



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA EXPOSICIÓN
PERSONAL A OZONO EN LA CIUDAD DE MÉXICO USANDO
MONITOREO ACTIVO**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA
ANA ISAURA DÍAZ ZÚÑIGA**

**DIRECTOR DE TESIS
IVÁN YASSMANY HERNÁNDEZ PANIAGUA**



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE:	Profesor: Claudia Inés Rivera Cárdenas
VOCAL:	Profesor: José Agustín García Reynoso
SECRETARIO:	Profesor: Iván Yassmany Hernández Paniagua
1er. SUPLENTE:	Profesor: Alejandra Mendoza Campos
2° SUPLENTE:	Profesor: Gema Luz Andraca Ayala

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad Universitaria,
CDMX.

ASESOR DEL TEMA

Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua

SUSTENTANTE

Díaz Zúñiga Ana Isaura

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por el aprendizaje, herramientas y experiencias adquiridas a lo largo de la carrera que me han proporcionado habilidades para seguir creciendo como persona y como profesionista. Al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático por integrarme de la mejor manera y darme la oportunidad de enfrentar nuevos retos siempre con el apoyo de su plantilla laboral.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por el financiamiento recibido para la realización de este proyecto a través del proyecto IA205023 "Evaluación del estrés oxidante y la inflamación causada por la exposición a ozono durante condiciones episódicas y no episódicas en la Ciudad de México".

A los voluntarios por su participación y disposición durante las campañas de monitoreo que hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Ivan Yassmany Hernández Paniagua, mi asesor, por su guía y retroalimentación durante el desarrollo de este proyecto. Su vocación y compromiso me han brindado la confianza para concluir satisfactoriamente la presente investigación.

A la Dra. Gema Luz Andraca Ayala, mi supervisora técnica, por su tiempo y apoyo en el uso del laboratorio compartido de Cromatografía Líquida y la para el uso de la técnica analítica.

Al Dr. Aron Jazcilevich Diamant y la Dra. Irma Aurora Rosas Pérez por su interés y disponibilidad en el transcurso de este proyecto.

A la M. en C. María Eva Salinas Cortés y M. en C. Leticia Martínez Romero quienes ayudaron con el préstamo de la balanza analítica, siendo responsables del buen funcionamiento de esta.

A la M. en C. Bárbara Cuesta por su apoyo en la facilitación de aulas de estudio dentro de las instalaciones del ICAyCC.

A mi familia y personas más cercanas que permanecieron a mi lado durante la carrera, siempre con palabras de aliento y apoyo incondicional para seguir mis planes a futuro.

ÍNDICE

1		
2	1. RESUMEN	8
3	2. MARCO TEÓRICO	9
4	2.1 Ozono troposférico	9
5	2.2 Exposición a ozono ambiental	10
6	2.3 Monitoreo y cuantificación de ozono.....	11
7	2.3.1 Monitores de sitio fijo.....	11
8	2.3.2 Monitores personales y de microambientes.....	12
9	2.4 Parámetros de concentración de ozono ambiental.....	14
10	2.5 Normatividad de límites permisibles	15
11	2.6 Efectos a la salud por exposición	16
12	3. OBJETIVOS	19
13	3.1 Objetivo General	19
14	3.2 Objetivos Particulares	19
15	4. MÉTODOS	20
16	4.1 Diseño experimental	20
17	4.2 Descripción de zonas de muestreo	21
18	4.2.1 Ubicación del monitor zona Norte	22
19	4.2.2 Ubicación del monitor zona Sur	23
20	4.3 Descripción del equipo	24
21	4.4 Procesamiento de datos y análisis estadísticos.	25
22	5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
23	5.1 Validación de mediciones de ozono del monitor personal Aeroqual S500.	27
24	5.2 Niveles de exposición personal a ozono obtenidos por monitoreo activo.....	32
25	5.3 Comparación por semana de concentraciones de O ₃ en microambientes	35
26	5.4 Comparación con monitoreo ambiental.....	41
27	5.5 Estudios existentes de exposición personal a ozono	43
28	6. CONCLUSIONES.....	46
29	7. REFERENCIAS	48
30	8. ANEXOS	55

ÍNDICE DE TABLAS

31

32 **Tabla 1.** Nivel permisible y metas intermedias de concentración máxima promedio diario
33 de 8 horas en temporada alta de ozono. 15

34 **Tabla 2.** Nivel permisible y metas intermedias de concentración máxima promedio diario
35 de corto plazo (8 horas). 16

