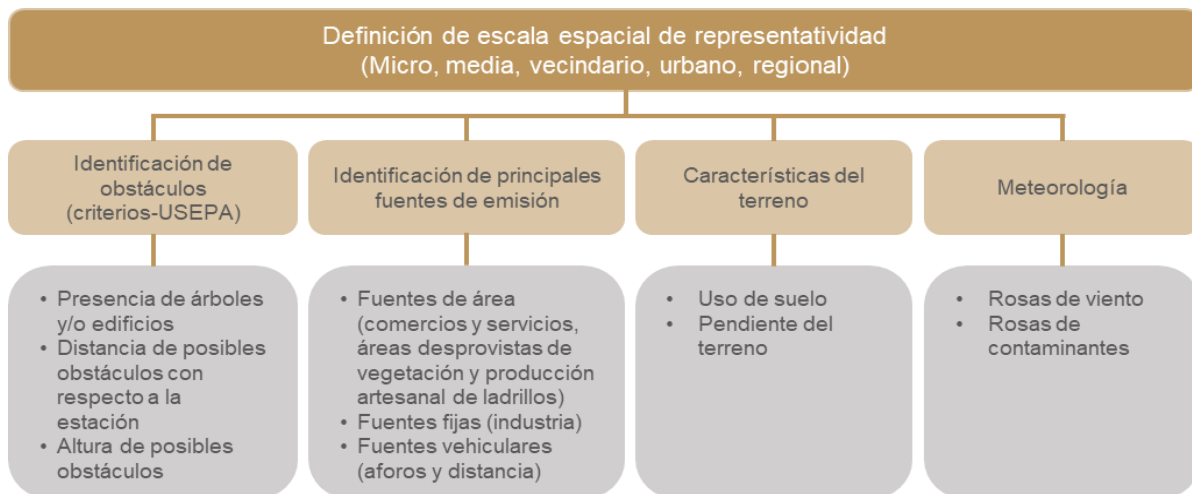
Figura 4.1. Distancia recomendada, en metros, de equipos muestreadores de partículas respecto a vialidades según intensidad de tráfico.



Fuente: Elaboración propia, basada en 40 CFR, Part 58, Appendix E, Probe and monitoring path siting criteria for ambient air quality monitoring.

http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40tab_02.tpl

Figura 4.2. Elementos usados para caracterizar el entorno de una estación de monitoreo y definir su escala espacial de representatividad.



Fuente: Elaboración propia.

4.2 Modelación de Aptitud: identificación de sitios más aptos para la ubicación de estaciones de monitoreo

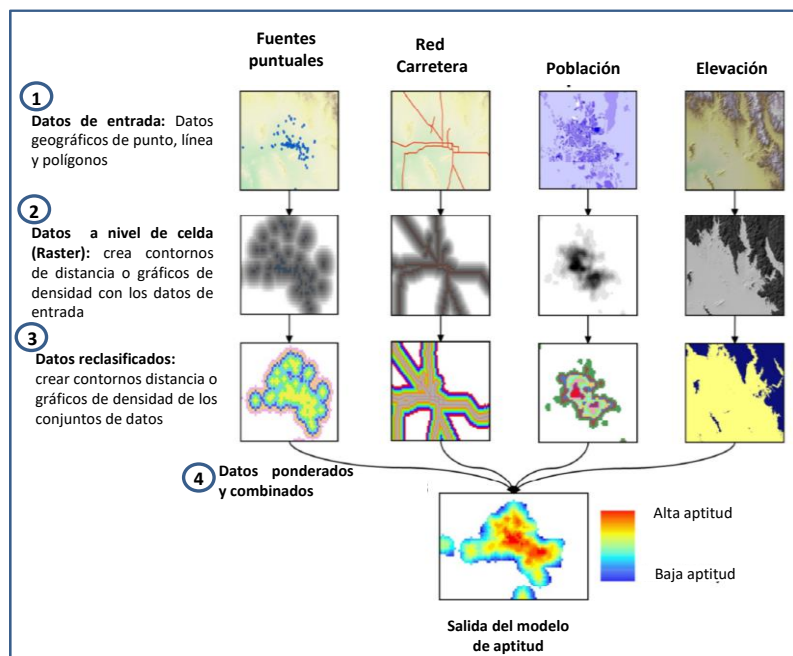
De acuerdo con el documento “Guía de evaluación de redes de monitoreo de aire ambiente” de la USEPA, existen diferentes aproximaciones metodológicas para llevar a cabo la evaluación técnica de una red de monitoreo. Estas pueden ir desde sencillos análisis sitio por sitio, que son útiles para evaluar qué monitores podrían ser candidatos para modificarse o removerse, hasta complejas técnicas de modelación fotoquímica. En este abanico de posibilidades metodológicas, se encuentra la técnica denominada “Suitability modeling” (Modelación de Aptitud), que es más elaborada que la evaluación sitio por sitio y menos robusta que la modelación fotoquímica. Dicha técnica es útil para evaluaciones que tienen como objetivo, entre otros, determinar si los datos generados por una red de monitoreo son útiles para caracterizar la exposición de la población (USEPA, 2007).

La modelación de Aptitud es una aplicación común y valiosa de los Sistemas de Información Geográfica (GIS) que ha sido aplicada para identificar los sitios más apropiados para un uso o actividad particular de acuerdo con requerimientos o preferencias específicas. Ha sido aplicada, por ejemplo, en una amplia variedad de campos que incluye la ecología, la agricultura y el comercio, pero cuyo uso más extendido se ha dado en el campo de la gestión y planeación urbana y regional (Malczewski, 2004). En el área ambiental esta aplicación ha demostrado su utilidad en el diseño y evaluación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire (USEPA, 2007; Pope and Wu, 2014; M. C. McCarthy, et al, 2014; STI, 2014; CDPHE, 2015; y, Penfold, B. M., et al, 2003).

En el presente trabajo, el concepto de “Aptitud” se asume como la capacidad de un sitio o área determinada para soportar un uso específico, en este caso el monitoreo de la calidad del aire. En este contexto, la modelación de Aptitud tiene por objeto identificar las zonas más aptas en el área urbana de Ciudad Juárez para albergar estaciones de monitoreo de la calidad del aire. Para realizar dicho análisis, que es cualitativo, se hizo uso de un sistema de información geográfica (SIG), como herramienta de apoyo para facilitar la recolección, manejo y representación cartográfica de la información requerida para determinar la Aptitud del territorio; además, permite llevar a cabo, de manera coherente y sistemática, el análisis espacial de la información.

La Figura 4.3 resume las etapas incluidas en la metodología empleada. Primero se eligen las variables a incluir en el análisis y se obtiene la información correspondiente. Como se observa, la información es de diferente naturaleza en cuanto a los aspectos que se requieren valorar; por lo tanto, los insumos cartográficos varían según la geometría del objeto espacial representado, lo que implica que los insumos cartográficos sean de tipo vectorial, en sus tres variantes (puntos, líneas y polígonos). La siguiente etapa consiste en la transformación de la cartografía vectorial a formato raster para facilitar la superposición de variables. En seguida se hace una reclasificación de datos para poner todas las variables en una misma escala y se pondera cada una de las capas de información en función de su importancia relativa en el análisis, para finalmente realizar la superposición de capas y obtener como resultado la valoración de la Aptitud del terreno.

Figura 4.3. Aproximación conceptual usada para desarrollar una evaluación de Aptitud.



Fuente: Elaboración propia, adaptada de Sonoma Technology Inc, 2014.

La complejidad del modelado de Aptitud, puede ser tan grande como lo sean los elementos que tienen injerencia en el tema que se desea evaluar, por ello es conveniente identificar las variables de mayor impacto que conviene usar en el análisis y dejar fuera aquellas de menor relevancia, o bien de las que no se dispone información suficiente. En este caso, las concentraciones ambientales de los contaminantes que se desean monitorear dependen, entre otros, de factores tales como tamaño de población, tipo de actividad económica, tamaño y características de la flota vehicular, tipo y cantidad de actividad industrial y comercial en la región, características de los combustibles, infraestructura carretera, tipo de cobertura del suelo, condiciones meteorológicas y topográficas de la región, etc.

Para el caso particular de este trabajo, se simplificó la cantidad de variables a incluir en el análisis a partir de la disponibilidad de información. Así pues, se estableció que el lugar más apto para instalar una estación de monitoreo es aquel que cumple con las siguientes características:

- Que tenga alta densidad poblacional, pues se pretende priorizar el objetivo de caracterizar el grado de exposición que tienen la mayor parte posible de los habitantes de una localidad a los contaminantes atmosféricos;
- Que esté distante de puntos específicos de emisión para evitar que la medición de la estación se vea afectada por ellos (p.e. chimeneas, incineradores o emisiones vehiculares, hornos, entre otros);
- Que se encuentre en áreas con poca pendiente de terreno para buscar una mayor homogeneidad y representatividad espacial de las mediciones;
- Que registre altas emisiones de contaminantes atmosféricos. Este criterio se emplea como indicador de calidad del aire, asumiendo que los sitios con mayores emisiones podrían tener peor calidad del aire que aquellos con menos emisiones. Se consideraron las emisiones de partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$) así como de óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles, que son precursores tanto de ozono como de partículas secundarias.

Bajo estas consideraciones se utilizó la siguiente información para generar los insumos a emplear en el software ArcGis Spatial Analyst para realizar el modelado de Aptitud para Ciudad Juárez:

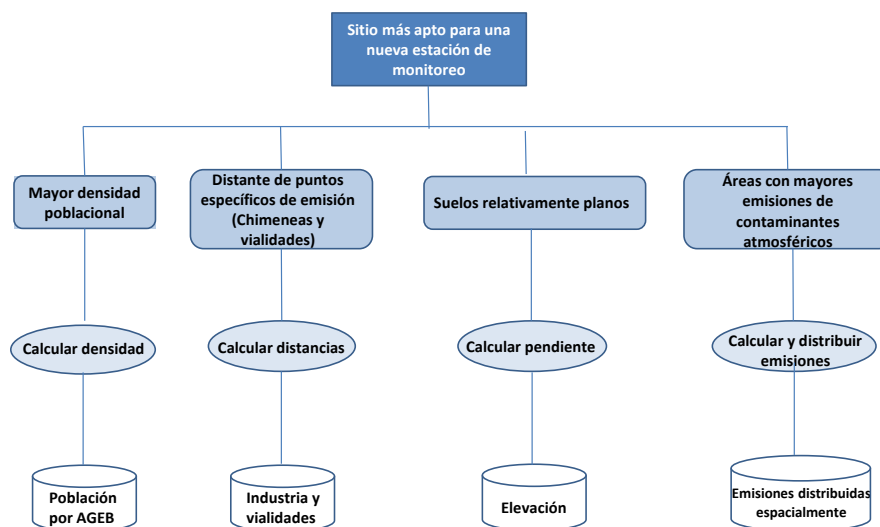
- a. Población a nivel de AGE¹ del Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2021);
- b. Red Nacional de Caminos (INEGI, 2017);

¹ El AGE¹ constituye la unidad básica del marco geoestadístico empleado por el INEGI, cuyo perímetro está representado generalmente por calles, avenidas, brechas y, en ocasiones, por rasgos físicos naturales y/o culturales, normalmente reconocibles y perdurables en el terreno" (INEGI, 2008).

- c. Ubicación geográfica de fuentes puntuales de emisión tanto de jurisdicción estatal como federal del Inventario Nacional de Emisiones del año 2018 (SEMARNAT, 2023)
- d. Datos de Relieve. Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), Resolución de 30 metros, Cobertura geográfica del municipio de Juárez Chihuahua (INEGI, 2013)
- e. Emisiones de Partículas suspendidas PM_{10} de fuentes puntuales, fuentes de área y fuentes móviles con una resolución espacial de 1x1 km. Cifras preliminares (SEMARNAT, 2023)
- f. Emisiones de Partículas suspendidas $PM_{2.5}$ de fuentes puntuales, de área y móviles a nivel de celda con una resolución espacial de 1x1 km. Cifras preliminares (SEMARNAT, 2023)
- g. Emisiones de dióxido de nitrógeno NO_2 de fuentes puntuales, de área y móviles a nivel de celda con una resolución espacial de 1x1 km. Cifras preliminares (SEMARNAT, 2023)
- h. Emisiones de dióxido de azufre SO_2 de fuentes puntuales, de área y móviles a nivel de celda con una resolución espacial de 1x1 km. Cifras preliminares (SEMARNAT, 2023)
- i. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles - COV de fuentes puntuales, de área y móviles a nivel de celda con una resolución espacial de 1x1 km. Cifras preliminares (SEMARNAT, 2023)

La Figura 4.4 resumen la información empleada para determinar la aptitud del territorio en Ciudad Juárez a efecto de albergar la actividad del monitoreo de la calidad del aire.

Figura 4.4. Criterios usados para definir la mayor Aptitud de un sitio para instalar una estación de monitoreo de calidad del aire.



Fuente: Elaboración propia INECC

Se definieron cuatro diferentes escenarios de ponderación para evaluar la Aptitud del territorio para la ubicación potencial de sitios de monitoreo de calidad del aire. Dichos escenarios se describen a continuación y se resumen en la Tabla 4.2

Escenario 1. Todas las variables se ponderan con el mismo peso. Este escenario tiene como finalidad la identificación de los sitios más aptos para instalar equipos de monitoreo de la calidad del aire bajo el supuesto de que todas las capas de información son igualmente importantes y los monitores deberían ser capaces de medir la calidad del aire en sitios con mayor densidad poblacional, más emisiones de contaminantes, además de sufrir la menor influencia, por distancia, de las fuentes puntuales y móviles, y tener la menor pendiente del terreno.

Escenario 2. Población y emisiones se ponderan con mayor peso. Este escenario busca identificar los sitios más aptos para instalar equipos de monitoreo de la calidad del aire para caracterizar los mayores riesgos a la salud de la población, tanto por la cantidad de emisiones liberadas al ambiente (las emisiones se emplean como un indicador de calidad del aire y se asume que donde hay más emisiones hay peor calidad del aire), como por la cantidad de población potencialmente expuesta.

Escenario 3. Las emisiones se ponderan con mayor peso. En este escenario el objetivo es identificar los sitios más relevantes en términos de emisiones considerando que puede resultar de interés para las autoridades ambientales establecer monitoreo en áreas con altas emisiones de contaminantes y potencialmente con las mayores concentraciones ambientales de estos dentro de la ciudad.

Escenario 4. La población se pondera con mayor peso. La capa de información sobre población se pondera con mayor peso que las demás capas con la idea de enfatizar el interés por encontrar sitios donde se pueda caracterizar la calidad del aire con una mayor cantidad de población potencialmente expuesta.

El detalle metodológico de esta actividad puede ser consultado en el segundo informe de este proyecto, el cual se incluye como Anexo 2. “Modelación de Aptitud para la identificación de sitios más aptos para la ubicación de estaciones de monitoreo”, de este documento.

Tabla 4.2. Escenarios de ponderación de variables en la modelación de Aptitud del terreno

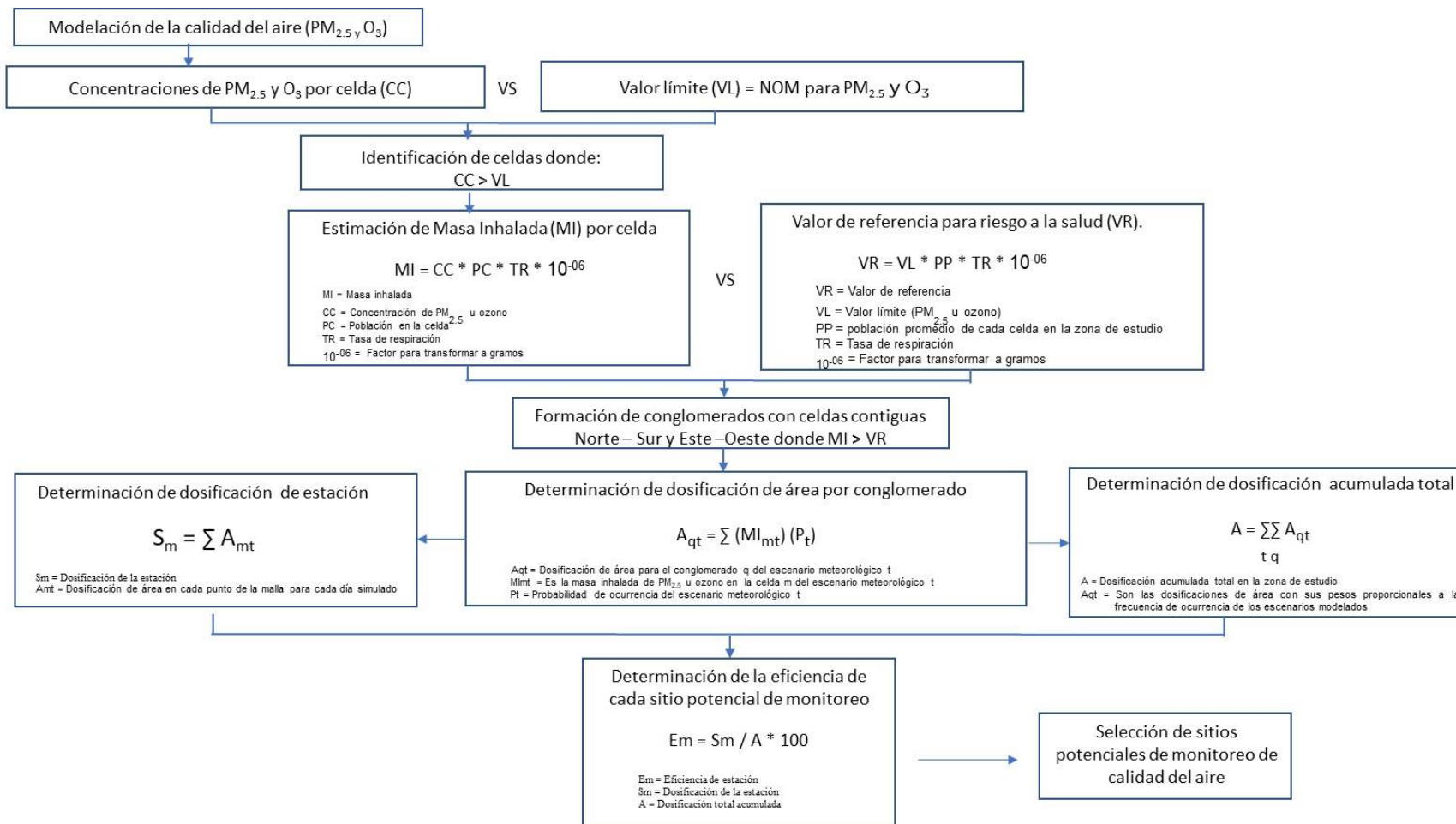
Variable	Factor de ponderación			
	Escenario 1 Todas las variables se ponderan con el mismo peso	Escenario 2 Población y emisiones tienen mayor peso.	Escenario 3 Las emisiones se ponderan con mayor peso	Escenario 4 La población se pondera con mayor peso.
Densidad de población	20	35	20	50
Distancia a vialidades	20	10	10	10
Distancia fuentes fijas	20	10	10	10
Pendiente del terreno	20	10	10	10
Emisiones de PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO _x , COV y SO ₂	20 (4% cada contaminante)	35 (7% cada contaminante)	50 (10% cada contaminante)	20 (4% cada contaminante)

Fuente: Elaboración propia INECC

4.3 Identificación de sitios para realizar monitoreo de calidad del aire con base en el riesgo a la salud humana.

Noll y Mitsutomi (1983) desarrollaron una metodología que jerarquiza los sitios potenciales para monitoreo atmosférico de acuerdo con su habilidad para representar el patrón de “dosificación ambiental” en una red de monitoreo. La dosificación ambiental se asume como un indicador de riesgo a la salud de la población, que toma en consideración tanto la concentración ambiental del contaminante como la concentración de población en un punto, así como la frecuencia con que se registran, en dicho punto, excedencias a algún valor de referencia orientado a la protección de la salud. En esta metodología, para obtener la concentración del contaminante se modela la dispersión de los contaminantes en el aire. Se selecciona una concentración límite que no debe ser excedida. Un grupo de receptores contiguos que excedan el límite establecido son identificados en un conglomerado. A cada conglomerado se le asigna una dosificación ambiental representativa. Los receptores que se encuentren en un alto número de conglomerados son identificados como áreas de alta dosificación y se convierten en sitios potenciales de monitoreo. Tales sitios potenciales de monitoreo se jerarquizan de acuerdo con un valor de eficiencia. Dicha eficiencia es un indicador de la cantidad de contaminante que se recibe en el sitio seleccionado y en las áreas contiguas (representadas por los conglomerados que pertenecen a este punto) con respecto a la cantidad total de contaminante que se tiene en la zona de estudio durante todo el periodo modelado. Los puntos de monitoreo se eligen con base a dicha eficiencia (Figura 4.5).

Figura 4.5. Identificación de sitios potenciales de monitoreo de la calidad del aire en Ciudad Juárez con base en la dosificación ambiental.