36 **Tabla 3.** Valores graduales para el nivel límite de ozono en el aire ambiente. 16

37 **Tabla 4.** Calendario de semanas en las que se realizaron muestreos de la exposición
38 personal a ozono en la Ciudad de México en el año 2023. 20

39 **Tabla 5.** Comparación de ecuaciones de corrección y factores de correlación para los
40 monitores Aeroqual a partir de dos tipos de modelos de regresión. 29

41 **Tabla 6.** Percentiles 5, 25, 50, 75 y 95 de las concentraciones de ozono por microambiente
42 en la zona sur y norte en las semanas de muestreo. 37

43 **Tabla 7.** Estudios existentes de exposición a ozono por monitoreo personal activo. 44

44

ÍNDICE DE FIGURAS

45		
46	Figura 1. Fotografía de equipo analizador de ozono Teledyne API T400 (2024).....	12
47	Figura 2. Efectos a nivel pulmonar de la exposición de ozono. Tomada de Corporación	
48	Universitaria de Investigación Atmosférica (UCAR, 2024).	18
49	Figura 3. Mapa de parte de la ZMVM con las localizaciones de residencias y estaciones de	
50	monitoreo ambiental cercanas.	21
51	Figura 4. Ubicación de residencia en zona norte en la ZMVM y la estación de monitoreo	
52	ambiental más cercana.	22
53	Figura 5. Ubicación de residencia en zona sur en la ZMVM y la estación de monitoreo	
54	ambiental más cercana.	23
55	Figura 6. a) Fotografía de equipo de monitoreo personal a ozono Aeroqual S500 b)	
56	Sensor de tecnología sensible al gas (GSS) (Aeroqual, 2021).	24
57	Figura 7. Correlación de datos con equipo de referencia para unidad Aeroqual 1 utilizado	
58	para la zona norte y Aeroqual 2 utilizado para la zona sur.	28
59	Figura 8. Comparación de registros de monitor personal Aeroqual (1), los corregidos	
60	mediante regresión multivariada y los del equipo de referencia Teledyne API T400.	29
61	Figura 9. Perfiles semanales de concentración de ozono para zona norte y sur de la Ciudad	
62	de México medidos por monitores Aeroqual S500.	33
63	Figura 10. Boxplot de concentraciones de ozono en microambientes para zona norte y sur	
64	en las semanas de muestreo.	36
65	Figura 11. Perfiles semanales de concentraciones promedio de ozono para la zona norte y	
66	sur medidas por el monitor personal y por las tres estaciones de monitoreo ambiental más	
67	cercanas.	41
68		
69		

1. RESUMEN

70

71 El ozono es un compuesto presente en la atmosfera, relevante en procesos de
72 oxidación dentro de la troposfera. Sin embargo, es perjudicial para los seres
73 humanos y la vegetación en la superficie terrestre, además está catalogado como un
74 gas de efecto invernadero. Por lo tanto, es importante contar con sistemas de
75 monitoreo ambiental de ozono donde se actualicen las metodologías con base en
76 nuevos conocimientos y tecnologías.

77

78 Las concentraciones de ozono troposférico en áreas urbanas son medidas a una
79 altura de 3 a 10 m y son representativas de la exposición a nivel poblacional. No
80 obstante, dicha exposición puede ser diferente significativamente de la exposición
81 personal dependiendo de los patrones de actividad y tiempos de permanencia
82 intramuros/extramuros.

83

84 En el presente proyecto se analizó la exposición continua a ozono de residentes de
85 las zonas norte y sur de la Ciudad de México mediante monitores personales de alta
86 resolución (1-min). Se eligieron estas dos zonas debido a la disponibilidad de
87 equipos y con el fin de estudiar la exposición a ozono en puntos opuestos de la
88 ciudad. Por ser de reciente adquisición, se revisó extensamente el funcionamiento
89 de ambos sensores y se realizaron validaciones de sus registros.

90

91 El análisis de la exposición personal a ozono durante las campañas semanales de
92 muestreo se realizó mediante series de tiempo, cuantificación de niveles de ozono
93 en microambientes interiores y exteriores y comparaciones con registros de
94 estaciones de monitoreo ambiental.

95

2. MARCO TEÓRICO

96

97

98 **2.1 Ozono troposférico**

99 La molécula de ozono está compuesta por tres átomos de oxígeno (O_3). Su formación
100 se da a partir de la reacción entre una molécula diatómica de oxígeno (O_2) y un
101 átomo de oxígeno (O) el cual es altamente reactivo, además ocurre en presencia de
102 una tercera molécula que pueda absorber el calor de la reacción (Zhang et al., 2019).