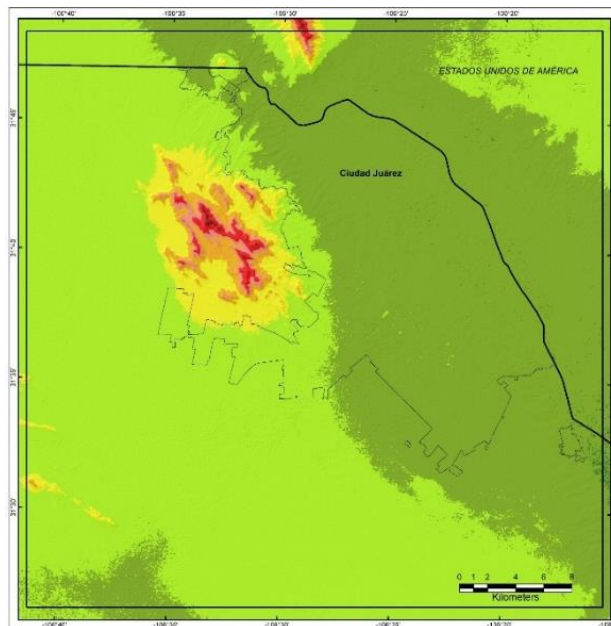
Fuente: Elaboración propia INECC

Para realizar los pasos del procedimiento antes descrito e ilustrado en la Figura 4.5, se emplearon las siguientes consideraciones:

1. **Modelación de la calidad del aire:** Para estimar las concentraciones ambientales de ozono y partículas suspendidas $PM_{2.5}$ se usó el Modelo de Investigación y Predicción Meteorológica acoplado a la Química (WRF-Chem), el cual se ejecutó para un área que cubre toda la zona urbana de Ciudad Juárez y una porción importante del condado de El Paso (Figura 4.6). Los periodos modelados corresponden a los meses de julio y diciembre, que son los meses en los que suelen registrarse altas concentraciones de ozono y partículas, respectivamente. Los insumos empleados en este ejercicio de modelación corresponden a los inventarios de emisión de ambas ciudades, en el caso de Ciudad Juárez se usó el inventario preliminar de emisiones del año 2018 proporcionado por la SEMARNAT y en el caso de El Paso, se empleó la última versión del Inventario Nacional de Emisiones (NEI) del año 2017 publicado por la USEPA en enero de 2021. Las corridas se iniciaron con información meteorológica del Research Data Archive de NCAR (National Center for Atmospheric Research).

El detalle metodológico, de esta actividad puede ser consultado en el tercer informe de este proyecto, el cual se incluye como Anexo 3. "Modelación de la calidad del aire (ozono y partículas suspendidas) en Ciudad Juárez", de este documento.

Figura 4.6. Cobertura geográfica del dominio de modelación fotoquímica para estimar concentraciones de contaminantes en Ciudad Juárez.



Fuente: Elaboración propia INECC

2. **Valor límite:** Se utilizaron como valores límite para $PM_{2.5}$ una concentración de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio de 24 h, para el periodo de análisis del mes de diciembre, en tanto que para el periodo de análisis del mes de julio se empleó una concentración de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio de 24 h. El primer valor corresponde al límite más estricto considerando en la normatividad mexicana (NOM-025-SSA1-2021), en tanto que el segundo valor corresponde al valor guía recomendado por la Organización Mundial de la Salud en su actualización del año 2021 (OMS, 2022). El valor límite más restrictivo usado en el análisis de dosificación ambiental para el mes de julio obedeció al hecho de que no se logró obtener conglomerados bien definidos con el límite de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, debido a que las concentraciones de partículas modeladas para este periodo fueron significativamente menores a las modeladas para el mes de diciembre.

En el caso de ozono el valor límite empleado en la estimación de la dosificación ambiental fue de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio móvil de 8 horas. Este valor corresponde al valor guía recomendado por la Organización Mundial de la Salud en su actualización del año 2021 (OMS, 2022). En este caso no se hizo uso de ninguno de los valores límites considerados en la normatividad mexicana vigente ($176 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio de una hora y $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio móvil de ocho horas - NOM-020-SSA1-2021), debido a que las concentraciones de ozono modeladas tanto para julio como para diciembre fueron predominantemente inferiores a dichos valores, lo que impidió obtener conglomerados bien definidos.

3. **Estimación de masa inhalada por celda:** se calculó la masa de contaminante inhalada por la población en cada celda, en las que la concentración de $PM_{2.5}$ u ozono fue mayor al valor límite de protección a la salud elegido, mediante la expresión $MI = CC * PC * TR * 10^{-6}$. Donde CC es la concentración del contaminante ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en proceso en cada celda, PC es la población en cada celda, TR es la tasa de respiración promedio y 10^{-6} es el factor para convertir de microgramos a gramos.
4. **Valor de referencia para estimar el riesgo a la salud:** se calculó el valor de referencia (VR) de masa inhalada de contaminante mediante la fórmula $VR = VL * PP * TR * 10^{-6}$. Donde VL es el valor límite de protección a la salud, antes indicado por contaminante y periodo de análisis; PP es la población promedio por celda, considerando todas las celdas del dominio de modelación; TR es la tasa de respiración en el periodo especificado por el VL. Velázquez (2008) recomienda usar la TR promedio de las tasas de respiración de hombres ($15.2 \text{ m}^3/\text{día}$) y mujeres ($11.3 \text{ m}^3/\text{día}$), sugeridas por la USEPA (1997). Es decir $13.25 \text{ m}^3/\text{día}$, valor de referencia utilizado en este procedimiento para promedios de 24

h; y a partir del cual se calculó la TR para 8 h. Para hacer la conversión de microgramos a gramos, se utilizó el factor de 10^{-6} .

5. **Formación de conglomerados:** se compararon los valores de Masa Inhalada de cada celda (MI) contra el valor de referencia (VR) y se formaron los conglomerados con las celdas contiguas (Norte-Sur y Este-Oeste) donde el valor de la Masa Inhalada fue superior al Valor de Referencia. Los conglomerados fueron determinados para cada día de cada periodo de modelación. En principio cada punto o celda de cada conglomerado puede ser considerado un sitio potencial de monitoreo.
6. **Determinación de dosificación de área por conglomerado:** para cada conglomerado se estimó la Dosificación de Área, la cual se define como la suma de la masa inhalada de todas las celdas que pertenecen a dicho conglomerado, multiplicado por la probabilidad de ocurrencia de cada escenario o día modelado. En este caso cada día tuvo una probabilidad de ocurrencia de $1/365$. El producto de esta operación se asigna a cada celda del conglomerado. Esta operación se realiza para cada uno de los días modelados.
7. **Determinación de la dosificación de estación:** cada sitio potencial de monitoreo, esto, cada celda en la que se superó el valor de referencia puede estar involucrado en más de un conglomerado, por lo que una estación o sitio potencial de monitoreo es más efectiva cuando pertenece a una mayor cantidad de conglomerados. En este contexto, la dosificación de la estación se define como la suma de las dosificaciones de área de todos los conglomerados que contengan la estación o celda para cada uno de los días modelados. Esto es, la dosificación de estación se estima para cada celda de cada conglomerado en el periodo modelado.
8. **Determinación de dosificación acumulada total:** para obtener la dosificación total acumulada solo se sumaron las dosificaciones de área de cada conglomerado generado en el periodo modelado.
9. **Determinación de la eficiencia de la estación:** se define en términos de las dosificaciones recibidas por el sitio potencial de monitoreo o celda. Esta eficiencia se calcula como la razón de la dosificación de la estación entre la dosificación total y se expresa en porcentaje. Se calcula para cada celda de cada conglomerado en el periodo modelado.
10. **Selección de sitios de monitoreo:** El primer sitio de monitoreo que se selecciona es el que tiene la más alta eficiencia de estación. La cobertura de estación se define como el conjunto de todos los puntos que pertenecen a cualquier

conglomerado que contenga la estación. La eficiencia de la red de monitoreo es la suma de las eficiencias de todas las estaciones seleccionadas.

Después de seleccionado el primer sitio de monitoreo, todos los conglomerados asociados a este sitio son eliminados y se calculan nuevas dosificaciones y eficiencias de estación para los puntos que restan. Luego se selecciona el segundo sitio más eficiente. Este proceso continúa hasta que las restricciones de eficiencia o número total de estaciones de la red de monitoreo se cumplen.

El detalle metodológico de esta actividad particular puede ser consultado en el cuarto informe de este proyecto, el cual se incluye como Anexo 4. "Identificación de puntos de monitoreo con base en el riesgo a la salud de la población, de este documento.

5. Resultados

En las siguientes secciones se presentan los principales resultados para cada una de las actividades desarrolladas como parte de este trabajo: a) Caracterización de entorno de las estaciones de monitoreo en operación en el año 2024; b) Modelación de Aptitud: identificación de sitios más aptos para la ubicación de estaciones de monitoreo, y; c) Identificación de sitios para realizar monitoreo de calidad del aire con base en el riesgo a la salud humana

5.1 Caracterización de entorno de las estaciones de monitoreo en operación en el año 2024

Se hizo la caracterización del entorno de las cinco estaciones de monitoreo automáticas ubicadas en el área urbana de Ciudad Juárez, Chihuahua, a través de la recolección de información en campo y de su análisis posterior usando los lineamientos definidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés). Así mismo, se hizo uso de la información meteorológica e inventario de emisiones disponible para la ciudad. En general, los resultados indican que, a nivel regional, la ubicación actual de las 5 estaciones analizadas, permiten caracterizar el estado de la calidad del aire bajo diferentes escenarios o condiciones de actividad comercial, industrial, vehicular, densidad poblacional y de uso de suelo.

La estación de monitoreo **ADVANCE** (ADV), por ejemplo, permite caracterizar la calidad del aire en una zona de la ciudad que, si bien tiene predominantemente un uso de suelo habitacional, éste coexiste con áreas en las que se registra la presencia de un gran número de parques industriales de maquiladoras, actividad comercial y muy bajo flujo vehicular. Además, se ubica muy próxima a los márgenes de la colonia México 68, una de las zonas ladrilleras más densas de la ciudad. De esta forma, se considera que esta región de la ciudad es apropiada para vigilar las variaciones de la calidad del aire a través del tiempo como consecuencia del desarrollo urbano e industrial, pues permite determinar concentraciones típicas de zonas densamente pobladas bajo influencia importante de la actividad industrial; sin embargo, dada la proximidad de la estación de monitoreo a la zona donde se ubican los hornos ladrilleros artesanales resultaría apropiado reubicarla. La producción de ladrillo en hornos artesanales en México suele estar asociada al uso de combustibles tales como leña y aserrín, además de neumáticos, aceite, plásticos y basura electrónica, entre otros, los cuales se asocian con emisiones de contaminantes como las partículas suspendidas y precursores de ozono.

Otras razones para recomendar su reubicación es que de acuerdo con la USEPA las escalas espaciales más apropiadas para caracterizar eficazmente las emisiones de PM_{10} de fuentes móviles y estacionarias son la escala media y de vecindario y sugiere que la estación de monitoreo se ubique en un área residencial o comercial que tenga alta emisión de partículas, pero no en las inmediaciones de ninguna fuente dominante. En cuanto a las mediciones de ozono, refiere que las escalas espaciales apropiadas son vecindario, urbano y regional, dado que este contaminante requiere un tiempo de formación apreciable, la mezcla de precursores se produce en grandes volúmenes de aire, lo que reduce la importancia del monitoreo de la variabilidad espacial a pequeña escala.

La estación de monitoreo **CLÍNICA DE NUTRICIÓN** (UACJ), por su parte, permite la caracterización de la calidad del aire, en una zona en la que el uso de suelo es habitacional, pero más consolidado, lo que se refleja en una traza urbana más regular y una mayor densidad habitacional. Situación que explica el hecho de que en esta zona se identificó una actividad comercial y de servicios más intensa y aunque también hay pequeñas áreas con un uso de suelo mixto urbano-industrial, el número de industrias en el entorno inmediato de la estación es significativamente menor al observado en otros sitios. La medición de partículas suspendidas, sin embargo, plantea una dificultad en este sitio, dado que el entorno inmediato de la estación se caracteriza por la presencia de abundantes vialidades y calles sin pavimentar, lo que aunado al hecho de que la estación esté asentada en una zona de terracería hace suponer que la resuspensión de polvo por efecto del viento o por el paso de los vehículos puede incidir de manera directa en las lecturas de estos parámetros, lo que le conferiría una escala espacial de representatividad no apta para caracterizar la exposición de la población, especialmente a partículas suspendidas PM_{10} .

La región donde opera la estación de monitoreo **CANALES LIRA** (CLB), permite la caracterización de la calidad del aire en una zona con uso de suelo mixto habitacional - comercial, en la que la actividad comercial y de servicios es mucho más intensa que en cualquier otro punto de monitoreo. La actividad vehicular en el entorno también es notoriamente más intensa que en cualquiera de las otras estaciones de monitoreo. En general, esta zona de la ciudad experimenta una intensa actividad pública inducida por la presencia de 3 estadios (que son el 20 de noviembre, el Benito Juárez y uno pequeño de beisbol); el auditorio Benito Juárez y el parque recreativo Borunda. Por su parte, la presencia de instalaciones industriales es prácticamente inexistente en la proximidad de la estación.

La estación de monitoreo **INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA (IIT)**, si bien tiene como prioridad la actividad académica, también es cierto que permite la caracterización de la calidad del aire en una zona de la ciudad en la que hay una mezcla de usos de suelo, con la presencia de varios corredores urbanos con uso de suelo mixto habitacional y de servicios, servicios y equipamiento e industrial. Con pocas vialidades en el entorno inmediato y por tanto con poca afluencia vehicular.

Finalmente, la estación de monitoreo **PLANTA DE TRATAMIENTO (PTAR)**, se ubica en un sitio en el que se está registrando crecimiento poblacional por expansión de la ciudad. El uso de suelo, aunque es catalogado como urbano, coexiste con amplias áreas de uso agrícola, así como amplias zonas de terrenos baldíos. El sitio se caracteriza también por presentar baja densidad poblacional, así como muy baja actividad comercial, industrial y vehicular.

Otro aspecto para destacar es que, para prácticamente todas las estaciones de monitoreo, salvo **ADVANCE**, se determinó una escala espacial de representatividad de tipo Vecinal a Urbano para los contaminantes que actualmente se miden en cada una de ellas (principalmente ozono y/o partículas suspendidas), situación que les confiere la posibilidad de caracterizar la calidad del aire con respecto a dichos contaminantes en áreas con dimensiones que oscilan entre los 0.5 y 4.0 km o más.

En especial, para el monitoreo del ozono, la EPA recomienda escalas de tipo Vecindario, Urbano y Regional, dado que la formación de este contaminante requiere un tiempo de formación apreciable, la mezcla de reactivos y productos se produce en grandes volúmenes de aire, lo que reduce la importancia de controlar la variabilidad espacial a escalas menores. Las mediciones a esta escala representan las condiciones a lo largo de una subregión urbana razonablemente homogénea. La homogeneidad se refiere a las concentraciones de contaminantes. Los datos a escala de vecindario proporcionarán información valiosa para desarrollar, probar y revisar conceptos y modelos que describan los patrones de concentración urbanos/regionales. Estos datos serán útiles para la comprensión y definición de procesos que tardan períodos de horas en ocurrir y, por lo tanto, implican una mezcla y un transporte considerables. En condiciones de estancamiento, un sitio ubicado en la escala de Vecindario también puede experimentar niveles máximos de concentración dentro de un área metropolitana.

En el caso de las estaciones de monitoreo para las que incluso se puede pensar en una escala de representatividad de tipo Urbano, como son los casos de Clínica de Nutrición, Canales Lira, Instituto de Ingeniería y Tecnología y Planta de

Tratamiento, las mediciones que ahí se realizan tienen el potencial de ser usadas, de acuerdo con la EPA, para estimar las concentraciones en grandes porciones de un área urbana con dimensiones de varios kilómetros, las cuales pueden ser empleadas para determinar tendencias y diseñar estrategias de control en toda la zona. Los sitios a escala urbana también se emplean para medir las altas concentraciones a sotavento del área que tiene las emisiones más altas de precursores.

En el caso de las partículas suspendidas las mediciones en sitios con escala de representatividad de tipo Vecindario proporcionan información sobre las tendencias y el cumplimiento de las normas de calidad del aire, ya que a menudo representan las condiciones en áreas donde las personas comúnmente viven y trabajan durante períodos prolongados.

La Tabla 5.1 resume la condición particular de representatividad espacial, por contaminante, de cada una de estas estaciones, así como las recomendaciones específicas en cada caso.

5.2 Modelación de Aptitud: identificación de sitios más aptos para la ubicación de estaciones de monitoreo.

Los resultados de los cuatro escenarios evaluados identifican de manera consistente que a lo largo y ancho de la ciudad existen amplias zonas con altos niveles de Aptitud para instalar estaciones de monitoreo de la calidad del aire independientemente de la ponderación asignada a las variables incluidas en el análisis. De manera general, la zona centro de la ciudad es donde se encontró la mayor cantidad de colonias con los dos niveles de Aptitud más altos en todos los escenarios evaluados, seguida de la zona norte (Figura 5.1). Ello es resultado de la alta concentración de población y de emisión de contaminantes a la atmósfera en dichas zonas, variables que recibieron la mayor ponderación en tres de los cuatro escenarios evaluados. Por el contrario, la zona sur fue, en todos los casos, en donde se encontró la menor cantidad de colonias con los niveles de Aptitud 9 y 10 (Figura 5.1). Sin embargo, esta situación puede cambiar en el futuro considerando que es hacia esta zona de la ciudad donde se ha estado experimentando el crecimiento urbano en las últimas décadas, como consecuencia de los grandes proyectos de urbanización en gran escala y programas como los “pies de casa”, viviendas de interés social y unidades habitacionales en condominio. Esta situación puede incrementar la relevancia de la densidad de población en un análisis como el realizado en este trabajo.

Tabla 5.1. Escala espacial de representatividad por contaminantes en cada una de las estaciones que conforman el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire de Ciudad Juárez, Chihuahua.

Estación	Escala de representatividad	Características del entorno	Recomendación	Motivo
Advance - Keytronic (ADV)	Media: O ₃ y PM ₁₀	Ubicada en una zona de la ciudad donde predomina el uso de suelo urbano, con presencia de varios parques industriales en la proximidad de la estación y casas habitación más allá de las naves industriales que la rodean. Muy próxima y en dirección a favor del viento, de una de las zonas ladrilleras más densas de la ciudad que se aloja en la colonia México 68, donde la producción de ladrillo se realiza en hornos artesanales que hacen uso principalmente de leña y aserrín como combustible, aunque ocasionalmente también usan otro tipo de residuos. No existen obstáculos que impidan el libre flujo de aire. Las vialidades del entorno inmediato presentan escaso flujo vehicular. La topografía es homogénea con ligera inclinación que varía entre 1 y 3.9% y los equipos de medición se ubican en el rango de altura recomendado por la USEPA.	Reubicación	<p>La razón fundamental que define la escala espacial de representatividad como media es la presencia de fuentes de emisión (hornos ladrilleros artesanales) que se interponen entre una de las componentes de viento dominante y la estación de monitoreo, lo que hace suponer que las emisiones generadas por esta fuente inciden de manera directa en la medición de la calidad del aire que ahí se realiza.</p> <p>Las emisiones de contaminantes generados en las ladrilleras dependen de la temperatura, el tiempo de cocción y el tipo de combustible. En el caso de los hornos artesanales es común, en México, el uso de combustibles tales como: neumáticos, aserrín, aceite, plásticos y basura electrónica, entre otros. En general, las emisiones reportadas en las ladrilleras se relacionan con monóxido de carbono, partículas suspendidas, compuestos orgánicos volátiles, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, metales pesados, hidrocarburos aromáticos, entre otras (Berumen-Rodríguez, et al., 2022).</p>
Clínica de Nutrición (UACJ)	Micro: PM ₁₀ Media: PM _{2.5}	La estación se ubica en una zona con alta densidad poblacional, se presenta poca variación en la	Posible reubicación si se desea mantener la medición de	El entorno inmediato de la estación está dominado por numerosas calles y vialidades sin pavimentar, aunado al

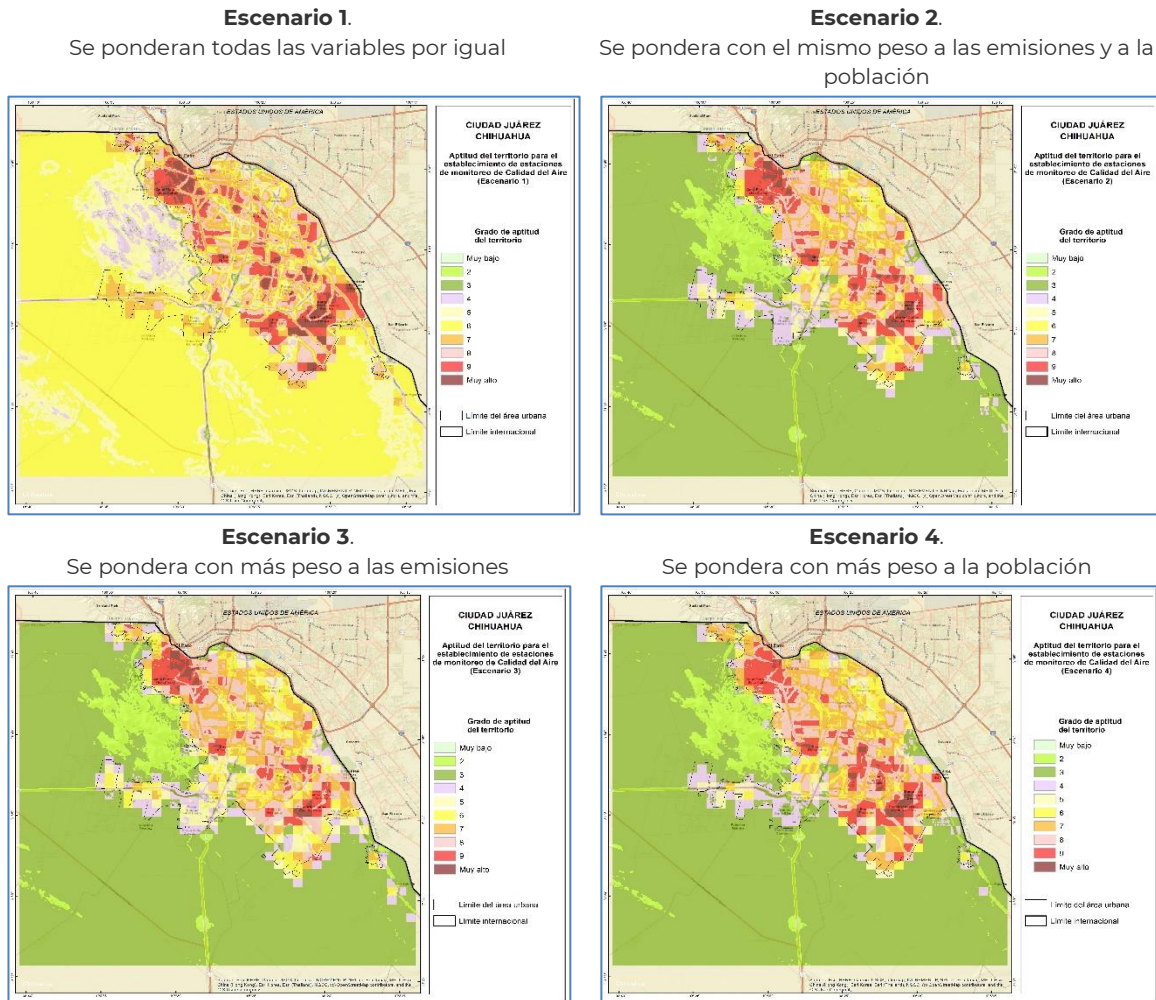
	<p>Vecinal-Urbano: O₃ y NO₂</p>	<p>pendiente del terreno. La toma de muestra se localiza entre 3 y 4.5 metros sobre el nivel del piso para gases y partículas y a casi 10 metros para variables meteorológicas. No se identificaron obstrucciones al libre flujo de aire. Intensa actividad comercial, aunque no se identificó ninguna fuente industrial relevante de emisión que pudiera afectar de manera directa las mediciones de calidad del aire que se realizan en esta estación. La distancia de las vialidades con respecto a la estación de monitoreo y el aforo diario de las mismas, de acuerdo con los criterios establecidos por la USEPA, le confieren una escala espacial de representatividad de tipo Vecinal para todos los contaminantes que se miden en dicha estación, sin embargo, abundan las calles y vialidades sin pavimentar, por lo que para PM₁₀ se le confiere una escala Micro.</p>	<p>partículas suspendidas.</p>	<p>hecho de que la estación se ubica prácticamente a nivel de piso en un área de terracería. Esta situación puede ser relevante en la medición de partículas suspendidas, principalmente en su fracción PM₁₀, dado que la resuspensión de polvo por efecto del viento y/o por el paso de los vehículos puede incidir de manera directa en las lecturas de este parámetro.</p> <p>En el caso de la región estudiada, la literatura reporta que la resuspensión de polvo puede ocurrir cuando la velocidad del viento supera el umbral de los 7 m/s (Li W. W., et al, 2005)</p>
<p>Canales Lira (CLB)</p>	<p>Vecinal-Urbano: O₃</p>	<p>La zona de la ciudad en la que se ubica esta estación de monitoreo se caracteriza por tener un uso del suelo mixto habitacional y comercial, con alta densidad poblacional y con intensa actividad comercial y vehicular, prácticamente sin presencia de instalaciones industriales en su entorno inmediato. No se identificaron obstrucciones que impidan o limiten el libre flujo de aire, ni fuentes de emisión que</p>	<p>Ninguna</p>	