103

104 El ozono troposférico es considerado un contaminante atmosférico ya que al
105 contacto con la superficie puede causar daños en los materiales, ecosistemas, células
106 y órganos de humanos, animales y plantas. Su producción se da a partir de las
107 reacciones fotoquímicas de óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos
108 volátiles (COV) con la radiación ultravioleta proveniente del Sol (CEC, 2008).

109

110 La acumulación de ozono en la atmósfera ocurre cuando el ciclo de reacciones de
111 fotólisis y regeneración de NO_2 se ve alterado por la presencia de COVs y/o
112 monóxido de carbono (CO). La competencia entre reacciones se debe a que existen
113 más especies que producen radicales libres que reaccionan con el monóxido de
114 nitrógeno (NO), la especie intermediaria.

115

116 Las especies precursoras de ozono provienen de fuentes antropogénicas y naturales.
117 En el primer grupo se encuentran los vapores de gasolina, escapes de automóviles,
118 combustión de biomasa, el uso de solventes industriales, así como el uso de
119 productos de limpieza, pesticidas y adhesivos, los cuales ya son una fuente urbana
120 importante de COV según estudios recientes (McDonald et al., 2018).

121

122 Las fuentes naturales incluyen a las emisiones de COVs como el isopreno por parte
123 de la vegetación e incendios forestales.

124

125 De acuerdo con su mecanismo de formación, existen elevadas concentraciones de
126 ozono en ciudades donde las emisiones antropogénicas de COVs, NO_x y CO son
127 abundantes. La formación de óxidos de nitrógeno (NO_x), como especie precursora
128 del ozono, es favorecida por las altas temperaturas, combustión de combustibles
129 fósiles utilizados a nivel mundial en la generación de electricidad, transportación,
130 calentamiento, cocinar, entre otras.

131

132 **2.2 Exposición a ozono ambiental**

133 La exposición se refiere al contacto entre la interfase del sistema respiratorio con la
134 concentración de un contaminante específico durante un periodo de tiempo
135 determinado dentro de una o múltiples locaciones. Se les denomina microambientes
136 a las locaciones o lugares donde ocurre la exposición. Por lo tanto, se analiza la
137 exposición diaria de un individuo como la integración en el tiempo de
138 concentraciones en cada microambiente visitado en el transcurso del día.

139 Existen microambientes interiores, definidos como cualquier edificio (casa, oficina,
140 escuela, restaurantes, cines, etc.) y transporte cerrado (automóvil, autobús, tren); y
141 exteriores (parques, patios, avenidas, calles, banquetas) así como el transportarse en
142 bicicleta o motocicleta (Wilson et al., 2000).

143

144 Los contaminantes atmosféricos pueden ingresar en espacios interiores donde, junto
145 con la contaminación generada por fuentes intramuros, conforma la concentración
146 total medible en microambientes intramuros. Entonces, la exposición total a nivel

147 personal a ozono es aquella que considera las concentraciones de ozono presentes
148 tanto en exteriores como en interiores.

149

150 Entre los factores que tienen influencia sobre la exposición personal se encuentran:

- 151 ● El tiempo-actividad en diferentes microambientes
- 152 ● Condiciones climáticas
- 153 ● Características de los microambientes intramuros (por ejemplo, la apertura de
154 ventanas, uso de aire acondicionado, las corrientes de aire)
- 155 ● Concentraciones ambientales de NO_x provenientes de combustión
156 incompleta (EPA, 2020).

157

158 **2.3 Monitoreo y cuantificación de ozono**

159 Para elaborar modelos que describan el comportamiento del ozono en la atmósfera,
160 se deben considerar los aspectos químicos y físicos conocidos de este contaminante.

161 En su mayoría, se construyen a partir del análisis de datos observacionales,
162 evaluaciones de predicción de registros pasados, normatividad y pronósticos de
163 fenómenos a través de diferentes escalas espaciotemporales (Monks et al., 2015).

164 Es a través de un seguimiento continuo y sistemático que se lleva a cabo el proceso
165 de recolección de datos. De esta manera, el monitoreo de un contaminante permite
166 evaluar e identificar cuantitativamente su comportamiento a partir de los registros
167 obtenidos.