		<p>podrían estar impactando de manera directa las mediciones de calidad del aire en el sitio. Condiciones de terreno casi plano con una inclinación predominantemente menor a 1%.</p>		
<p>Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT)</p>	<p>Urbano: PM₁₀ y PM_{2.5} Vecinal-Urbano: O₃, y NO₂ Vecinal: CO y SO₂</p>	<p>Estación ubicada en la azotea del edificio del Instituto de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. El entorno tiene un uso de suelo mixto (habitacional, comercial e industrial). Terreno casi plano, que presenta menos del uno por ciento de inclinación. Escasas vialidades y bajo flujo vehicular. Ninguna de las fuentes de emisión en el entorno parece tener algún impacto directo en las lecturas de calidad del aire que se registran en la estación. Tomas de muestra a una altura que entra en el rango recomendado por la USEPA. Libre de obstrucciones al libre flujo de viento.</p>	<p>Vigilar crecimiento de árboles cercanos y realizar actividades de poda cuando el tamaño les haga actuar como barrera al libre flujo de viento.</p> <p>Existe la posibilidad de incrementar la altura de la toma de muestra para reducir el impacto de la zona arbolada sobre la medición de la calidad del aire.</p> <p>En caso de que en el tiempo no se pueda evitar el efecto del área arbolada como un obstáculo considerar la posible reubicación de la estación dentro del mismo campus.</p>	<p>Las áreas arboladas proporcionan una superficie en la que puede ocurrir la adsorción o reacción de ozono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, así como deposición de partículas. Para reducir esta posible interferencia, la EPA sugiere que la toma de muestra debe estar al menos a 10 metros de distancia de la línea de goteo de los árboles, condición que en este momento se cumple, por lo que las recomendaciones planteadas tienen un carácter preventivo.</p>
<p>Planta de Tratamiento (PTAR)</p>	<p>Vecinal-Urbano: O₃</p>	<p>La estación de monitoreo está ubicada en una zona de la ciudad donde predomina el uso de suelo habitacional que coexiste con amplios terrenos con uso agrícola.</p>	<p>Ninguna</p>	

		Topografía relativamente homogénea con ligera inclinación (el terreno adyacente y circundante a la estación con pendiente que varía entre 1 y 3.9%). Escasa actividad comercial, industrial y vehicular. Ninguna fuente de emisión impacta de manera directa sobre la estación de monitoreo. Alturas de toma de muestra en el rango recomendado por la USEPA.		
--	--	---	--	--

Fuente: Elaboración propia INECC

Figura 5.1. Resultados de la modelación de Aptitud para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire en Ciudad Juárez bajo cuatro distintos escenarios.



Fuente: Elaboración propia INECC

En el Escenario 1 o de referencia fue en el que se identificó una mayor superficie de terreno (83.5 km²) con los dos niveles de Aptitud más alta (9 y 10) para el monitoreo de la calidad del aire. Esta superficie está integrada por un total de 267 colonias, de las cuales 64 se ubican en la zona norte de la Ciudad, 162 en la zona centro y 41 en la zona sur.

En el Escenario 2, donde se pondera con mayor peso a la población y las emisiones, se identificó una superficie de 65 Km² con niveles de Aptitud 9 y 10, es decir, una menor superficie y esto sin duda tiene que ver con el hecho de que la población y las fuentes de emisión se encuentran más concentradas en el espacio. En este escenario, los 65 Km² con mayor Aptitud están distribuidos en un total de 215 colonias, de las cuales 90 se ubican en la zona norte, 130 en la zona centro y 33 en la zona sur.

Idealmente este sería el Escenario cuyos resultados estarían identificando las áreas más aptas para el monitoreo bajo el supuesto de caracterizar la calidad del aire en los sitios donde existe la posibilidad de que se presenten los mayores niveles de contaminación (representada en este caso por las emisiones) que afectan a la mayor cantidad de habitantes (representada por la densidad poblacional). Esto es, si se definiera como único objetivo del sistema de monitoreo de la calidad del aire de Ciudad Juárez, la protección de la salud de la población, los sitios para instalar equipos de monitoreo deberían ser elegidos de entre los sitios que se identificaron en este escenario.

Es importante destacar, sin embargo, que este escenario en particular tiene la incertidumbre asociada de asumir como válido el uso de las emisiones como un indicador de calidad del aire, ya que se asume como cierto, bajo esta consideración, que los sitios con mayores emisiones también serán los sitios con peor calidad del aire, y se sabe que esto no siempre corresponde a la realidad dada la influencia que tienen factores meteorológicos como la velocidad y dirección del viento tanto en los procesos de dispersión como de transporte y transformación de los contaminantes y, como consecuencia de ello, en la concentración ambiental de éstos en las diferentes regiones del área de interés.

En el Escenario 3 (donde se pondera con mayor peso a las emisiones), que buscó identificar prioritariamente sitios que por sus condiciones de emisión podrían requerir de vigilancia ambiental aunque el tamaño de su población no necesariamente fuera significativo, se reduce notablemente la superficie con los dos niveles de Aptitud más alta, pues sólo se identifican 46 km² en esta condición, los cuales están distribuidos en 215 colonias, 90 en la zona norte, 108 en la zona centro y sólo 17 en la zona sur de la ciudad.

En el Escenario 4 (donde se pondera con más peso a la población), la superficie con los dos niveles de Aptitud más altos es de 62 km², distribuido en 238 colonias, de las cuales 54% se concentran en la región centro de Ciudad Juárez (108 colonias), 30% en la región Norte (72 colonias) y 16% en la región Sur. Este sería otro de los escenarios relevantes a considerar al momento de definir los sitios para la instalación de equipos de monitoreo, considerando que el objetivo primordial de esta actividad es el caracterizar los niveles de exposición de la población a efecto de poder desarrollar las políticas públicas más adecuadas a efecto de proteger su salud.

En general, el hecho de que los resultados obtenidos en los tres escenarios con ponderación diferenciada de variables (Escenarios 2, 3 y 4) fueran tan similares en la abundancia de colonias con alta Aptitud para alojar estaciones de monitoreo abren la posibilidad de que el sistema de monitoreo de la calidad del aire de

Ciudad Juárez pueda atender de manera simultánea varios objetivos con una menor cantidad de estaciones de monitoreo que en el caso de haber obtenido áreas aptas más dispersas y diferenciadas para cada escenario. Entre los objetivos que se pueden atender de manera simultánea destacan: evaluar la exposición de la población, evaluar el impacto de las estrategias de reducción de emisiones y ubicar los sitios donde se registran las máximas concentraciones de contaminantes, en adición a la determinación del cumplimiento de las normas oficiales mexicanas de calidad del aire. Para la identificación de los sitios más aptos para el monitoreo de la calidad del aire bajo esta consideración se hizo el cruce de las colonias con el nivel de Aptitud más alto obtenido en cada uno de los Escenarios evaluados y se seleccionó sólo a aquellas colonias que fueron comunes a los cuatro escenarios, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 5.2.

Tabla 5.1. Colonias de Ciudad Juárez, por región, con los mayores niveles de Aptitud para la instalación de estaciones de monitoreo conforme a las especificaciones de los cuatro Escenarios analizados.

Norte-noroeste	Centro	Sur
16 De Septiembre	15 de Enero	Águilas de Zaragoza
Adolfo López Mateos	15 de Mayo	Carlos Castillo Peraza
Altavista	1ro de Mayo	Carlos Chavira Becerra
Álvaro Obregón	9 de Septiembre	El Mezquital
Ampl Plutarco Elías Calles	Aeropuerto	El Papalote
Anáhuac	Águilas	El Sauzal
Anexas	Americano	Hacienda de las Torres Universidad
Arroyo Colorado	Ampl. Aeropuerto	Las Arenas
Barrio Alto	Azteca	Manuel J Clouthier
Bella Provincia	Benito Juárez	Olivia Espinoza de Bermúdez
Bella Vista	Bosque Bonito	Parajes del Valle
Burócrata Municipal	Buenos Aires	Praderas del Oriente
Cazadores Juarenses	Ciudad Moderna	Praderas del Sauzal
Chaveña	Colinas de Juárez	Tierra Nueva
Chihuahua Oriente	Colinas del Sur	Tierra Nueva II (Francisco Villarreal)
Consumidor	Del Real	Valles de América
Corregidora	Eco 2000	
Del Carmen	El Fortín	
Durango	Enríquez Guzmán M	
Emiliano Zapata	Eréndira	
Felipe Ángeles	Fernando Baeza M	
Francisco I Madero	Fracc Papagochic	
Francisco Sarabia	Fracc Roma	
Francisco Villa (Norponiente)	Fuego	
Fronteriza	Granjas de Chapultepec	
Gregorio M Solis	Granjas Los Alcaldes	

Norte-noroeste	Centro	Sur
Guadalajara	Granjero	
Gustavo Díaz Ordaz	Hacienda de las Torres	
Hermenegildo Galeana	Héroes de la Revolución	
Hidalgo	Horizontes Del Sur	
Ignacio Aldama	Horizontes Del Sur Etapa II	
Ignacio Allende	Independencia II	
Industrial	Infonavit Ampl Aeropuerto	
Insurgentes	Infonavit Ampl Aeropuerto V Etapa	
Josefa Ortiz de Domínguez	Infonavit Casas Grandes	
Juárez	Infonavit Juárez	
Lázaro Cárdenas	Infonavit Salvacar	
Leyes de Reforma	José María Pino Suárez	
Luis Echeverría	La Cuesta II	
Maestros Estatales y Federales	Lindavista	
Mariano Escobedo	Lomas del Rey	
Monterrey	Los Alcaldes	
Niños Héroes	Los Alpes	
Nuevo México	Lucio Blanco II	
Obrera	Médanos	
Parque Industrial Alta Vista	Médanos (Lomas de Zaragoza)	
Paso del Norte	Morelos I	
Periodista	Morelos II	
Plutarco Elías Calles	Morelos II	
Postal	Morelos IV	
San Felipe del Real	Nuevo Hipodromo	
Santa Rosa	Oasis Revolución I	
Tarahumara	Oasis Revolución II	
Telegrafistas	Oaxaca	
Tiradores Del Norte	Panteón Colinas de Juárez	
Torreón	Papagochic	
Vicente Guerrero	Parajes del Sol	
Zacatecas	Parque Industrial North Gate	
Zona Centro	Paseos del Alba	
	Pino Alto	
	Porfirio Silva	
	Praderas de los Álamos	
	Praderas de los Oasis	
	Praderas de los Oasis II	
	Praderas del Sur	
	Prados de Salvacar	
	Quintas del Real	
	Reforma	
	Revolución Mexicana	
	Salvacar	

La Tabla 5.3 muestra el nivel de Aptitud del área en la que se ubican actualmente las estaciones de monitoreo en operación bajo las condiciones de los diferentes escenarios. Los resultados muestran que, salvo la estación Clínica de Nutrición, todas las demás son susceptibles de reubicación a sitios con mayor Aptitud para el monitoreo. Especialmente en el escenario 4, donde se pondera con mayor peso a la población, es donde la mayoría de las estaciones de monitoreo actualmente en operación se ubican en sitios con el nivel de Aptitud más bajo, factor que es muy importante considerar de acuerdo con los objetivos más relevantes que debe cumplir una red de monitoreo, tal como el de caracterizar los niveles de contaminación a los cuales está expuesta la población. Igualmente, importante será considerar los resultados obtenidos para el Escenario 2, donde se pondera por igual a la población y las emisiones (como indicador de la calidad del aire), pues estos sitios potencialmente identifican los sitios con los mayores riesgos de impactos a la salud, tanto por los niveles de contaminación como por la cantidad de población potencialmente expuesta.

Tabla 5.2. Nivel de Aptitud de la ubicación actual de las estaciones de monitoreo existentes en Ciudad Juárez conforme a las condiciones de cada uno de los escenarios evaluados.

Estación de monitoreo	Nivel de aptitud de la ubicación actual				
	Clave	Escenario 1 (Todas las variables se ponderan igual)	Escenario 2 (Mayor ponderación a población y emisiones)	Escenario 3 (Mayor ponderación a emisiones)	Escenario 4 (Mayor ponderación a población)
Advance - Keytronic	ADV	7	7	7	7
Clínica de Nutrición	AUCJ	9	9	9	9
Canales Lira	CLB	7	8	7	7
Instituto de Ingeniería y Tecnología	IIT	5	5	5	5
Planta de Tratamiento	PTR	7	6	6	5

Fuente: Elaboración propia INECC

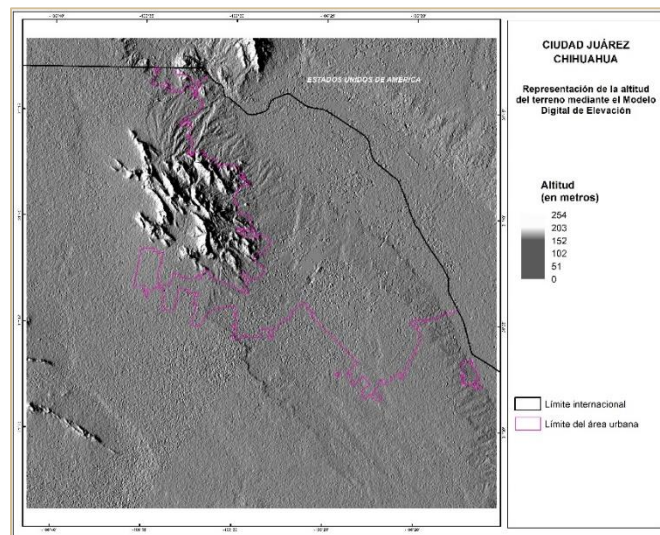
5.3 Dosificación ambiental: identificación de para realizar monitoreo de calidad del aire con base en el riesgo a la salud humana.

Conforme a la metodología descrita en la sección 4.3 y en el Anexo 4 de este reporte, la dosificación ambiental es un indicador de riesgo a la salud de la población y se estima tomando en consideración los niveles de concentración de los contaminantes y la cantidad de población potencialmente expuesta. Bajo este principio, la dosificación ambiental se estima a partir de la masa inhalada (masa de contaminante inhalada por una población receptora durante un tiempo de

exposición). El análisis se centra en las áreas de la ciudad en las que dicha masa inhalada supera un valor de referencia establecido para proteger la salud de la población. Entre más alta sea la masa inhalada y la frecuencia con que se supere el límite de referencia el riesgo potencial a la salud de la población es mayor. De esta forma, en cuanto más frecuente se supere el valor de referencia en algún lugar mayor será el riesgo a la salud y mayor la conveniencia de que dicha área sea seleccionada para realizar el monitoreo de la calidad del aire.

Para estimar las concentraciones ambientales de partículas suspendidas con un diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) y de ozono se usó el Modelo de Investigación y Predicción Meteorológica acoplado a la Química (WRF-Chem), el cual se ejecutó para un área que cubre toda la zona urbana de Ciudad Juárez y una porción importante del condado de El Paso, Texas (Figura 5.3).

Figura 5.3. Cobertura geográfica del dominio de modelación fotoquímica para estimar concentraciones de contaminantes en Ciudad Juárez.



Fuente: Elaboración propia INECC

Los periodos modelados corresponden a los meses de julio y diciembre, que son los meses en los que suelen registrarse altas concentraciones de ozono y partículas, respectivamente. Los insumos empleados en este ejercicio de modelación corresponden a los inventarios de emisión de ambas ciudades. En el caso de Ciudad Juárez se usó el inventario preliminar de emisiones del año 2018 proporcionado por la SEMARNAT y en el caso de El Paso, se empleó la última versión del Inventario Nacional de Emisiones (NEI) del año 2017 publicado por la USEPA en enero de 2021. Como mecanismo en que fueron procesadas las emisiones se eligió RADM2 con aerosoles por MADE/SORGAM. Además, las corridas se iniciaron con información meteorológica del Research Data Archive de NCAR (National Center for Atmospheric Research).

A partir de los resultados obtenidos de los ejercicios de modelación de la calidad del aire se estimaron los promedios diarios de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ y los promedios móviles de ocho horas de ozono. Mayor detalle sobre la configuración del modelo, los insumos empleados para su ejecución y los resultados obtenidos se sugiere revisar el reporte sobre la “Modelación de la calidad del aire (ozono y partículas suspendidas) en Ciudad Juárez”, el cual se incluye como el Anexo 3 de este reporte.

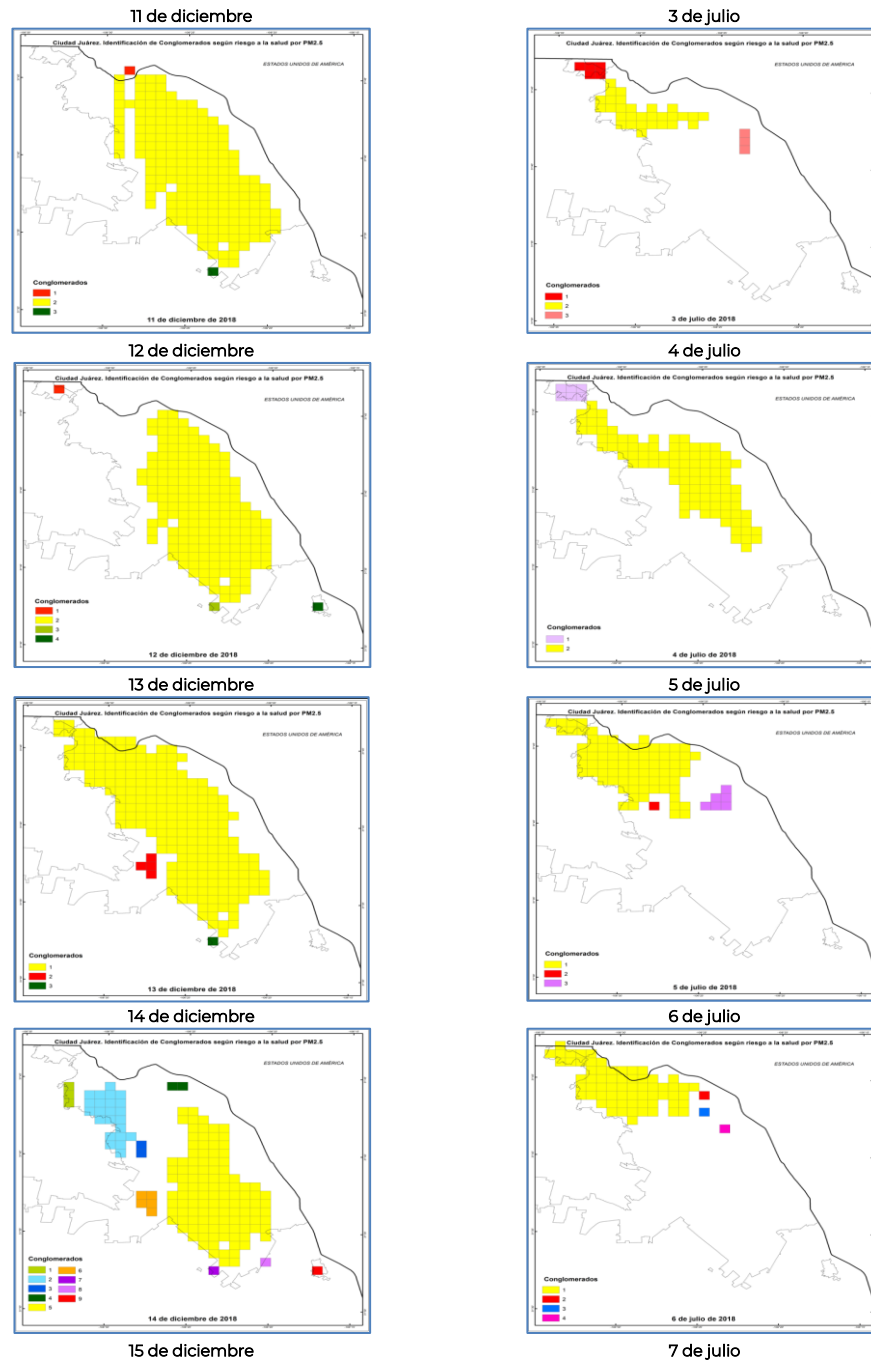
5.3.1. Sitios para monitoreo con base en partículas suspendidas $PM_{2.5}$

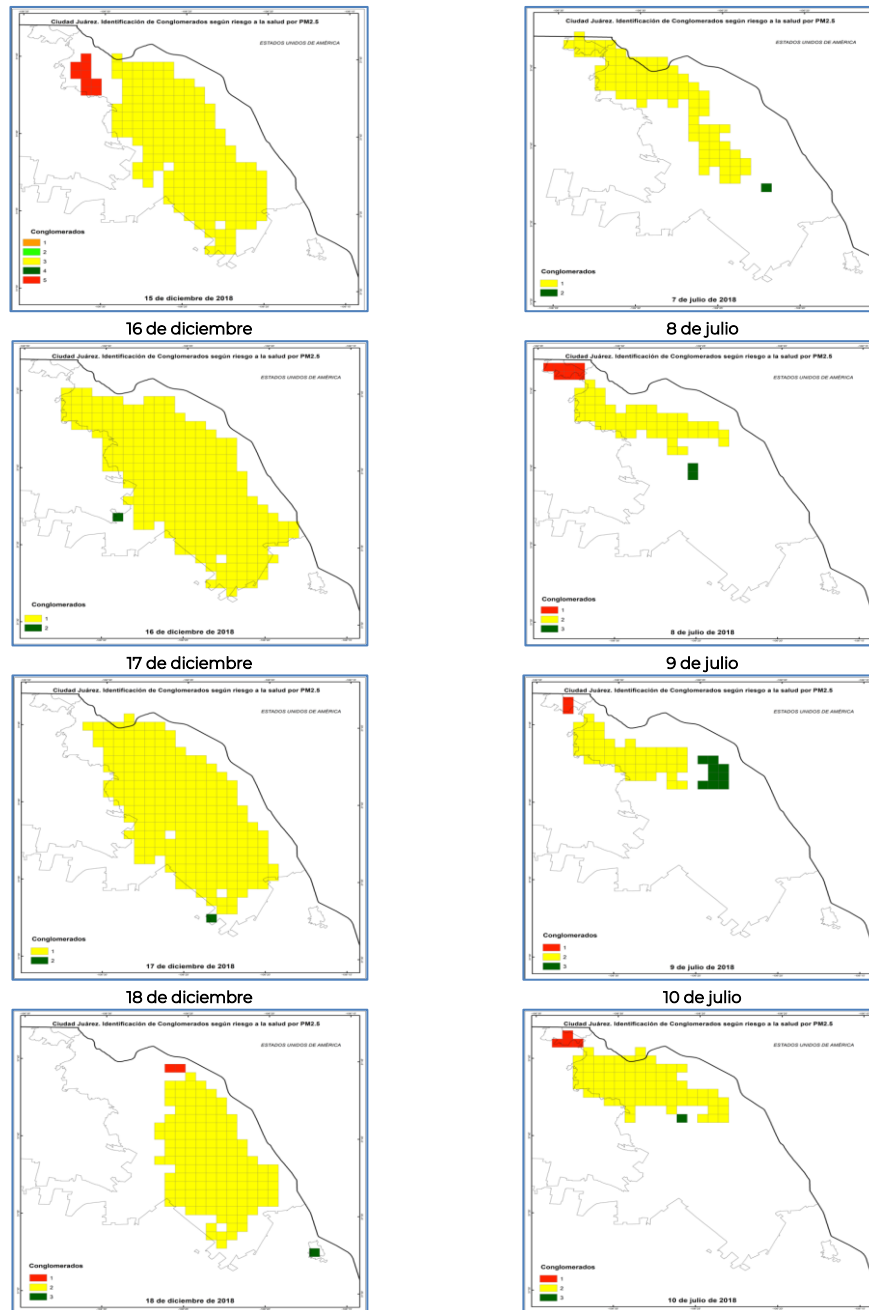
Bajo las consideraciones antes descritas, se definieron los conglomerados para los periodos del 11 al 17 de diciembre y del 3 al 10 de julio de 2018. La Figura 5.4 muestra los resultados obtenidos en el caso de las partículas suspendidas $PM_{2.5}$. En diciembre se aprecia que los conglomerados que definen las áreas de la ciudad con mayor riesgo potencial de efectos en la salud tanto por los niveles de concentración alcanzados de $PM_{2.5}$ como por la cantidad de población expuesta tienen una cobertura muy amplia en sentido noroeste – sureste. De hecho, se observa claramente que los polígonos de mayor extensión son los determinados para los días 13, 16 y 17 de diciembre, cuando dicha zona cubre prácticamente toda el área urbana de Ciudad Juárez. Esta área incluye múltiples colonias, entre las que se encuentran Puerto de ANAPRA, La Conquista y Ladrillera de Juárez en el norte, hasta Medano, Centro Industrial Juárez y Villas Residencial del Sur, en la parte sur del área urbana. Conglomerados de un tamaño significativamente menor se observan también en las zonas noroeste (días 11, 14 y 15 de diciembre), oeste (días 12, 13 y 15 a 18 de diciembre) y sur (días 11 a 18 de diciembre).

Durante el periodo de julio la cobertura de los conglomerados fue significativamente menor, aunque más claramente definidos con respecto a lo observado en diciembre. Es así como, son apreciables los conglomerados definidos en la porción norte del área urbana de Ciudad Juárez, en la mayoría de los días modelados. Sólo en los días 4 y 7 de julio los conglomerados identificados se extienden ligeramente hacia el centro geográfico del área urbana. Los conglomerados formados, permiten identificar, a priori, tres áreas de interés. La primera de ellas se ubica al noroeste (3 al 10 de julio), en las inmediaciones del área de ANAPRA, compuesta por las colonias La Conquista, Oasis, Rancho ANAPRA, Puerto ANAPRA y Lomas de Poleo. La segunda zona de interés identificada, en especial en los días 3, 5 y 9 de julio, se ubica al noreste de Ciudad Juárez y abarca el área de la ciudad en la que se ubican las colonias Jardines del Bosque, Paseo del Bosque, Quintas de San José y Partido Iglesias, entre otras. Finalmente, la tercera zona de interés identificada corresponde al conglomerado de mayor extensión en

sentido noroeste – sureste y comprende el área que cubre colonias tales como: Puerto La Paz, Insurgentes y Chihuahua Oriente hasta Constitución, Villahermosa y Tierra y Libertad.

Figura 5.4. Partículas suspendidas PM_{2.5}. Conglomerados por día formados a partir de celdas con MI > VR, en ambos periodos modelados.





Fuente: Elaboración propia INECC

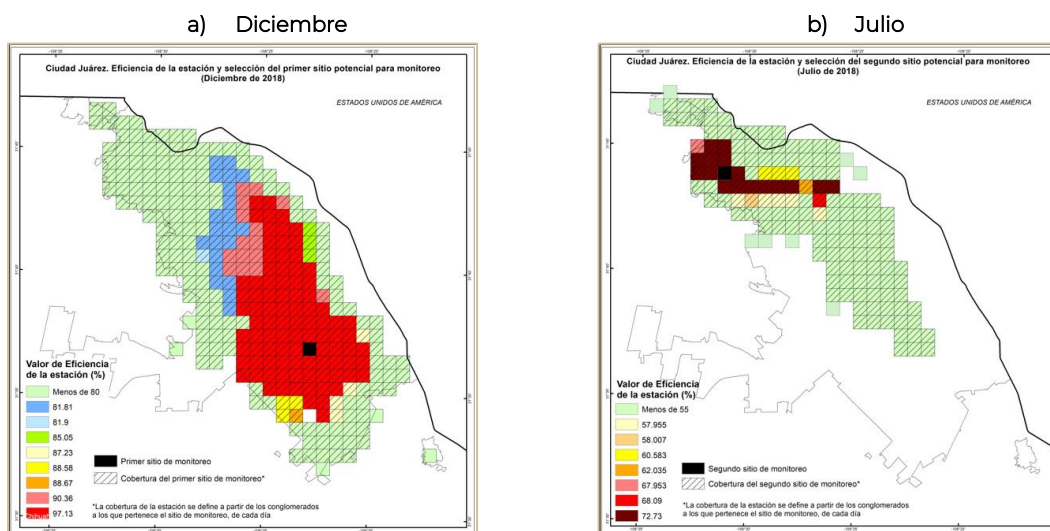
En la Figura 5.4, se observa que en los periodos analizados se logró caracterizar condiciones diferentes, pero muy estables, de dispersión, lo que se reflejó en el bajo número de conglomerados y en la amplia distribución espacial de algunos de ellos.

Una vez definidos los conglomerados para cada día en los periodos de análisis se procedió a determinar la importancia relativa, en términos de riesgos a la salud, de cada conglomerado (Dosificación de área) y de cada celda dentro de cada

conglomerado (Dosificación de la estación), siendo necesario para ello, también determinar la Dosificación Acumulada Total del área de estudio, que consiste en la suma de todas las dosificaciones de área estimadas por día y por conglomerado. Con esta información fue posible identificar los sitios potenciales de monitoreo y priorizarlos de acuerdo con su eficiencia, entendida esta como la razón de la dosificación de la estación entre la dosificación total. Esto es, los puntos de monitoreo seleccionados corresponden a aquellos sitios en los que en el periodo analizado se superó con mayor frecuencia y/o intensidad el valor de referencia establecido para proteger la salud de la población.

Al aplicar esta metodología, el primer sitio de monitoreo que se selecciona es el que tiene la eficiencia de estación más alta. El porcentaje de eficiencia de este sitio es proporcional a la cantidad de contaminante que se recibe en el sitio seleccionado y en las áreas contiguas (representadas por los conglomerados que pertenecen a este punto) con respecto a la cantidad total de contaminante que se tiene en la zona de estudio durante todo el periodo modelado (esta cantidad está representada por el valor de dosificación total). En este sentido, para el mes de diciembre se encontró que el primer sitio de monitoreo, ubicado al sur de la ciudad, tuvo una eficiencia del 97% y una cobertura espacial (definida por el conjunto de todos los puntos que pertenecen a cualquier conglomerado que contenga la estación o sitio seleccionado), de prácticamente toda la zona de estudio (Figura 5.5a), por lo que podría pensarse que una sola estación de monitoreo sería suficiente y representativa de la contaminación por $PM_{2.5}$ que ahí se presenta (contaminación de origen antropogénico modelada a partir del programa WRF-Chem para el año 2018). Sin embargo, otro elemento importante a considerar es la variabilidad espacio temporal de la contaminación y en este sentido, ante la posibilidad de observar patrones de distribución de la contaminación distintos a los observados en diciembre, el análisis se continuó revisando los resultados obtenidos para el mes de julio, encontrándose en este caso un sitio potencial de medición, en el norte de la ciudad que presenta una eficiencia superior al 70% y una cobertura amplia aunque más limitada que la observada en diciembre (Figura 5.5b).

Figura 5.5. Resultado del cálculo de la Eficiencia de la Estación, se aprecian los valores de porcentajes ilustrados en colores, asignados a cada celda.

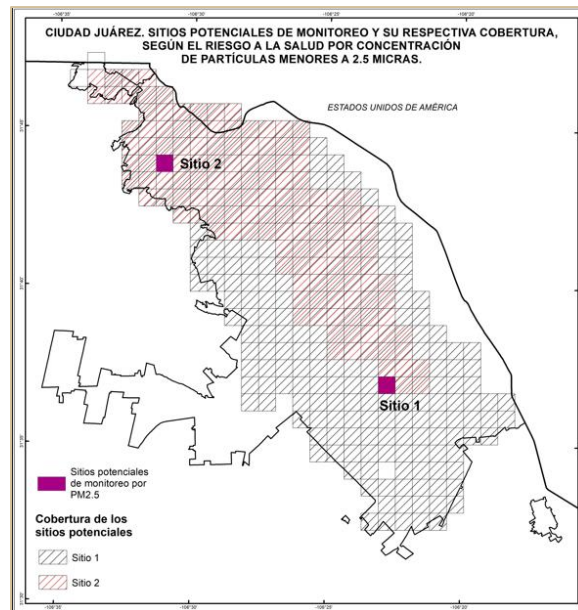


Fuente: Elaboración propia INECC

Si bien se pudo continuar el ejercicio analizando de manera integrada los resultados de diciembre y julio, estimando una dosificación total acumulada para ambos periodos y a partir de este dato estimar nuevas eficiencias, es muy probable que nuevamente se hubiera obtenido un solo punto de monitoreo con alta eficiencia y amplia cobertura dado que los conglomerados obtenidos para ambos meses se empalman. Con base en lo anterior, se optó por mantener el análisis de diciembre y julio por separado bajo el supuesto de que más estaciones (las determinadas con el análisis de diciembre, más las determinadas con el análisis de julio) pueden caracterizar mejor las diferencias en el riesgo a la salud de la población, aun cuando una sola estación ya revele un posible riesgo para toda la ciudad.

En ninguno de los dos periodos analizados se continuó el proceso para seleccionar una segunda, tercera o cuarta estación de monitoreo, porque en ambos casos sólo adicionaban porcentajes marginales de eficiencia a la red (en algunos casos menores al 1%) y ello no se consideró costo efectivo, dados los altos costos de adquisición y operación de una estación de monitoreo. Ello, en adición al hecho de que aún faltaban por analizar los resultados obtenidos para ozono, lo cual brindaría la posibilidad de adicionar puntos de medición para ambos contaminantes. Dado lo anterior, para el monitoreo de la calidad del aire por partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en Ciudad Juárez la metodología aplicada permitió identificar sólo dos sitios de medición con la cobertura espacial ilustrada en la Figura 5.6.

Figura 5.6. Celdas donde se ubican los sitios determinados para monitoreo con base en riesgos a la salud por partículas PM_{2.5}, utilizando los valores límites de 25 µg/m³ (diciembre) y 15 µg/m³ (julio), como promedio de 24 horas.



Fuente: Elaboración propia INECC

Para entender mejor por qué la eficiencia de un punto de monitoreo es tan alta y tiene una cobertura tan amplia, es necesario remitirse a los resultados obtenidos en los ejercicios de modelación de la calidad del aire. En dichos ejercicios, se determinó que las concentraciones de partículas PM_{2.5} en Ciudad Juárez superan con cierta regularidad los niveles de protección a la salud usados como referencia en este análisis y lo hacen además en amplias zonas del área urbana. Ello, probablemente sea resultado de una serie de factores, entre los que se consideran de mayor relevancia los siguientes: 1) extensión territorial del área urbana muy compacta (aproximadamente 311 km²), especialmente en su sentido este – oeste (menor a 16 km, medidos en línea recta de la línea fronteriza sobre el Río Bravo y el Periférico Camino Real), lo que “concentra” en un área geográfica reducida la emisión de contaminantes; 2) topografía relativamente plana al interior del área urbana, lo que le confiere cierta homogeneidad a la dispersión de los contaminantes; 3) patrones de viento claramente definidos con componentes dominantes del oeste-noroeste y este-sureste, inducido por la presencia de la Sierra de Juárez y las Montañas Franklin, 4) bajas velocidades de viento, que no favorecen la dispersión y dilución de la contaminación, especialmente en los días de alta contaminación; 5) fuentes antropogénicas de emisión (móviles, área e industrial), distribuidas a lo largo y ancho de toda el área urbana y 6) inversiones térmicas frecuentes de baja profundidad, especialmente en la temporada invernal, que atrapa los contaminantes y reduce el volumen disponible para el mezclado vertical y la dispersión de contaminantes.

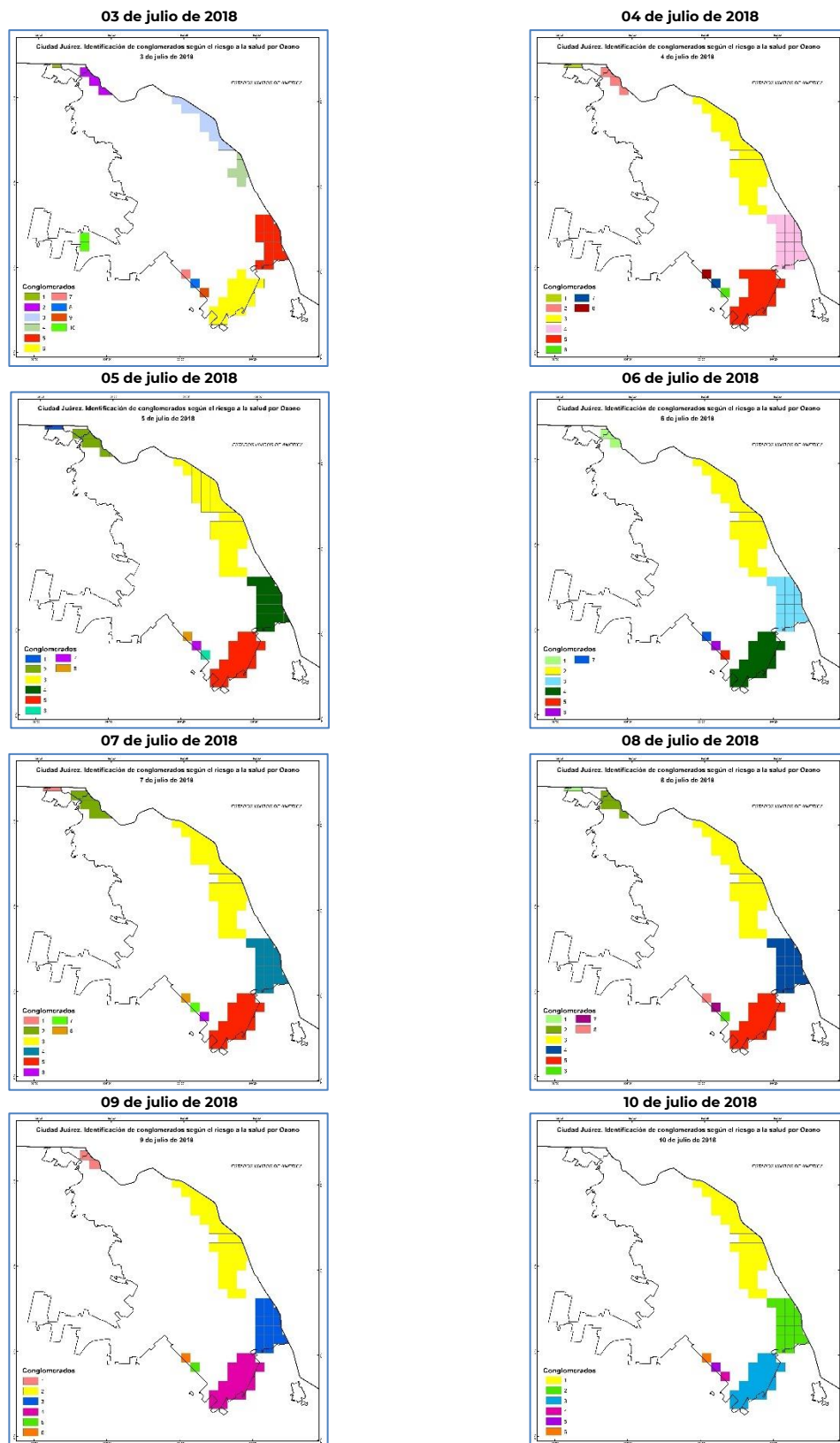
Si bien es cierto que al interior de la zona urbana de Ciudad Juárez se registran diferencias espaciales de concentración de partículas suspendidas, identificándose sitios donde las concentraciones suelen ser más altas que en el resto de la ciudad, como por ejemplo en las inmediaciones de la estación de monitoreo conocida como Advanced Transformer, en general, el modelo WRF-Chem identificó amplias áreas en las que se superó el valor límite de protección a la salud usado como referencia en el análisis realizado en este trabajo. De esta forma, aunque dicho umbral se supere de manera más significativa en unas zonas que otras, para la metodología empleada en este trabajo es suficiente con rebasar este umbral, aunque sea de manera marginal, para identificar dicha área con un riesgo potencial a la salud de la población. A partir de esta consideración y la presencia de población en el sitio, se definen los conglomerados que permiten la identificación de los sitios potenciales de monitoreo.

5.3.2. Sitios para monitoreo con base en ozono

En el caso del ozono, es importante destacar que el análisis sólo se pudo efectuar para el mes de julio, ello debido a que las concentraciones modeladas para el mes de diciembre fueron lo suficientemente bajas como para impedir la aplicación de la metodología empleada, ya que las concentraciones obtenidas fueron normalmente inferiores a cualquiera de los valores límite de protección a la salud que se usaron como referencia.

La Figura 5.7 muestra los conglomerados identificados para ozono. En ella se aprecia que la cobertura espacial de los mismos es significativamente menor con respecto a los determinados para las partículas $PM_{2.5}$, aunque más claramente definidos. Es así como, son apreciables los conglomerados a lo largo de toda la línea fronteriza entre Ciudad Juárez y El Paso. El primer conglomerado, que está presente, en prácticamente todos los días modelados, se identifica en la zona noroeste, entre el puerto de ANAPRA y las colonias Felipe Ángeles y Altavista. Dos conglomerados más se definen claramente a lo largo del valle del Río Bravo, desde la zona del parque industrial Omega hasta la zona donde se ubica el Parque Industrial Río Bravo y uno más al sur de Ciudad Juárez, prácticamente al borde del límite sur del área urbana, próxima al área donde se ubican las colonias Manuel Clouthier y Medanos.