168 **2.3.1 Monitores de sitio fijo**

169 En el caso del ozono, existen diferentes monitores utilizados en su mayoría dentro
170 de las redes de monitoreo ambiental, llamados de sitio fijo. Estos equipos realizan
171 su análisis con base en principios de fotometría de absorción ultravioleta (Fig. 1) o
172 de quimioluminiscencia. Dentro de sus ventajas se reconoce que proporcionan

173 aproximaciones aceptables para determinar concentraciones a nivel aire ambiente
174 en los casos que la variabilidad espacial de ozono es baja. Por lo tanto, es sencillo
175 asignar valores de exposición dentro de estudios poblacionales, además poseen
176 disponibilidad de años de registros que ayudan a establecer tendencias.
177



178 **Figura 1.** Fotografía de equipo analizador de ozono Teledyne API T400 (2024).
179

180 Sus limitaciones incluyen el carecer de datos que consideren la variabilidad espacial
181 del ozono, ya que, típicamente las tomas de muestra de las estaciones se encuentran
182 a un nivel de altura diferente al de la superficie agregando incertidumbre a los
183 estudios que sólo utilizan este tipo de equipos. Ollison et al. (2013) reportó que los
184 monitores que analizan ultravioleta presentan sobreestimaciones cuando están en
185 presencia de altas concentraciones de compuestos orgánicos volátiles, mercurio y
186 de humedad, siendo esta última condición la de menor interferencia en los registros.
187

188 **2.3.2 Monitores personales y de microambientes**

189 Debido a que los equipos de monitoreo fijo poseen un alcance limitado en la
190 cobertura de zonas de medición, así como alto costos de adquisición y manejo, se
191 han desarrollado monitores con diversos funcionamientos que buscan registrar la
192 exposición a contaminantes en zonas locales y a nivel personal. Inicialmente se

193 elaboraron dispositivos de monitoreo pasivo los cuales proporcionan resultados de
194 concentración integrada de ozono.

195

196 El principio utilizado en algunos dispositivos es la cuantificación indirecta de ozono.
197 Mediante filtros recubiertos con nitrito, se cuantifica la conversión de éste a nitrato
198 como proporcional a la cantidad de ozono al que fue expuesto durante periodos de
199 24 horas o hasta una semana. Debido a su método de promedios de tiempo, los
200 dispositivos pasivos no reportan cuando ocurren los picos de exposición máxima.

201

202 Es en años más recientes donde se han desarrollado microsensores que utilizan
203 tecnología con principios en electroquímica, fotoionización, óptica y resistencia de
204 óxidos metálicos para obtener datos de monitoreo de partículas atmosféricas y gases
205 (Clements et al., 2017). A comparación de los equipos de referencia, su costo de
206 adquisición es bastante menor, por lo que también son llamados de bajo costo. Son
207 considerados una herramienta útil en campos como la investigación académica y la
208 vigilancia reglamentaria para usuarios particulares, gobiernos y empresas (WMO,
209 2021).

210

211 En el caso de los monitores continuos empleados en microambientes, se ha
212 demostrado que tienen baja desviación y factores de correlación mayores a 0.8
213 referenciados a los equipos respaldados por la Agencia de Protección Ambiental
214 (Sagona et al., 2018).

215

216 El factor que incide en la reducción del sesgo en los equipos de monitoreo continuo
217 de bajo costo es el método en que los registros son analizados. Es común que este
218 tipo de equipos presenten desviaciones en sus lecturas al exponerse en exteriores,

219 por lo que se ha reportado (Zimmerman et al., 2018) que se puede corregir este error
220 a partir de determinar concentraciones de ozono predecidas a partir de condiciones
221 de temperatura, humeada relativa y concentraciones cercanas medidas en redes
222 ambientales para los sitios monitoreados.

223

224 **2.4 Parámetros de concentración de ozono ambiental**

225 De manera general las mediciones de ozono son expresadas en términos de relación
226 o razón de mezcla de volúmenes en unidades de partes por millón (ppm) o partes
227 por billón (ppb). Estrictamente no son reconocidas como unidades de concentración
228 dentro de disciplinas como la ciencia atmosférica y la química. Sin embargo, para
229 evaluaciones ecológicas y a nivel salud, el término concentración se interpreta como
230 cantidad de sustancia dentro de un fluido.

231

232 También se pueden encontrar mediciones de concentración expresadas en
233 miligramos por metro cúbico (mg/m^3). Para el ozono, la equivalencia reportada es
234 que 1 ppm equivale a $1.960 \text{ mg}/\text{m}^3$ a 25°C y 1 atmósfera (SALUD, 2021).