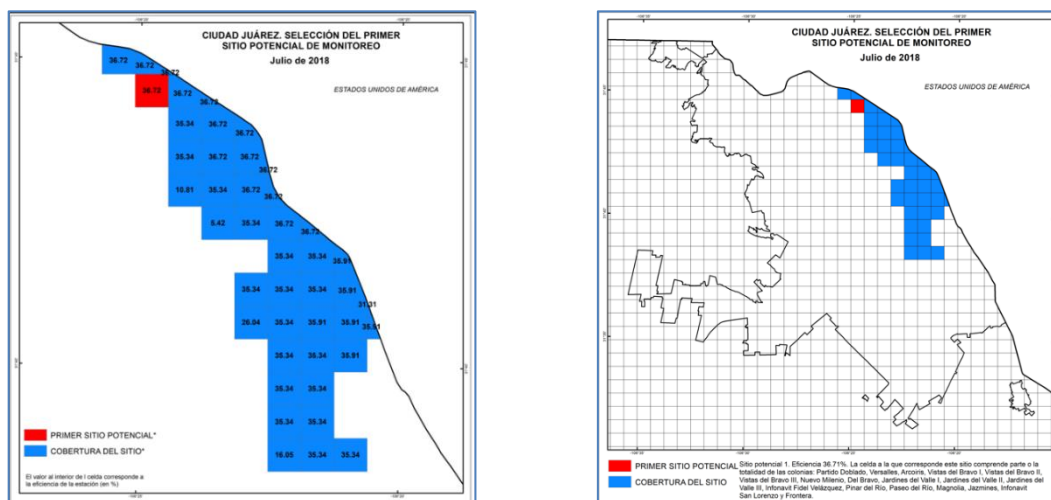
Figura 5.7. Ozono. Conglomerados por día formados a partir de celdas con MI > VR; periodo del 3 al 10 de julio de 2018.



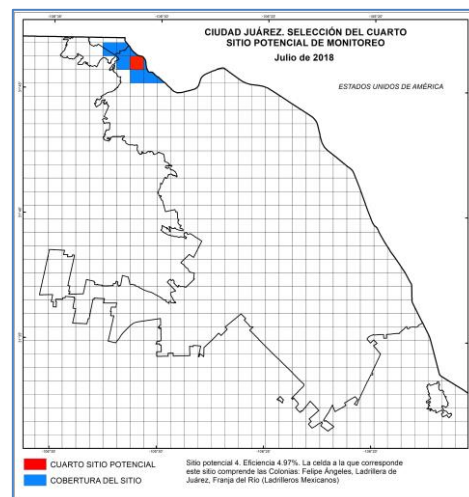
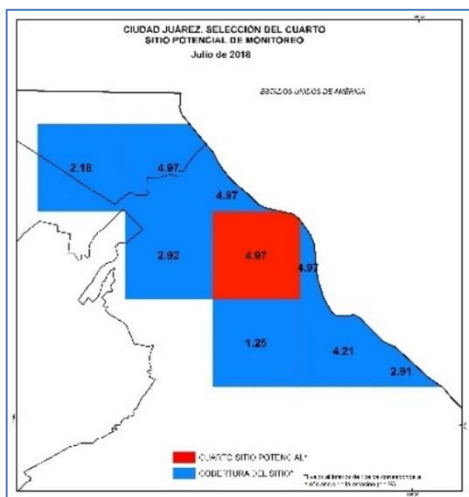
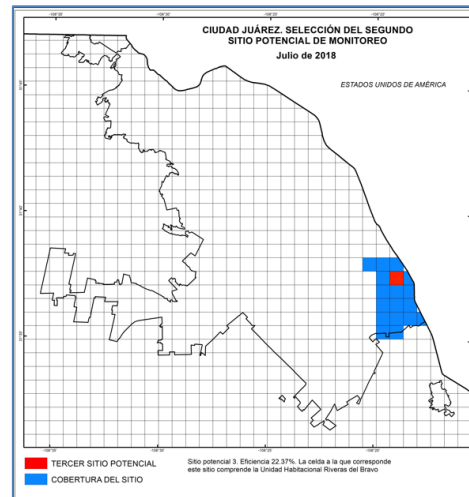
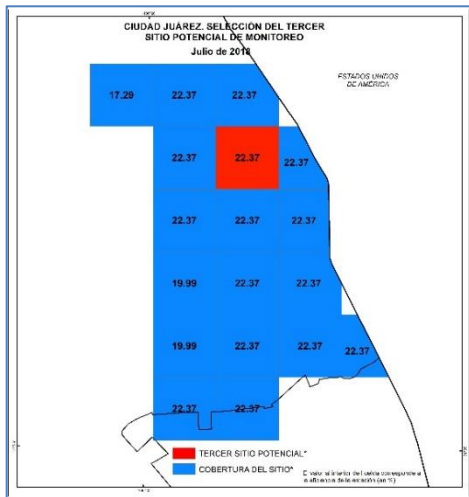
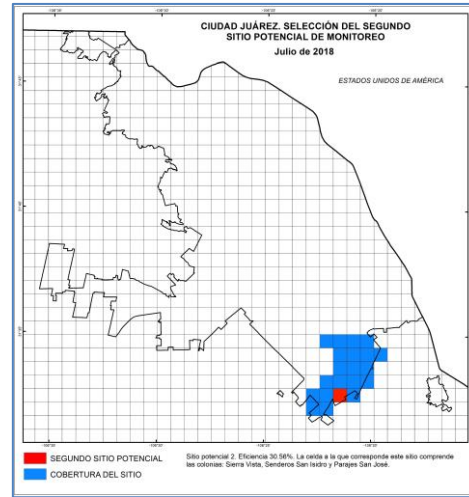
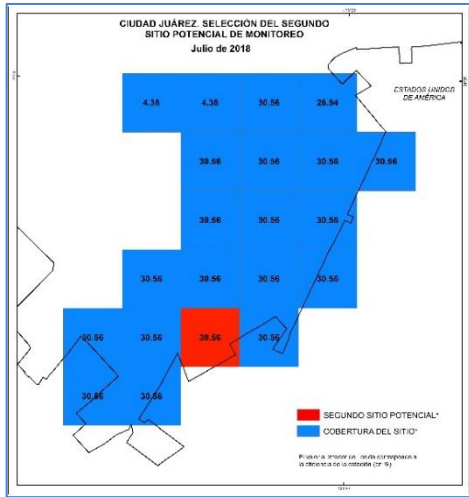
Siguiendo la misma metodología que para partículas suspendidas $PM_{2.5}$, se determinaron las dosificaciones de área, dosificaciones de estación, dosificación total y eficiencias de estación. El resultado de este proceso permitió identificar 4 puntos potenciales de monitoreo. El primero de ellos, ubicado al noreste del área urbana de Ciudad Juárez, muy cerca del límite definido por el río Bravo con la Ciudad de El Paso. Este primer sitio aporta una eficiencia del 36.71%, a la eficiencia total de la red. El segundo sitio potencial de monitoreo se identificó al sur del área urbana, en los límites de dicha zona y aporta un 30.56% a la eficiencia de la red. El tercer punto de monitoreo se ubicó al sureste, también muy cercano al límite entre las ciudades de Juárez y El Paso. Este punto aporta un 22% adicional a la eficiencia de la red. Finalmente, se identificó un cuarto punto potencial de monitoreo al noroeste del área urbana, el cual aporta un 4.9% a la eficiencia de la red (Figura 5.8). La eficiencia acumulada de estos cuatro puntos potenciales de monitoreo es ligeramente superior al 94% (Tabla 5.4).

Aunque la metodología permite continuar con la identificación de más puntos potenciales de monitoreo, en este caso se decidió mantener la red potencial con cuatro puntos porque la adición de más estaciones o puntos de monitoreo sólo mejoraban la eficiencia acumulada de la red entre 0.3 y 1.9%, es decir, sólo se lograban mejoras marginales y ello no se consideró costo efectivo.

Figura 5.8. Ubicación, eficiencia y cobertura de los sitios potencial de monitoreo de ozono en Ciudad Juárez, Chihuahua.



5. Resultados



Fuente: Elaboración propia INECC

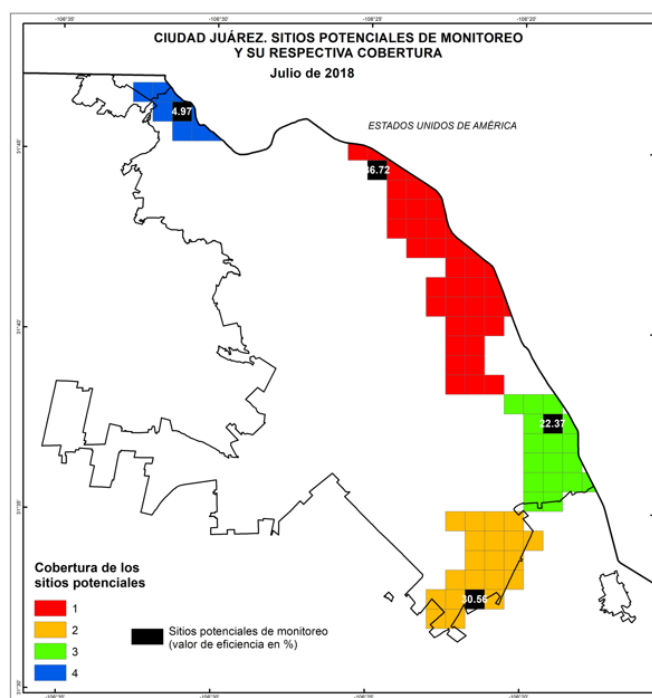
Tabla 5.3. Eficiencias de las estaciones y de la red de monitoreo, para el caso de 4 puntos de monitoreo seleccionados en base al riesgo a la salud.

Estación	Eficiencia de estación	Eficiencia de la red
1	36.71 %	36.71 %
2	30.56 %	67.27 %
3	22.37 %	89.64 %
4	4.97 %	94.61 %

Fuente: Elaboración propia INECC

En la Figura 5.9 se muestra la distribución de los 4 puntos de monitoreo que corresponden a la Tabla 5.4. Aunque con 4 sitios de monitoreo se tiene una eficiencia de red cercana al 95%, se observa que en la zona de estudio aún queda una gran área sin cobertura. Esta situación se da porque en estas celdas en ningún momento se tuvo una cantidad mayor o igual de 0.3 g de ozono inhalada por la población expuesta (y por lo tanto el riesgo a la salud no es significativo), lo cual se debe a dos situaciones posibles: 1) En dicha área no se presentan concentraciones de ozono que rebasen los 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio móvil de 8 horas, y por lo tanto se le asignó una masa inhalada de cero; o, 2) que la densidad de población en la celda sea muy baja. De estas posibilidades, la primera es la más probable.

Figura 5.9. Ubicación de los 4 sitios de monitoreo de la red mostrada en la Tabla 5.4.



Fuente: Elaboración propia INECC.

6. Análisis de resultados

El monitoreo de la contaminación atmosférica es un factor elemental para la gestión de la calidad del aire, ya que permite a las autoridades correspondientes tomar las medidas necesarias para mantenerla en un estado que no represente un riesgo significativo a la salud y a los ecosistemas.

Actualmente, en el territorio de Ciudad Juárez operan cinco estaciones de monitoreo automático, cuatro bajo la responsabilidad de la Dirección de Ecología del Municipio de Juárez y una bajo tutela de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. De acuerdo con prácticas sostenidas con las autoridades ambientales de la entidad, no se tiene registro sobre la metodología empleada para determinar los puntos en los que se ubican actualmente estas estaciones, salvo la estación propiedad de la Universidad que tiene un uso prioritariamente académico, por lo que no se tiene certeza de que se haya empleado una metodología objetiva que permitiera determinar los puntos más representativos del estado de la calidad del aire en la entidad. En este contexto, los objetivos principales de este trabajo fueron evaluar la ubicación actual de las estaciones de monitoreo en operación y aplicar una metodología que permitiera determinar la ubicación de puntos de monitoreo orientados a caracterizar la calidad del aire para la protección de la salud de la población.

6.1. Propuesta de red de monitoreo.

Para alcanzar los objetivos antes descritos se desarrollaron tres actividades cuyos resultados, a la vez de permitir la evaluación de la actual configuración de la red de monitoreo posibilitaron la identificación de algunas recomendaciones a efecto de mejorar la representatividad de las mediciones de calidad del aire realizadas en términos de la caracterización del riesgo a la salud de la población. Estas actividades fueron: 1). Caracterización del entorno físico de cada estación de monitoreo y la determinación de su escala espacial de representatividad, aplicando los criterios propuestos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos; 2) Modelación de Aptitud, que es una aplicación común y valiosa de los Sistemas de Información Geográfica que ha sido usada para identificar los sitios más apropiados para un uso o actividad particular de acuerdo con requerimientos o preferencias específicas, en este caso el monitoreo de la calidad del aire; y, 3) determinación de la dosificación ambiental, que se asume como un indicador de riesgo a la salud de la población y toma en consideración tanto la concentración ambiental del contaminante de interés como la concentración de

población en un punto, así como la frecuencia con que se registran, en dicho punto, excedencias a algún valor de referencia orientado a la protección de la salud.

Los resultados tanto de la caracterización del entorno físico como de la modelación de Aptitud mostraron que la ubicación actual de las estaciones de monitoreo presenta áreas de oportunidad a efecto de mejorar la escala espacial de representatividad y lograr que la misma sea compatible con el objetivo prioritario de caracterizar los niveles de exposición a los que está expuesta la población.

La escala espacial de representatividad está íntimamente ligada con los objetivos del monitoreo de la calidad del aire y en este sentido la USEPA ha propuesto los criterios para asegurar que coincidan correctamente la escala espacial representada por la muestra de aire monitoreado con el objetivo del monitoreo, de acuerdo con el contaminante de interés (CFR 40, parte 58, Apéndice D). Como regla general, cuando se diseña una red de monitoreo para evaluar impactos en la salud de la población por exposición al aire contaminado, es deseable ubicar la mayoría de las estaciones de monitoreo en lugares donde la calidad del aire está influenciada por un gran número de fuentes en una región. Las estaciones usadas con este objetivo deberían ser representativas de una escala espacial tipo vecindario o urbano. Las estaciones de monitoreo con esta escala espacial de representatividad no deberían estar influenciadas por una fuente de emisión en particular. En este contexto general, para el caso de las estaciones que conforman la red de monitoreo de Ciudad Juárez, donde uno de los objetivos más importantes corresponde con la vigilancia de la calidad del aire, la escala espacial de representatividad recomendada es la vecinal (0.5 a 4.0 km) o urbana (4 a 50 km).

De los cinco sitios de monitoreo considerados en este análisis para tres de ellos se presentaron algunas recomendaciones preliminares a efecto de mejorar la representatividad de sus mediciones. Estas estaciones son: **ADVANCE, Clínica de Nutrición e Instituto de Ingeniería y Tecnología**. Para las primeras dos se plantea una posible reubicación a efecto de reducir o evitar el impacto potencial de las emisiones generadas por fuentes de emisión cercanas. En el caso de la estación ADVANCE, un parque ladrillero y en el caso de la estación Clínica de Nutrición las calles y avenidas sin pavimentar. En el caso de la estación de monitoreo Instituto de Ingeniería y Tecnología sólo se recomienda la vigilancia del crecimiento de las áreas arboladas a su alrededor para evitar que en algún momento se conviertan en una barrera al libre flujo del viento y ello impacte en la confiabilidad de las mediciones realizadas.

Las estaciones de monitoreo sobre las que no se generó ninguna recomendación porque el entorno cumple con las recomendaciones generales de la USEPA en cuanto a la altura de la toma de muestra, la ausencia de barreras físicas (edificios y arbolado) al libre flujo de aire y la distancia respecto a vialidades considerando el tráfico promedio diario estimado son: **Canales Lira y Planta de Tratamiento**.

Los resultados de la modelación de Aptitud mostraron que, salvo la estación Clínica de Nutrición, todas las demás son susceptibles de reubicación a sitios con mejores condiciones para el monitoreo. Especialmente en el escenario donde se ponderó con mayor peso a la población, es donde la mayoría de las estaciones de monitoreo actualmente en operación se ubican en sitios con el nivel de Aptitud más bajo (entre 5 y 7, en una escala de cero a diez, donde diez es el sitio más adecuado o Apto para el monitoreo de la calidad del aire y cero el sitio menos Apto para esta actividad). Este hecho, es por demás importante, si se considera que uno de los objetivos prioritarios que se persigue con el monitoreo de la calidad del aire es el de caracterizar los niveles de contaminación a los cuales está expuesta la población de un lugar determinado.

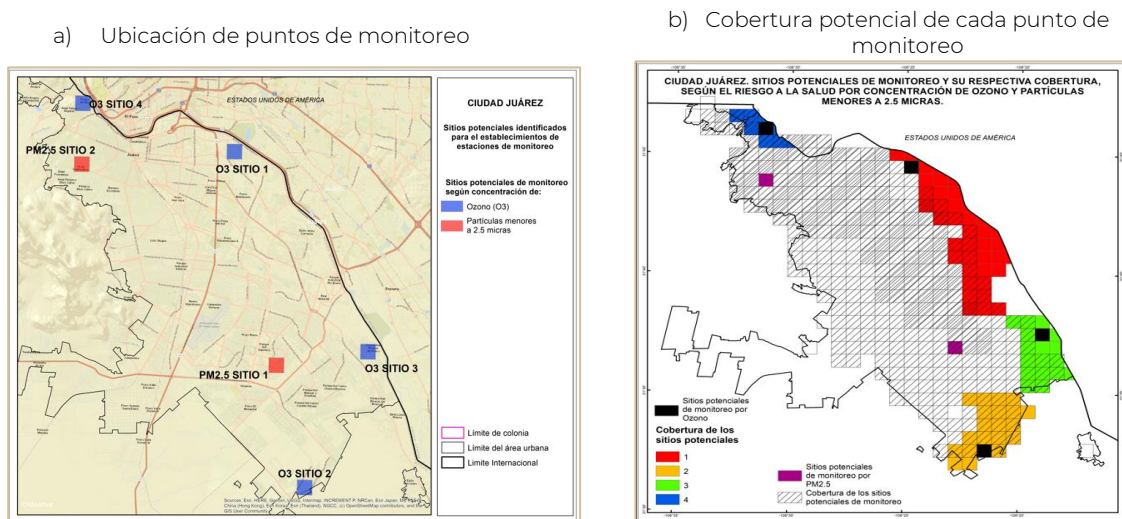
Un aspecto para destacar es que mientras la caracterización del entorno sugiere mejorar la ubicación de las estaciones ADVANCE y Clínica de Nutrición, la modelación de Aptitud identifica que las áreas de oportunidad para mejorar la representatividad de las mediciones de calidad del aire son más altas para las estaciones Instituto de Ingeniería y Tecnología y Planta de Tratamiento. Estas diferencias obedecen, sin embargo, a las diferencias propias de cada evaluación y al peso o importancia relativa de cada criterio empleado, de tal forma que esto indicaría que aparentemente todas las estaciones de monitoreo son susceptibles de reubicación para mejorar la representatividad de sus mediciones, ya sea por las características del entorno y el impacto potencial de fuentes de emisión cercanas sobre las mediciones de calidad del aire o bien para mejorar su capacidad para caracterizar altos niveles de contaminación y/o para caracterizar los niveles de contaminación en sitios con mayor cantidad de población potencialmente expuesta.

Los resultados obtenidos a través de la aplicación de la metodología para estimar la dosificación ambiental permitieron verificar que prácticamente todas las estaciones actuales podrían ser reubicadas a efecto de lograr una mejor caracterización de la calidad del aire en la ciudad teniendo como prioridad la vigilancia del riesgo a la salud. Así mismo, esta metodología identificó la posibilidad de incrementar el número de estaciones de monitoreo para caracterizar el riesgo a la salud en toda el área urbana de Ciudad Juárez. En general, de la aplicación de esta metodología resultó la identificación de 2 sitios potenciales para el monitoreo cuando se usó a las partículas suspendidas PM_{2.5}

como trazador de la contaminación atmosférica en la ciudad y 4 cuando se empleó al ozono.

Para obtener una red de monitoreo más robusta que la obtenida con el análisis de los resultados obtenidos para cada contaminante por separado, se hizo la sobre posición de las coberturas que definieron las áreas potenciales de monitoreo, a nivel de celda de modelación, tanto para ozono como para partículas $PM_{2.5}$. El resultado de esta acción condujo a la identificación de 6 puntos potenciales de monitoreo (Figura 6.1a). De acuerdo con la metodología aplicada estos puntos de monitoreo tendrían una cobertura suficiente para caracterizar la calidad del aire en prácticamente toda el área urbana (Figura 6.1b)

Figura 6.1. Sitios potenciales de monitoreo resultantes de la sobre posición de resultados obtenidos para partículas $PM_{2.5}$ y ozono.

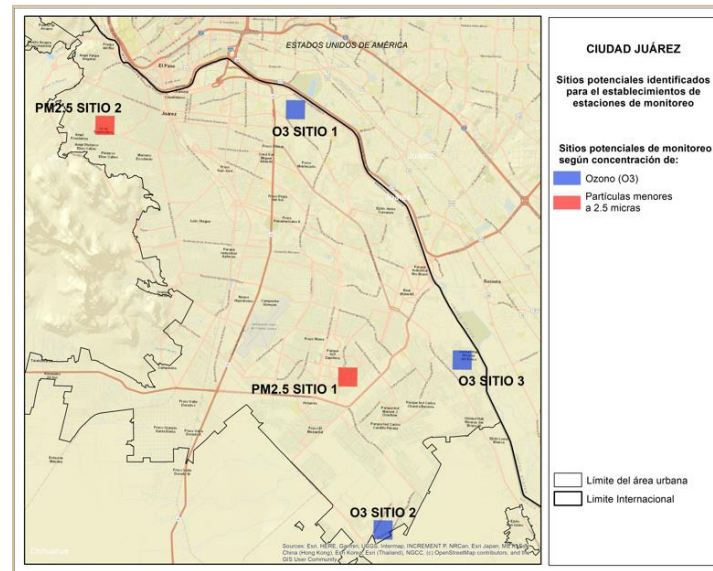


Fuente: Elaboración propia INECC

Al analizar la distribución espacial de las celdas seleccionadas para ubicar las estaciones de monitoreo que conformarían el nuevo SMCA de Ciudad Juárez se observó que los sitios identificados como “O3 SITIO 4” y “PM2.5 SITIO 2”, al noroeste del área urbana, quedaron muy próximos uno de otro. La distancia que separa a un punto del otro es de entre 3.0 y 3.5 km, lo que abre la posibilidad de que en el caso de que ambos entraran en operación se tuvieran mediciones redundantes de calidad del aire. Esto considerando que la escala espacial de representatividad de una estación de monitoreo orientada a caracterizar los niveles de concentración a los que está expuesta la población debe ser vecinal o urbana, es decir de entre 500m y más de 4 km. Ante esta posibilidad y en aras de reducir los costos operativos de la red de monitoreo, sin poner en riesgo la calidad y la representatividad de la información recopilada, se plantea la recomendación de sólo instalar una estación de monitoreo en la zona, bajo la consideración de que

las concentraciones que se miden en un sitio son representativas del otro. En este caso particular se plantea que la estación a instalar sea la que se identifica como “PM2.5 SITIO 2”, ya que para dicho sitio se determinó un mayor riesgo a la salud, producto de los niveles de concentración modelados y de la cantidad de población potencialmente expuesta a las mismas.

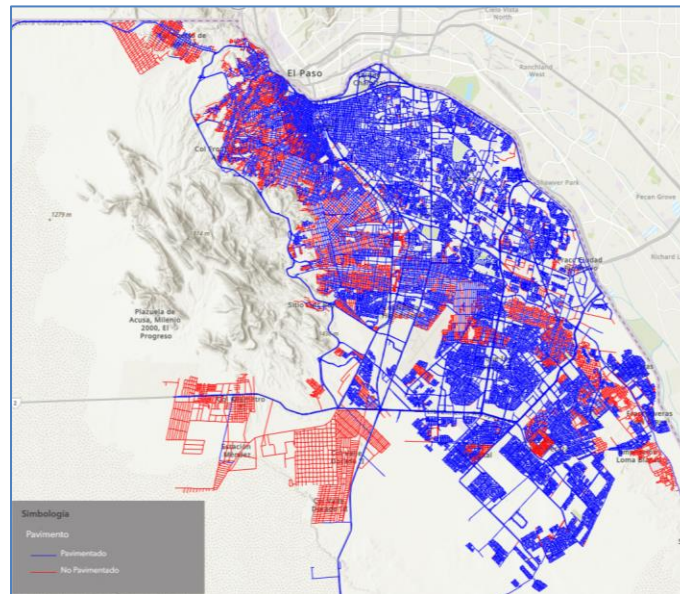
Figura 6.2. Sitios potenciales de monitoreo resultantes de la sobre posición espacial de resultados obtenidos para partículas PM_{2.5} y ozono y eliminación de sitios potencialmente redundantes



Fuente: Elaboración propia INECC

Por otra parte, resulta oportuno destacar que una de las limitaciones identificadas en la metodología empleada, especialmente en el tema de la modelación de la calidad del aire, es que el inventario de emisiones empleado para estimar las concentraciones ambientales de partículas suspendidas en la región no incluyó las emisiones de origen natural, que son aquellas asociadas a cualquier fuente o proceso natural en la vegetación y los suelos que generan emisiones. En esta categoría suelen incluirse las emisiones biogénicas, las emisiones del suelo y la erosión eólica. Esto significa entonces que las emisiones de partículas suspendidas provenientes del suelo y la erosión no fueron consideradas en la metodología empleada en este trabajo. Este hecho es relevante considerando, entre otros elementos, que de acuerdo con inventarios de emisiones previos para Ciudad Juárez reportan una contribución significativa (superior al 70%) de partículas provenientes de la capa superficial del suelo, especialmente proveniente de caminos no pavimentados (PROAIRE 2016-2025). En este contexto, de acuerdo con la información publicada por el Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMPI, 2024) la mayor superficie de caminos no pavimentados en Ciudad Juárez se ubica a lo largo de toda la región oeste de la ciudad (Figura 6.3).

Figura 6.3. Vialidades con y sin pavimento en Ciudad Juárez

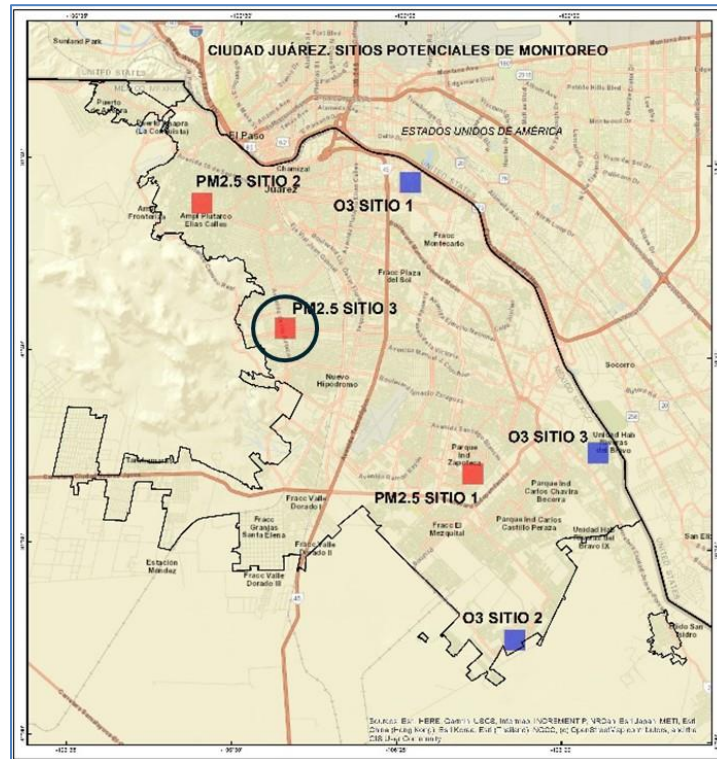


Fuente: Instituto Municipal de Investigación y Planeación.
<https://www.imip.org.mx/imip/files/mapas/Pavimento/index.html>

Ante esta situación se plantea la posibilidad de adicionar una estación de monitoreo, a las ya determinadas mediante la aplicación de la metodología de dosificación ambiental, que permita capturar la influencia de las vialidades sin pavimentar sobre la calidad del aire en la región, especialmente en cuanto a las concentraciones de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$. El punto sugerido para ubicar esta estación es el señalado con la clave “ $PM_{2.5}$ Sitio 3” en la Figura 6.3. Dicho punto, se determinó sobre la base de que la ubicación de las estaciones identificadas en la Figura 6.4 como “ $PM_{2.5}$ Sitio 2” y “ $PM_{2.5}$ Sitio 1”, ya posibilitan la caracterización de la calidad del aire en las porciones oeste – norte y oeste -sur de la ciudad, por lo que el punto de medición adicional caracterizaría la calidad del aire y la importancia relativa de los caminos no pavimentados en la zona oeste – centro de Ciudad Juárez. En adición a esta consideración, también se tomó en cuenta que en la celda propuesta existe alta densidad de población, en el análisis de conglomerados se registró alta dosificación ambiental, cuenta con áreas identificadas con muy alta aptitud para el monitoreo de la calidad del aire y en el pasado en esa región han operado estaciones de monitoreo manual tal como la denominada Niñez Mexicana. En la actualidad, en la proximidad de este punto, se ubican las estaciones ADVANCE y Clínica de Nutrición.

Considerando lo antes descrito, la propuesta para configurar la nueva red de monitoreo de Ciudad Juárez considera la instalación de 6 estaciones de monitoreo, con la distribución espacial mostrada en la Figura 6.4.

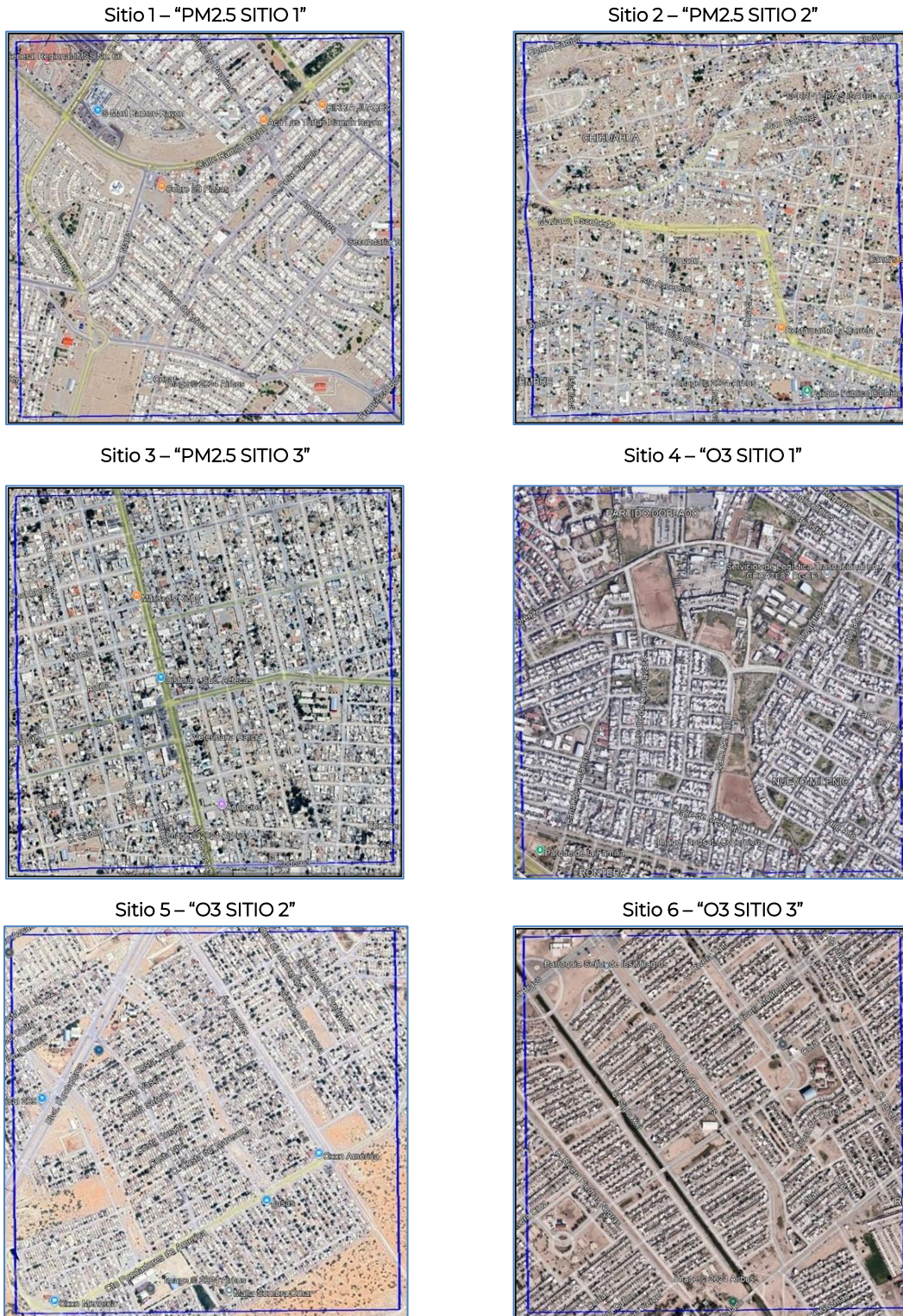
Figura 6.4. Punto adicional de monitoreo sugerido para evaluar el impacto de los caminos no pavimentados a las concentraciones de partículas suspendidas en la región



Fuente: Elaboración propia INECC

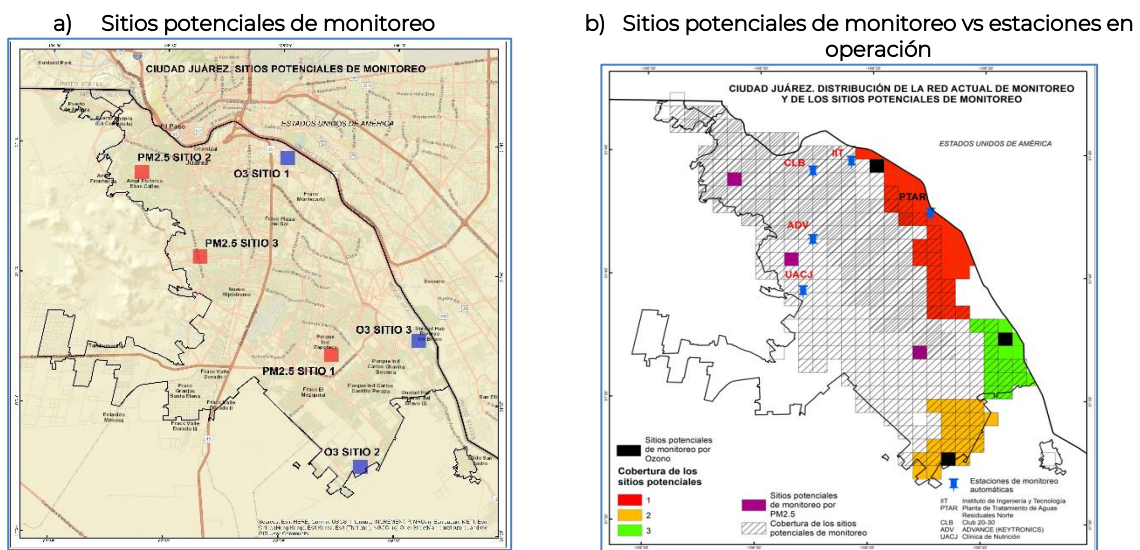
Como complemento a la metodología basada en los riesgos a la salud empleada para identificar los sitios potenciales de monitoreo, se hizo un análisis cualitativo sobre la importancia relativa de cada sitio propuesto a través de la revisión de imágenes de satélite disponibles en Google Earth en el mes de septiembre de 2024, encontrándose que ninguno de los sitios potenciales de monitoreo corresponde a zonas con población escasa o dispersa. En la Figura 6.5, se puede apreciar que en todos los casos, se trata de zonas pobladas, con topografía relativamente plana y homogénea lo que permitiría asegurar representatividad espacial de las mediciones y la caracterización de la calidad del aire en sitios con población potencialmente expuesta y por tanto con riesgo de experimentar efectos negativos en su salud cuando la calidad del aire supere los niveles recomendados, ya sea por la normatividad mexicana en la materia o los valores guía sugeridos por la Organización Mundial de la Salud.

Figura 6.5. Imágenes de satélite y uso de suelo en las celdas identificadas como sitios potenciales de monitoreo



Otro aspecto para considerar en la selección de los puntos específicos de monitoreo es el de aprovechar la infraestructura existente y los datos históricos generados por los equipos en operación. Por ello, para evaluar la ubicación de las estaciones de monitoreo actualmente en operación con respecto a los sitios potenciales de monitoreo identificados en este trabajo se elaboró el mapa mostrado en la Figura 6.6, en el cual se puede apreciar que ninguna de las estaciones actuales se ubica en el perímetro definido por la celda o punto potencial de monitoreo. Sin embargo, hay estaciones que, si bien no se ubican dentro del perímetro delimitado por las celdas o puntos de monitoreo determinados por la metodología aplicada, se ubican en la vecindad de estas, lo que las hace viables como puntos de medición que pueden formar parte del nuevo SMCA de la ciudad, con la ventaja adicional de mantener vigente el uso de la información histórica de calidad del aire y meteorológica generada durante el tiempo que han estado funcionando. El hecho de que, con la metodología descrita, se obtenga la ubicación de posibles sitios de monitoreo que tengan una mayor eficiencia o representatividad que las estaciones de monitoreo existentes, no significa que se tenga necesariamente que reubicar o eliminar estas estaciones. Se requiere llevar a cabo un análisis de los costos que implica la reubicación de una estación de monitoreo y los beneficios que se obtendrían con dicho cambio, con lo cual se tendrán más elementos para decidir la reubicación o no de las estaciones ya existentes (Velásquez, A. G., 2008). Las estaciones de monitoreo que operan actualmente en las inmediaciones del perímetro definido por las celdas potenciales de monitoreo son: Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT), Clínica de Nutrición (UACJ) y ADVANCE (ADV).

Figura 6.6. Ubicación sitios potenciales de monitoreo y de estaciones de monitoreo actualmente en operación en Ciudad Juárez



Fuente: Elaboración propia INECC.

La estación Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT) se ubica muy próxima al sitio potencial de monitoreo identificado como "O3 SITIO 1". Aunque la ubicación de la estación IIT está a dos kilómetros al oeste de dicho punto y no forma parte de lo que se determinó como el área de cobertura de este, se sugiere aprovechar la existencia de la estación IIT para el monitoreo de la calidad del aire en la región. La propuesta se basa en el hecho de que en caso de hacer válida esta posibilidad se reducen los costos operativos asociados con la reconfiguración de la red, pues no se tendría que comprar un nuevo equipo ni reubicar alguna otra estación. Además, se puede mantener el uso académico que se le da actualmente a la estación y se rescata la información histórica generada por la misma, con lo que se puede dar continuidad al análisis de las tendencias de la calidad del aire en el sitio.

Las estaciones UACJ y ADVANCE, por su parte, se ubican muy próximas al sitio potencial de monitoreo identificado como "PM.5 SITIO 3". UACJ está 3.0 kilómetros al sur y ADVANCE a casi 2.0 kilómetros al noreste de dicho punto. En este caso, sin embargo, de acuerdo con los resultados derivados de la visita de campo para caracterizar el entorno inmediato de cada estación, en principio ninguna de las dos estaciones podría sustituir el punto de medición identificado en este trabajo, pues en ambos casos se identificaron condiciones que justificarían su reubicación para mejorar la representatividad de las mediciones realizadas. En el caso de la estación ADVANCE el factor que imposibilita esta acción es su proximidad a un parque ladrillero y en el caso de la estación UACJ es la presencia de abundantes calles y vialidades sin pavimentar. En ambos casos las situaciones encontradas se asumen que tienen un impacto directo en las lecturas de partículas suspendidas.

En este contexto, si la reubicación de los equipos de medición que actualmente se encuentran en las estaciones ADVANCE y/o UACJ en la celda identificada como sitio potencial de monitoreo o en la proximidad de esta no fuera posible porque no existen instalaciones que puedan alojar la instalación de la estación o bien en el entorno inmediato de las edificaciones que la pueden alojar también hay abundancia de calles y vialidades sin pavimentar, entonces sería recomendable mantener en funcionamiento la estación de monitoreo UACJ en el sitio en donde está actualmente, pero el análisis de los datos de partículas suspendidas que ahí se generen deberá tener presente el riesgo de registrar picos de concentración derivados de la resuspensión de polvo, tanto por el tránsito vehicular como por la acción del viento, especialmente cuando éste alcance intensidades superiores a los 7 m/s (Li W. W., et al, 2005).

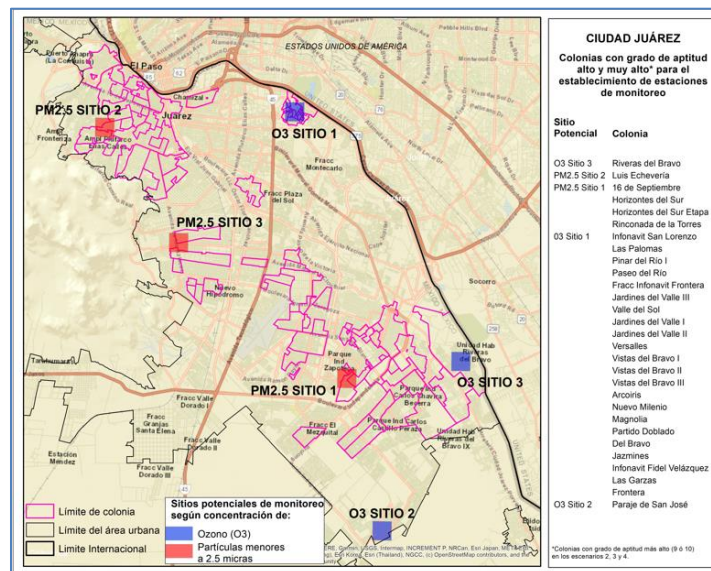
El resto de las estaciones de monitoreo actualmente en operación (CLB y PTAR), se ubican en puntos distantes respecto de las celdas identificadas como sitios

potenciales de monitoreo, lo que reduce la posibilidad de mantenerlas en sus ubicaciones actuales en la nueva configuración de la red de monitoreo, de acuerdo con la metodología empleada en este trabajo.

Ante la eventual inclusión de las estaciones de monitoreo IIT y UACJ para formar parte del SMCA de Ciudad Juárez, fue necesario identificar con mayor precisión la ubicación de las 4 estaciones restantes que conformarían dicho sistema. Para ello, se usaron los resultados de la modelación de Aptitud. Se sobrepuso la cobertura de las celdas o puntos potenciales de monitoreo con la cobertura de las áreas de mayor aptitud para instalar las estaciones de monitoreo, identificándose de esta manera las colonias más aptas dentro o en la proximidad de cada celda o punto potencial de monitoreo (Figura 6.7)

Enseguida se sobrepuso una cobertura más, que incluyó información relativa a instalaciones públicas para identificar, dentro de las áreas más aptas en cada celda potencial de monitoreo, aquellos edificios donde pudieran instalarse las estaciones. Las instalaciones públicas consideradas en el análisis fueron fundamentalmente Escuelas, Hospitales y Oficinas de Administración Pública, las cuales son recomendadas por la EPA debido a razones como la accesibilidad, la seguridad y la comunicación (EPA, 2007). De esta actividad se obtuvo un listado de sitios potenciales para la instalación de los equipos de monitoreo (Figura 6.8 y Tabla 6.1). Se incluyen alternativas de ubicación para los 6 sitios potenciales de monitoreo, incluso para aquellos sitios donde se propone mantener en operación algunas de las estaciones de monitoreo vigentes.

Figura 6.7. Áreas más aptas para el monitoreo de la calidad del aire dentro o en la proximidad de cada celda o punto potencial de monitoreo



Fuente: Elaboración propia INECC.

Tabla 6.1. Edificios públicos propuestos para la instalación de las estaciones de monitoreo que conformarán el nuevo SMCA de Ciudad Juárez.

Estación de monitoreo	Identificador	Coordenadas centro de celda		Sitios potenciales de instalación	Coordenadas	
		Latitud	Longitud		Latitud	Longitud
1	PM2.5 SITIO 1	31.615417	-106.37967	1. COLEGIO DE BACHILLERES DEL ESTADO DE CHIHUAHUA PLANTEL 11 TV 2. ESCUELA PRIMARIA ALFONSO HEN 3. ESCUELA PRIMARIA FEDERAL OTH 4. JARDIN DE NIÑOS VÍCTOR ALDRETE 5. ESCUELA PRIMARIA NATALIA RAMOS MÁRQUEZ 6. HOSPITAL GENERAL REGIONAL NÚMERO 66 7. ESCUELA PRIMARIA MIGUEL ANGEL ACOSTA 8. ESTANCIA INFANTIL BEBITOS	1. 31.611113 31.612485 31.612847 31.615350 31.618359 31.618389 31.618400 31.619512	-106.374387 -106.383896 -106.383803 -106.375202 -106.379237 -106.383824 -106.379187 -106.376656
2	PM2.5 SITIO 2	31.731111	-106.518594	1. JARDÍN DE NIÑOS JUANA DE IBARBOUROU 2. ESCUELA PRIMARIA JUAN JOSÉ MARTÍNEZ EL PIPILA	31.731254 31.732862	-106.513760 -106.518911
3	PM2.5 SITIO 3	31.677492	-106.475526	1. ESTACIÓN ACTUAL UACJ 2. COMUNITARIO KIKI ROMERO 3. PRIMARIA LUIS G. INCLÁN 4. ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA # 30 5. CENTRO COMUNITARIO MORELOS 6. CENTRO DE SALUD NO 6 7. CENTRO COMUNITARIO INDEPENDENCIA II 8. CENTRO DE SALUD	31.55519 31.673017 31.673588 31.676883 31.678814 31.680108 31.680934 31.681354	-106.466418 -106.473345 -106.479281 -106.472959 -106.477163 -106.475597 -106.475840 -106.479920
4	O3 SITIO 1	31.741345	-106.413202	1. ESTACIÓN ACTUAL IIT 2. ESCUELA PRIMARIA FEDERAL DAVID ALFARO SIQUEIROS 3. JARDÍN DE NIÑOS MÉXICO 4. CENTRO DE CAPACITACIÓN DE EDUCACIÓN ESPECIAL ZONA 20 5. CENTRO DE ATENCIÓN MÚLTIPLE NÚMERO 25 6. SECUNDARIA TÉCNICA NÚM. 38 7. CECATI 87	31.743138 31.739770 31.740242 31.742170 31.742750 31.743220 31.744691	-106.431999 -106.416574 -106.416410 -106.410860 -106.410439 -106.410099 -106.410882
5	O3 SITIO 2	31.543484	-106.357543	1. ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA 93 2. ESCUELA PRIMARIA JAIME TORRES BODET 3. JARDÍN DE NIÑOS LUCINA SAENZ HERRERA	31.539294 31.545681 31.546074	-106.359473 -106.361424 -106.359142
6	O3 SITIO 3	31.625105	-106.31655	1. JARDÍN DE NIÑOS MARÍA SOLEDAD MOTA VÁZQUEZ 2. JARDÍN DE NIÑOS FRANCISCO MUÑOZ LÓPEZ 3. PRE ESCOLAR UN SIGLO DE SERVICIO 4. ESCUELA PRIMARIA CARLOS URQUIDI GAYTÁN 5. ESCUELA PRIMARIA RIVERAS DEL BRAVO 6. ESCUELA PRIMARIA ESTATAL BENITO JUÁREZ	31.622482 31.624589 31.624599 31.626650 31.626685 31.629084	-106.320806 -106.317008 -106.316990 -106.314149 -106.314103 -106.320733

Fuente: Elaboración propia INECC.

6.2. Contaminantes por considerar.

Se sugiere que todas las estaciones de monitoreo cuenten con el equipamiento necesario para llevar a cabo la medición de todos los contaminantes criterio salvo el dióxido de azufre. Esta sugerencia se fundamenta en los criterios definidos por la USEPA en el Título 40 del Código Federal de Regulaciones, Parte 58, Subparte B, Apéndice D, que en el numeral 4. Criterios de diseño específicos de contaminantes para estaciones estatales y locales de monitoreo de calidad del aire (SLAMS, por sus siglas en inglés), describe los criterios específicos para determinar el número adecuado de estaciones para el monitoreo de cada contaminante. Criterios que se asumieron como válidos en este trabajo para determinar la conveniencia o no de llevar a cabo el monitoreo de cada contaminante. Al respecto, en dicho documento se señala lo siguiente:

Partículas suspendidas PM_{10} : cuando en la ciudad de interés la población supere un millón de habitantes (como es el caso de Ciudad Juárez) y las concentraciones ambientales del contaminante superen en al menos un 20% el valor límite establecido en las Normas Nacionales de Calidad del Aire Ambiental, se deben emplear entre 6 y 10 estaciones de monitoreo, si son iguales o mayores al 80% del valor límite entonces emplear entre 4 y 8 estaciones de monitoreo y cuando sean equivalentes a menos del 80% del valor límite entonces emplear entre 2 y 4 estaciones.

Partículas suspendidas $PM_{2.5}$: cuando en la ciudad de interés la población supere un millón de habitantes (como es el caso de Ciudad Juárez) y en los tres años más recientes las concentraciones ambientales del contaminante sean iguales o mayores al 85% del valor límite establecido en las Normas Nacionales de Calidad del Aire Ambiental se deben emplear al menos 3 estaciones de monitoreo. Si dichas concentraciones son equivalentes a menos del 85% del valor límite entonces emplear al menos 2 estaciones.

Ozono: cuando en la ciudad de interés el número de habitantes se ubique entre 350,000 y 4 millones de habitantes y en los tres años más recientes las concentraciones ambientales del contaminante sean iguales o mayores al 85% del valor límite establecido en las Normas Nacionales de Calidad del Aire Ambiental se deben emplear al menos 2 estaciones de monitoreo.

Monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno: se requiere un monitor para operar ubicado cerca de la carretera en ciudades que tengan una población de 1,000,000 de personas o más.

Dióxido de azufre: en el caso de este contaminante se recomienda estimar el Índice de Emisiones Ponderado por la Población (multiplicando la población de cada área estadística básica y la cantidad total de SO₂ en toneladas por año emitida por dicha área. El producto resultante se divide por un millón, proporcionando un valor de Índice, cuyas unidades son millones de personas-toneladas por año). Para cualquier área estadística básica con un valor de índice igual o superior a 1,000,000, se requiere un mínimo de tres monitores de SO₂. Si el valor del índice es igual o superior a 100,000, pero inferior a 1,000,000, se requiere un mínimo de dos monitores de SO₂ y si el índice es igual o superior a 5,000, pero inferior a 100,000, se requiere un mínimo de un monitor de SO₂ dentro de esta área.

En Estados Unidos el área estadística básica se define como una entidad geográfica estadística que consiste en el condado o condados asociados con al menos un área urbanizada/grupo urbano de al menos 10,000 habitantes, más los condados adyacentes que tienen un alto grado de integración social y económica. Bajo esta consideración, se estimó el Índice de Emisiones Ponderado por la Población para el municipio de Ciudad Juárez, usando los datos del Censo de Población y Vivienda del año 2020 y los datos de emisiones de SO₂ proporcionados por la SEMARNAT para Ciudad Juárez para el año 2018. El resultado obtenido fue un Índice igual a 756, situación que indicaría que no es necesaria la medición de este contaminante.

Teniendo estos criterios como referencia y considerando los registros históricos de calidad del aire disponibles para la región es como se determinó la conveniencia de sugerir la medición de todos los contaminantes criterio, salvo el dióxido de azufre.

6.3. Elementos que deberán integrar el SMCA.

Para concluir, resulta conveniente destacar que parte fundamental del éxito operativo de un SMCA a lo largo del tiempo tiene relación directa con la observación de las condiciones mínimas establecidas en la Norma Oficial Mexicana “NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire”, y de las cuales a continuación se presenta un breve resumen.

Elementos que deben integrar un SMCA:

- Estaciones de medición (de muestreo o de monitoreo);
- Sistemas de acopio y transmisión de datos;

- Centro de cómputo/control;
- Oficinas administrativas,
- Personal capacitado, e
- Información meteorológica apropiada.

Las estaciones de monitoreo deberán estar equipadas con sistemas para la adquisición y transmisión continua de la información de calidad del aire. La captura de la información se realizará de manera directa en la memoria de los instrumentos o a través de un equipo externo que solicite al instrumento la información, ya sea por vía analógica o digital, y la deposite en un medio de almacenamiento. En el caso de las estaciones de muestreo, los registros serán procesados y almacenados en el centro de cómputo del sistema de monitoreo de calidad del aire.

Se deberá mantener un respaldo permanente de la información, en medios electrónicos y/o gráficos, del historial de los datos crudos y validados.

Los centros de cómputo y de control deberán contar con los sistemas de seguridad necesarios, para evitar pérdidas en el registro de información, en específico con lo siguiente:

- Control ambiental interno, conforme a las especificaciones del fabricante;
- Planta de respaldo de energía eléctrica;
- Sistema contra incendios, conforme a las recomendaciones del fabricante y con base en la normatividad de la Secretaría de Trabajo y Previsión Social y, en su caso, supletoriamente en la legislación local, y
- Unidades automáticas de respaldo.

Se deberá contar con laboratorios, analítico, de calibración, y de transferencia de patrones, u obtendrán estos servicios de forma externa con laboratorios acreditados, o a través de convenios de cooperación con otras entidades nacionales y/o internacionales.

Es recomendable que se cuente con un área para mantenimiento propio o bajo convenio o contrato directo o de garantía, para realizar reparaciones, pruebas de funcionamiento, limpieza y calibración de equipos. Dichas áreas contarán con un almacén de consumibles, partes, refacciones y equipos de reposición que permitan en lo posible, la operación ininterrumpida de las estaciones e instrumentos utilizados por el sistema.

El área responsable del sistema de monitoreo de la calidad del aire deberá realizar cuando menos las siguientes actividades:

- Soporte técnico, mantenimiento y calibración de equipos;
- Control y aseguramiento de la calidad;
- Análisis estadístico, interpretación de datos de la calidad del aire y meteorología; y,
- Comunicación social, en coordinación con el área responsable de ello, según corresponda en los términos de las leyes de transparencia y de acceso a la información pública.

Las estaciones de monitoreo deberán ser resguardadas con sistemas de protección contra descargas eléctricas, puesta a tierra de la caseta y equipo de aire acondicionado en el interior de la estación para proteger los instrumentos y equipos de medición.

Consideraciones operativas

Se deberá contar con un procedimiento de evaluación de rutina de las estaciones de monitoreo y registrará en bitácora o formatos preestablecidos los resultados de dicha evaluación, la cual contendrá, al menos, la verificación de:

- El estado, exterior e interior, de la estación;
- El estado físico de la toma de muestra y de la torre meteorológica (si se cuenta con ésta);
- Que no haya obstáculos que impidan el libre paso de la corriente de aire;
- El estado general del interior de la estación, en particular del funcionamiento del equipo de aire acondicionado;
- La operación de los equipos, según las especificaciones del fabricante;
- El registro, almacenamiento y transmisión de datos; y
- La disponibilidad de consumibles que se encuentran en la estación (cilindros de gases de calibración, filtros, purificadores, limpiadores de aire, entre otros).

Operación del Centro de Control. En el centro de control se recolectarán los datos de forma continua. Los datos generados por las estaciones de monitoreo serán recolectados automáticamente en el centro de control por medio de equipos telemétricos. Diariamente se realizará la recolección de datos promedio de una hora, en horarios previamente establecidos.

Operación de equipos. Los equipos de muestreo y monitoreo de contaminantes funcionarán de acuerdo con las especificaciones de operación proporcionados por el fabricante de los equipos.

Mantenimiento. Los instrumentos de medición y equipos de soporte del sistema de monitoreo de calidad del aire recibirán mantenimiento, de acuerdo con los procedimientos establecidos por el mismo sistema. Los responsables del muestreo y monitoreo de la calidad del aire desarrollarán un programa de mantenimiento preventivo para cumplir con el objetivo del sistema. Este programa contendrá por lo menos lo siguiente:

- Frecuencia de mantenimiento de estaciones;
- Frecuencia de mantenimiento de instrumentos de medición;
- Frecuencia de mantenimiento de equipos de soporte;
- Programas de sustitución de instrumentos de medición y equipos de soporte; y
- Lugares y responsables de mantenimiento de instrumentos de medición y equipos de soporte.

El programa de mantenimiento preventivo deberá contemplar las instalaciones centrales del sistema monitoreo de la calidad del aire y las estaciones de muestreo y monitoreo, con sus instrumentos de medición (analizadores, muestreadores, equipo meteorológico y equipo de calibración) y sus equipos de soporte (tomas de muestra, múltiples de muestra, extractores de aire, fuentes de energía, sistemas de iluminación, de control de temperatura, humedad relativa, entre otros).

Todas las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo que se lleven a cabo deberán ser registradas en una bitácora y se anexarán al expediente del instrumento de medición y/o equipo de soporte, según corresponda. El expediente del instrumento de medición y/o equipo contendrá al menos: nombre, marca, modelo, número de serie, especificaciones técnicas, lista de refacciones y consumibles, y registros de calibración, de cambio de ubicación, de modificaciones, entre otros.

Calibración. Los instrumentos de medición se calibrarán usando métodos de referencia, de acuerdo con la normatividad vigente (normas oficiales mexicanas ambientales) o a las especificaciones del fabricante. Para la calibración de los instrumentos de medición, se utilizarán gases de calibración y estándares de transferencia, con trazabilidad a materiales de referencia y patrones nacionales mantenidos en el Centro Nacional de Metrología (CENAM), según aplique, acorde a principios metrologícos que garanticen la comparabilidad de las mediciones a través de la trazabilidad de las medidas.

En este contexto y basados en la experiencia del INECC apoyando el fortalecimiento de diversos sistemas de monitoreo de calidad del aire en el país,

se recomienda, en términos de personal, que para atender los aspectos operativos se considere la necesidad de contar con un técnico en monitoreo por cada tres estaciones que se encuentren en un radio de hasta 30 km. Este número podrá variar en función de la distancia inter-estaciones y también respecto al centro de control. En la actualidad los elementos tecnológicos están apoyando de forma positiva el uso de los recursos, ya que a través del internet es posible conectarse de forma remota a las computadoras de las estaciones de monitoreo y revisar el estado operativo de los equipos de medición sin necesidad de trasladarse a éstas, no obstante, es claro que la revisión remota no sustituye o elimina la necesidad de la supervisión estrecha del funcionamiento de las estaciones, ya que como se mencionó, hay elementos internos y externos que no pueden ser “vistos” de forma remota, como rupturas, obstrucciones, etc.

6.4. Consideraciones finales.

Finalmente, es importante destacar algunas consideraciones relevantes sobre la metodología empleada en este trabajo que se deben considerar en futuros trabajos de esta naturaleza, tales como:

Tanto en el análisis de Aptitud como en la estimación de la dosificación ambiental se asumió que la población permanece estática a través del día. Las personas no se encuentran las 24 horas del día en sus casas, que son los puntos que se toman en cuenta para determinar la distribución de la población por el INEGI, sino que se mueven entre diferentes celdas durante el día. Las personas pueden moverse de zonas habitacionales a laborales/escolares/comerciales durante el día y de regreso a las habitacionales durante la noche, con lo que se tendría una variación hora por hora de la cantidad de habitantes que se encuentran en cada celda. El evaluar la variación de población hora por hora en cada una de las celdas en que se dividió el área de estudio rebasa los objetivos de este trabajo, pero puede resultar de interés analizar escenarios alternos variando la cantidad de población durante el día/noche en algunas celdas donde se tiene alta variabilidad en concentración de personas para estos periodos, tales como la zona universitaria, el centro histórico de la ciudad y las zonas con alta actividad industrial. En este sentido, la información detallada sobre la caracterización resulta fundamental.

El inventario de emisiones es un elemento fundamental tanto en la modelación de Aptitud como en la aplicación de la metodología desarrollada por Noll y Mitsutomi para identificar sitios de monitoreo con base en el riesgo a la salud, por lo que se recomienda trabajar en el desarrollo de un inventario de emisiones actualizado y de alta resolución que reduzca la incertidumbre asociada con los volúmenes y patrones espaciales y temporales de emisiones contaminantes, lo cual incluye la validación de la ubicación geográfica de las fuentes fijas de emisión.

Es muy común, en la actualidad, que los datos de ubicación de las fuentes puntuales se reporten de manera incorrecta, con los consecuentes efectos en la evaluación de la calidad del aire.

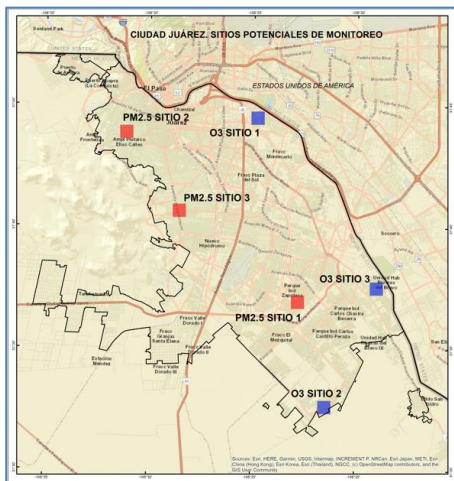
La importancia relativa que tienen las vialidades, en términos de su ubicación, en el análisis de Aptitud no contempla las diferencias que existen entre ellas, por ejemplo, vías primarias, secundarias y alimentadoras. Igualmente, la información disponible en INEGI está muy fragmentada y eso incorpora incertidumbre en la estimación de las distancias y de su importancia relativa en el análisis. Esta situación, sin embargo, trató de compensarse asignando una ponderación poco significativa en la modelación de Aptitud, pero resultaría más valioso para el análisis contar con información más robusta.

La modelación de la calidad del aire es un elemento de la mayor relevancia en la metodología empleada e idealmente debería considerar la estimación de la calidad del aire de todo el año, sin embargo, las limitaciones de cómputo y tiempo para la realización del proyecto impusieron algunas restricciones que deberían ser consideradas en futuros trabajos. A pesar de las limitaciones antes descritas, los resultados obtenidos en este trabajo aportan elementos valiosos para apoyar la toma de decisiones respecto a una posible reconfiguración del actual Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire a fin de mejorar su desempeño para caracterizar el riesgo a la salud de la población.

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos a través de la aplicación de la metodología para estimar la dosificación ambiental permitieron verificar que prácticamente todas las estaciones actuales podrían ser reubicadas a efecto de lograr una mejor caracterización de la calidad del aire en la ciudad teniendo como prioridad la vigilancia del riesgo a la salud. Así mismo, esta metodología identificó la posibilidad de incrementar el número de estaciones de monitoreo para caracterizar el riesgo a la salud en toda el área urbana de Ciudad Juárez. En general, los resultados sugieren que el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire de la ciudad quede conformado por seis estaciones, conforme a la ubicación mostrada en la Figura 7.1 y Tabla 7.1, a nivel de celda de modelación

Figura 7.1. Sitios potenciales de monitoreo a nivel de celada de modelación



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.1. Ubicación geográfica de sitios potenciales de monitoreo (centro de celda)

Estación de monitoreo	Identificador	Coordenadas centro de celda	
		Latitud	Longitud
1	PM2.5 SITIO 1	31.615417	-106.37967
2	PM2.5 SITIO 2	31.731111	-106.518594
3	PM2.5 SITIO 3	31.677492	-106.475526
4	O3 SITIO 1	31.741345	-106.413202
5	O3 SITIO 2	31.543484	-106.357543
6	O3 SITIO 3	31.625105	-106.31655

Dentro de cada celda o punto potencial de monitoreo, o en su entorno inmediato, se identificaron instalaciones públicas que pudieran dar alojamiento a las estaciones de monitoreo. El listado de alternativas identificadas por sitio propuesto es incluido en la Tabla 7.2 Es importante destacar, que será necesario realizar una evaluación general de cada opción a fin de identificar cual es la que ofrece las mejores condiciones para la instalación de las estaciones. Entre las consideraciones a tomar en cuenta deberán incluirse las siguientes: accesibilidad al sitio, suficiencia de espacio para la instalación de estaciones, acceso a energía eléctrica, acceso a servicio de internet, vigilancia para evitar actos de vandalismo, ausencia de edificios, muros y/o áreas arboladas que impidan el libre flujo del viento y distancia prudente de vialidades de alto flujo vehicular acorde con las recomendaciones de la USEPA, las cuales son referidas en el Anexo 1, de este Informe.

Tabla 7.2. Alternativas para la instalación de las estaciones de monitoreo que conformarán el nuevo SMCA de Ciudad Juárez

Estación de monitoreo	Sitios potenciales de instalación	Coordenadas		Comentario
		Latitud	Longitud	
1	1. COLEGIO DE BACHILLERES DEL ESTADO DE CHIHUAHUA PLANTEL 11 TV	1. 31.611113	-106.374387	Ninguno
	2. ESCUELA PRIMARIA ALFONSO HEN	31.612485	-106.383896	
	3. ESCUELA PRIMARIA FEDERAL OTH	31.612847	-106.383803	
	4. JARDIN DE NIÑOS VÍCTOR ALDRETE	31.615350	-106.375202	
	5. ESCUELA PRIMARIA NATALIA RAMOS MÁRQUEZ	31.618359	-106.379237	
	6. HOSPITAL GENERAL REGIONAL NÚMERO 66	31.618389	-106.383824	
	7. ESCUELA PRIMARIA MIGUEL ANGEL ACOSTA	31.618400	-106.379187	
	8. ESTANCIA INFANTIL BEBITOS	31.619512	-106.376656	
2	1. JARDÍN DE NIÑOS JUANA DE IBARBOUROU	31.731254	-106.513760	Ninguno
	2. ESCUELA PRIMARIA JUAN JOSÉ MARTÍNEZ EL PIPILA	31.732862	-106.518911	
3	1. ESTACIÓN ACTUAL UACJ	31.55519	-106.466418	Si la reubicación de la estación ADVANCE y/o UACJ en la celda identificada como sitio potencial de monitoreo no fuera posible porque no existen instalaciones que puedan alojar la instalación de la estación o bien en el entorno inmediato de las edificaciones existentes hay abundancia de calles y vialidades sin pavimentar, entonces sería recomendable mantener en funcionamiento la estación de monitoreo UACJ en el sitio en donde está actualmente, pero el análisis de los datos de partículas suspendidas se deberá tener presente el riesgo de registrar picos de concentración asociados a la resuspensión de polvo, tanto por el tránsito vehicular como por la acción del viento.
	2. COMUNITARIO KIKI ROMERO	31.673017	-106.473345	
	3. PRIMARIA LUIS G. INCLÁN	31.673588	-106.479281	
	4. ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA # 30	31.676883	-106.472959	
	5. CENTRO COMUNITARIO MORELOS	31.678814	-106.477163	
	6. CENTRO DE SALUD NO 6	31.680108	-106.475597	
	7. CENTRO COMUNITARIO INDEPENDENCIA II	31.680934	-106.475840	
	8. CENTRO DE SALUD	31.681354	-106.479920	
4	1. ESTACIÓN ACTUAL IIT	31.743138	-106.431999	Se recomienda como prioridad, mantener en operación en su sitio actual la estación de monitoreo IIT, observando las recomendaciones relativas a vigilar la modificación del entorno inmediato para mantener la representatividad de las mediciones de calidad del aire. Tales recomendaciones incluyen: <ul style="list-style-type: none"> Vigilar crecimiento de árboles cercanos y realizar actividades de poda cuando el tamaño les haga actuar como barrera al libre flujo de viento. Existe la posibilidad de incrementar la altura de la toma de muestra para reducir el impacto de la zona arbolada sobre la medición de la calidad del aire.
	2. ESCUELA PRIMARIA FEDERAL DAVID ALFARO SIQUEIROS	31.739770	-106.416574	
	3. JARDÍN DE NIÑOS MÉXICO	31.740242	-106.416410	
	4. CENTRO DE CAPACITACIÓN DE EDUCACIÓN ESPECIAL ZONA 20	31.742170	-106.410860	
	5. CENTRO DE ATENCIÓN MÚLTIPLE NÚMERO 25	31.742750	-106.410439	
	6. SECUNDARIA TÉCNICA NÚM. 38	31.743220	-106.410099	
	7. CECATI 87	31.744691	-106.410882	
5	1. ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA 93	31.539294	-106.359473	Ninguno
	2. ESCUELA PRIMARIA JAIME TORRES BODET	31.545681	-106.361424	
	3. JARDÍN DE NIÑOS LUCINA SAENZ HERRERA	31.546074	-106.359142	
6	1. JARDÍN DE NIÑOS MARÍA SOLEDAD MOTA VÁZQUEZ	31.622482	-106.320806	Ninguno
	2. JARDÍN DE NIÑOS FRANCISCO MUÑOZ LÓPEZ	31.624589	-106.317008	
	3. PRE ESCOLAR UN SIGLO DE SERVICIO	31.624599	-106.316990	
	4. ESCUELA PRIMARIA CARLOS URQUIDI GAYTÁN	31.626650	-106.314149	
	5. ESCUELA PRIMARIA RIVERAS DEL BRAVO	31.626685	-106.314103	
	6. ESCUELA PRIMARIA ESTATAL BENITO JUÁREZ	31.629084	-106.320733	

Es importante destacar que el hecho de que, con la metodología empleada, se obtenga la ubicación de posibles sitios de monitoreo que tengan una mayor eficiencia o representatividad que las estaciones de monitoreo existentes, no significa que se tenga necesariamente que reubicar o eliminar estas estaciones. Se requiere llevar a cabo un análisis de los costos que implica la reubicación de una estación de monitoreo y los beneficios que se obtendrían con dicho cambio, con lo cual se tendrán más elementos para decidir la reubicación o no de las estaciones ya existentes. En este sentido, las principales ventajas que parece ofrecer la propuesta de diseño de red que se presenta en este trabajo incluye:

- Una mejor caracterización del riesgo a la salud asociada a la calidad del aire que se registra en la ciudad
- Se tiene una mejor cobertura espacial de la caracterización de la calidad de aire, pues se agregan estaciones que permiten caracterizar la calidad del aire en la zona sur del área urbana de Ciudad Juárez, tema que no es menor considerando que es la zona hacia donde se registra el mayor crecimiento de la ciudad.
- Se minimiza el impacto de fuentes específicas de emisión sobre las mediciones de calidad del aire realizadas en algunas estaciones de monitoreo.
- Compatibiliza de una mejor manera la escala espacial de representatividad de las mediciones de calidad del aire que se pueden realizar en los sitios propuestos de monitoreo con el objetivo de caracterizar la calidad del aire a la que está expuesta la mayoría de la población.
- Se aprovecha la información histórica generada por dos de las estaciones de monitoreo actualmente en operación.

Se sugiere que todas las estaciones de monitoreo cuenten con el equipamiento necesario para llevar a cabo la medición de todos los contaminantes criterio salvo el dióxido de azufre. Esta sugerencia se fundamenta en los criterios definidos por la USEPA en el Título 40 del Código Federal de Regulaciones, Parte 58, Subparte B, Apéndice D, que en el numeral 4. Criterios de diseño específicos de contaminantes para estaciones estatales y locales de monitoreo de calidad del aire (SLAMS, por sus siglas en inglés), describe los criterios específicos para determinar el número adecuado de estaciones para el monitoreo de cada contaminante. Criterios que se asumieron como válidos en este trabajo para determinar la conveniencia o no de llevar cabo el monitoreo de cada contaminante.

Entre las consideraciones hechas para recomendar la medición de todos los contaminantes criterio, salvo el dióxido de azufre, destacan los siguientes:

- En la actualidad la información disponible sobre calidad del aire indica que se presentan niveles de concentración que son superiores a los límites normados de protección a salud con respecto a partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como de ozono, por lo que resulta conveniente su vigilancia.
- Ciudad Juárez tiene una población superior a un millón de habitantes. Esta es una condición suficiente para que en estados Unidos la USEPA recomiende la instalación de al menos una estación de monitoreo para la vigilancia de las concentraciones ambientales de monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno.
- No se considera necesaria la medición de dióxido de azufre dado que el índice de Emisiones ponderado por Población (que se estima multiplicando la población de cada área estadística básica y la cantidad total de SO_2 en toneladas por año emitida por dicha área y dividiendo el producto de dicha operación entre un millón da como resultado una cifra significativamente menor al índice sugerido por la USEPA para instalar una estación de monitoreo para vigilar las concentraciones de este contaminante.

Finalmente, resulta oportuno señalar que dado que el principio con el que se identificaron los sitios más aptos para ubicar y/o reubicar las estaciones de monitoreo para fortalecer el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire Ciudad Juárez, fue el riesgo a la salud, dichos sitios no sólo son de utilidad para caracterizar los niveles de exposición de la población sino también para otros usos, tales como:

- Proveer información de manera oportuna a la población sobre los niveles de contaminación en la ciudad.
- Evaluar el cumplimiento de la normatividad mexicana en la materia.
- Activar procedimientos de control de emergencia para prevenir y/o controlar episodios de alta contaminación.
- Observar tendencias de contaminación en la región.
- Proveer datos para apoyar trabajos de investigación en materia de calidad del aire.

Para concluir, resulta conveniente destacar que parte fundamental del éxito operativo de un sistema de monitoreo a lo largo del tiempo tiene relación directa con la observación de las condiciones mínimas establecidas en la Norma Oficial Mexicana "NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire", por lo que se recomienda atender a plenitud las recomendaciones ahí planteadas en términos de: Instalación de estaciones, operación, mantenimiento y calibración de equipos; Gestión, aseguramiento y control de la calidad; y, Manejo de datos de la calidad del aire.

8. Bibliografía

Appendix D to Part 58—Relationship Between Site Types and Scales of Representativeness. Disponible en (https://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?n=40y6.0.1.1.6#ap40.6.58_161.d).

Appendix E Part 58 - Probe and monitoring path siting criteria for ambient air quality monitoring. Disponible en: <https://www.gpo.gov/fdsys/granule/CFR-2012-title40-vol6/CFR-2012-title40-vol6-part58-appE>

Atkinson R W., S Kang, H R Anderson, I C Mills and H. A. Walton. 2014. Epidemiological time series studies of PM_{2.5} and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and metaanalysis. *Thorax* 2014;69:660–665. doi: 10.1136/thoraxjnl-2013-204492.

Berumen-Rodriguez, Alejandra Abigail et al. Revisión del impacto del sector ladrillero sobre el ambiente y la salud humana en México. *Salud pública Méx* [online]. 2021, vol.63, n.1, pp.100-108. Epub 15-Ago-2022. ISSN 0036-3634. <https://doi.org/10.21149/11282>.

CDPHE – Colorado Department of Public Health & Environment. 2015. Ambient Air Monitoring Network Assessment. Disponible para consulta en línea en: https://www.colorado.gov/airquality/tech_doc_repository.aspx?action=open&file=2015_CO_5yr_Network_Assessment.pdf

Chen By, Chen Ch, Chuang YC, Honda Y, Chiang HC and Gou YL. 2016. Schoolchildren's antioxidation genotypes are susceptible factors for reduced lung function and airway inflammation caused by air pollution. *Environ Res.* 2016 Aug;149:145-50. doi: 10.1016/j.envres.2016.05.007. Epub 2016 May 18.

40 CFR 58.10. Code of Federal Regulations. Title 40. Protection of Environment. Part 58. Ambient Air Quality Surveillance. Subpart B. Monitoring Network. 58.10 Annual monitoring network plan and periodic network assessment. Disponible para consulta en línea en: https://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?n=40y6.0.1.1.6#se40.6.58_110

Curtis, L., W. Rea, et al. (2006), "Adverse health effects of outdoor air pollutants", *Environ Int* 32(6): 815-30.

Evans, J.S., J.I. Levy, C. Hammitt, C. Santos Burgoa y M. Castillejo, junto con M. Caballero Ramírez, M. Hernández Ávila, H. Riojas, L. Rojas Bracho, P. Serrano

Trespalacios, J.D. Spengler y H. Suh. 2002. Health Benefits of Air Pollution Control. En: L.T. Molina y M.J. Molina. Air Quality in the Mexico Megacity. Kluwer, Boston. Pp. 105-136. (Hay traducción al español del FCE, México).

He, G., Fan, M., and Zhou, M. 2016. The effect of air pollution on mortality in China: Evidence from the 2008 Beijing Olympic Games. Journal of Environmental Economics and management, 29, pp. 18-39.

Hernández-Cadena, L., M. M. Téllez-Rojo, L. H. Sanin-Aguirre, M. Lacasana-Navarro, A. Campos e I. Romieu. 2000. Relationship between emergency consultations for respiratory diseases and air pollution in Juarez City, Chihuahua. Salud Pública de México 42(4):288-97.

Hoek, G., R.M. Krishnan, R. Beelen, A. Peters, B. Ostro, B. Bronekreef and J.D. Kaufman. 2013. Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. Environmental Health. 12:43. 1-16

Holguín F., M. M. Téllez-Rojo, M. Hernández, M. Cortez, J. C. Chow, J.G. Watson, D. Mannino, I. Romieu. 2003. Air pollution and heart rate variability among the elderly in Mexico City. Epidemiology 14 (5):521-7.

IMPI (2024) – Instituto Municipal de Planeación e Investigación. Radiografía Socioeconómica del Municipio de Juárez 2022. Así comenzó 2023. Recuperado de <https://www.imip.org.mx/descargas/RadiografiaSocioeconomica2022-2023.pdf>

INECC – Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2024). Informe Nacional de Calidad del Aire 2021. Disponible en: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2021.pdf>

INEGI - Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

INEGI - Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). Red Nacional de Caminos. Conjunto Nacional. Aguascalientes. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551067307>

INEGI - Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, SERIE VII. Conjunto Nacional. Instituto Nacional de Estadística y Geografía Aguascalientes: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>

INEGI -Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2021), Censo de Población y Vivienda 2020. Resultados definitivos. Principales resultados por AGEB y manzana urbana 2020. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/app/scitel/Default?ev=10>

INEGI- - Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2022). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE). Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes
<https://www.inegi.org.mx/app/descarga/?ti=6>

Kampa, M. and E. Castanas (2008), "Human health effects of air pollution", *Environ Pollut* 151(2): 362-7.

Lacasana, M., A. Esplugues, et al. (2005), "Exposure to ambient air pollution and prenatal and early childhood health effects", *Eur J. Epidemiol* 20(2): 183-99.

Lai, H.K; Tsang, H; Wong, C.M. 2013. Meta-analysis of adverse health effects due to air pollution in Chinese populations. *BMC Public health*. 13.

Lepeule, J., F. Laden, D. Dockery and J. Schwartz. 2012. Chronic exposure to fine particles and mortality: an extended follow-up of the Harvard six cities study from 1974 to 2009. *Environmental Health Perspectives*. Vol 120. No 7. 965-970.

Li, W.W.; Orquiz, R; Currey, R.M.;Valenzuela, V.H.; Sarofim, A.F.; Meuzelaar, H.L.C.; Sheya, S.A.; Kelly, K.E.; Anderson. J.R.; Chow,J.C.; Watson, J.G. (2005). Experimental design, methods, and results of ambient particulate matter characterization in the Paso del Norte region. In *The U.S. – exican Border Environment: Integrated Approach to Defining Particulate Matter Issues in the Paso del Norte Region*, Currey, R.M., Kelly, K.E., Meuzelaar, H.L.C., Sarofim, A.F., Eds; San Diego State University Press: San Diego, CA, 79-112.

Lu, F; Xu, D; Cheng, Y; Dong, S; Guo, C; Jiang, X; Zheng, X. 2015. Sistematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM2.5 and PM10 pollution in the Chinese population. *Environ. Res*, 136, pp. 196-204.

Maisonet, M., A. Correa, et al. (2004), "A review of the literature on the effects of ambient air pollution on fetal growth", *Environ Res* 95(1): 106-15.

Malczewski, J., 2004. GIS-based land-use suitability analysis: A critical overview. *Prog. Plan.* 62, 3–65.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305900603000801>

Martínez, A.P., I. Romieu. 1997. Introducción al monitoreo atmosférico. ECO/GTZ/Departamento del Distrito Federal. México. 238 pp.

Mirowsky J.E., L.A. Dailey and R.B. Devlin. 2016. Differential expression of pro-inflammatory and oxidative stress mediators induced by nitrogen dioxide and ozone in primary human bronchial epithelial cells. *Inhal Toxicol.* Jul 28(8): 374-82. doi 10.1080/08958378.2016.1185199.

NOM-020-SSA1-2021, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 19 de agosto de 2014. México: Secretaría de Salud. Recuperado de:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633956&fecha=28/10/2021#gsc.tab=0

NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Valores límite permisible para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de agosto de 2014. México: Secretaría de Salud. Recuperado de:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0

NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 16 de julio de 2012. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16/07/2012#gsc.tab=0

Noll, K.E. and S. Mitsutomi. 1983. Design methodology for optimum dosage air monitoring site selection. *Atmospheric Environment*, Vol. 17, No. 12, 2583-2590.

OMS - Organización Mundial de la Salud-. (2022). WHO Global Air Quality Guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021. License: CC BY-NC-SA3.0 IGO

Orduz García, C.E., V.M. Toro y J.C. Gómez. 2013. EPOC, Bronquitis Crónica y Síntomas Respiratorios Asociados a la Contaminación por PM₁₀ en la Ciudad de Medellín (Colombia). *Revista Med* vol. 21, núm. 1, enero-junio, 2013, pp. 21-28. Universidad Militar Nueva Granada Bogotá, Colombia.

Penfold B.M., Funk T.H., and Hafner H.R. (2003) Exploring the use of suitability modeling to locate air toxics monitors in Massachusetts. Paper and presentation prepared for the ESRI International User Conference 2003, San Diego, CA, July 7-11 (STI-2388).

Pope, C. A., R. T. Burnett, M.J. Thun, E. Calle, D. Krewski, I. Kazuhiko y G.D. Thurston. 2002. Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *Journal of the American Medical Association* 287(9): 1132-1141.

Pope R & Wu J. 2014. A multi-objective assessment of an air quality monitoring network using environmental, economic, and social indicators and GIS based models, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64:6, 721-737, DOI: 10.1080/10962247.2014.888378

<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10962247.2014.888378>

PROAIRE – Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de Chihuahua 2016-2025. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología del Estado de Chihuahua y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015) Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/249574/ProAire_Chihuahua.pdf

Reyna A.M., M.E. Bravo, R. López, E.C. Nieblas and M.L. Nava. 2013. Relative risk of death from exposure to air pollutants: a short-term (2003-2007) study in Mexicali, Baja California, Mexico. *International Journal of Environmental Health Research*, 22:4, 370-386

Romano, S. P. 2000. Sintomatología respiratoria asociada a partículas menores de 10 micras (PM10) en el centro de la Ciudad de México. Instituto Nacional de Salud Pública, Morelos, México

Romieu, I., F. Meneses, J. J. L. Sienra-Monge, J. Huerta, S. R. Velasco, M. C. White, R. A. Etzel, M. Hernández-Ávila. 1995. Effects of urban air pollutants on emergency visits for childhood asthma in Mexico City. *American Journal of Epidemiology* 141: 546-553.

Romieu, I., Gouveia N, Cervantes L.A., Ponce de León A. Junger W, Hurtado-Díaz M. Miranda.Soberanis V., Vera., Strappa V., Rojas-Bracho L., Carbajal-Arroyo L., Tzintzun-Cervantes G., 2012. Muñticity Study of Air Pollution and Mortality in Latin America (The ESCLA Study). Research report 171. Health Effects Institute, Boston, MA.

Rosas, I., H. A. McCartney, R. W. Payne, C. Calderon, J. Lacey, R. Chapela, S. Ruiz-Velasco. 1998. Analysis of the relationships between environmental factors (aeroallergens, air pollution, and weather) and asthma emergency room visits to a hospital in Mexico City. *Allergy* 53: 394-401.

Samet, J. and D. Krewski (2007), "Health effects associated with exposure to ambient air pollution", *J Toxicol Environ Health A* 70(3-4): 227-42.

Samoli Evangelia, Konstantina Dimakopoulou, Dimitris Evangelopoulos, Sophia Rodopoulou, Anna Karakatsani, Lambrini Veneti, Maria Sionidou, Ioannis Tsolakoglou, Ioanna Krasanaki, Georgios Grivas, Despoina Papakosta and Klea Katsouyanni. 2016. Is Daily Exposure to Ozone Associated with Respiratory Morbidity and Lung Function in a Representative Sample of Schoolchildren? Results From a Panel Study in Greece. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 27, 346-351 (May/June 2017) | doi:10.1038/jes.2016.32.

SEDATU e IMIP (2017), Cartas Urbanas del Plan de Desarrollo Urbano Sostenible 2016. <https://www.imip.org.mx/imip/node/34>

SEMARNAT, 2023. Inventario Nacional de Emisiones 2018.

Shang, Y; Sun, Z; Cao, J; Wang, X; Zhong, L; Bi, X; Huang, W. 2013. Systematic review of Chinese studies of short-term exposure to air pollution and daily mortality. *Environ. Int.*, 54, pp. 100-111.

Sonoma Technology Inc. 2014. Ambient Air Monitoring Network Assessment of the South Saskatchewan Region. Final Report. ISBN No. 978-1-4601-1521-0. Disponible para consulta en: <https://open.alberta.ca/publications/9781460115220>

Téllez-Rojo, M. M., I. Romieu, M. Polo-Peña, S. Ruiz-Velazco, F. Meneses-González y M. Hernández- Ávila. 1997. Efecto de la contaminación ambiental sobre las consultas por infecciones respiratorias en niños de la Ciudad de México. *Salud Pública de México* 39: 513-522.

Torres-Meza, V. 2000. Acute morbidity at primary care settings and air pollution in Mexico City. Master's in sciences, National Institute of Public Health. Cuernavaca, Morelos, México.

Trujillo-Ventura, A., J.H. Ellis. 1991. Multiobjective air pollution monitoring network design. *Atmospheric Environment*, 25A (2), 469-479.

USEPA – Environmental Protection Agency 1997. Exposure factors handbook. United States Environmental Protection Agency

USEPA – Environmental Protection Agency. Exposure factors handbook. United States Environmental Protection Agency. USEPA, 40 CFR 58.10. Annual monitoring network plan and periodic network assesment. Disponible en: https://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?n=40y6.0.1.1.6#se40.6.58_110

USEPA – Environmental Protection Agency. 2007. Ambient Air Monitoring Network Assessment Guidance. Analytical Techniques for Technical Assessment of Ambient Air Monitoring Networks. Disponible para consulta en línea en: <https://www3.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/pm25/datamang/network-assessment-guidance.pdf>

Velázquez A. G. Diseño de una red de monitoreo atmosférico para la ciudad de San Luis Potosí: ubicación de nodos. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina, Universidad de San Luis Potosí, agosto de 2008.

WHO - World Health Organization-. (2006). Air quality guidelines global update 2005. Disponible en: http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf

Wigle, D. T., T. E. Arbuckle, et al. (2007), "Environmental hazards: evidence for effects on child health", J Toxicol Environ Health B Crit Rev 10(1-2): 3-39