235 La terminología de "concentración de ozono" es utilizada en la mayoría de las
236 discusiones y directrices que reportan los efectos de este contaminante.

237

238 Las métricas de calidad de aire a corto plazo más utilizadas para estudios
239 epidemiológicos son el promedio máximo diario por 1 hora, promedio máximo
240 diario por 8 horas y el promedio diario por 24 horas. En el caso de las métricas para
241 análisis a largo plazo, se emplean los promedios por mes o por temporada de los
242 máximos diarios antes mencionados. Asimismo, se usan estos registros horarios en
243 periodos amplios de tiempo para evaluaciones de modelos atmosféricos (EPA, 2020).

244

245 **2.5 Normatividad de límites permisibles**

246 Las Directrices para la Calidad Global del Aire (AGQ en sus siglas en inglés), de la
247 Organización Mundial de la Salud (OMS) plantean el nivel permisible de ozono a
248 largo plazo para la temporada alta, de $60 \mu\text{g m}^{-3}$, tomando en cuenta la mortalidad
249 no accidental y la mortalidad respiratoria. Con el objetivo de reducir de manera
250 gradual los niveles de ozono, se proponen 100 y $70 \mu\text{g m}^{-3}$ como metas intermedias
251 a cubrir en las condiciones mencionadas (Tabla 1).

252

253 Se define a la temporada de ozono como los seis meses consecutivos del año con el
254 promedio móvil de ozono más alto. Para regiones alejadas del ecuador, este periodo
255 corresponde a la época de temperaturas secas calientes del año en el caso del
256 hemisferio norte.

257

258 **Tabla 1.** Nivel permisible y metas intermedias de concentración máxima promedio
259 diario de 8 horas en temporada alta de ozono.

Recomendación	O₃ (mg/m³)
Meta intermedia	100
Meta intermedia	70
Nivel permisible AQG	60

260 Tomada de: Directrices para la Calidad Global del Aire (OMS, 2021).

261

262 La recomendación como límite permisible para la concentración máxima diaria a
263 corto plazo (media de 8 horas) es de $100 \mu\text{g m}^{-3}$. Este valor es correspondiente al
264 percentil 99 (3-4 días de excedencia por año) de la distribución anual de
265 concentraciones máximas promedio de 8 horas (Tabla 2).

266 **Tabla 2.** Nivel permisible y metas intermedias de concentración máxima promedio
 267 diario de corto plazo (8 horas).

Recomendación	O₃ (mg/m³)
Meta intermedia	160
Meta intermedia	120
Nivel permisible AQG	100

268 Tomada de: Directrices para la Calidad Global del Aire (OMS, 2021).

269

270 En México la Norma Oficial Mexicana 020-SSA1-2021 es la que indica el valor límite
 271 permisible correspondiente al plazo de 8 horas para el ozono ambiental. A partir de
 272 la actualización de los valores recomendados por la OMS en 2021, la norma también
 273 cambió el valor límite indicado inicialmente en el año de su publicación en 2014
 274 pasando de 137 µg/m³ a 100 µg/m³ con valores graduales para los siguientes 5 años
 275 desde su publicación (Tabla 3).

276

277 **Tabla 3.** Valores graduales para el nivel límite de ozono en el aire ambiente.

Concentración	Año 1		Año 3		Año 5	
De 1 hora	176 µg/m ³	0.090 ppm	176 µg/m ³	0.090 ppm	176 µg/m ³	0.090 ppm
De 8 horas	127 µg/m ³	0.065 ppm	118 µg/m ³	0.060 ppm	100 µg/m ³	0.051 ppm

278 Tomada de: NOM-020-SSA1-2021 (SALUD, 2021).

279

280

281 **2.6 Efectos a la salud por exposición**

282 Debido a que el ozono posee características como ser un gas de baja solubilidad en
 283 agua, oxidante y con alta reactividad, se considera que la exposición a este
 284 contaminante se da casi exclusivamente por inhalación. Se han reportado efectos en
 285 células epiteliales del conducto lagrimal de personas expuestas a niveles ambientales
 286 de ozono y en capas superiores de la dermis en animales expuestos a altas

287 concentraciones de ozono (Nuvolone et al., 2017). Sin embargo, existe mayor interés
288 en los efectos al sistema respiratorio asociados directamente con este gas para
289 establecer las bases reguladoras en materia de exposición a ozono dentro de las
290 ciudades.

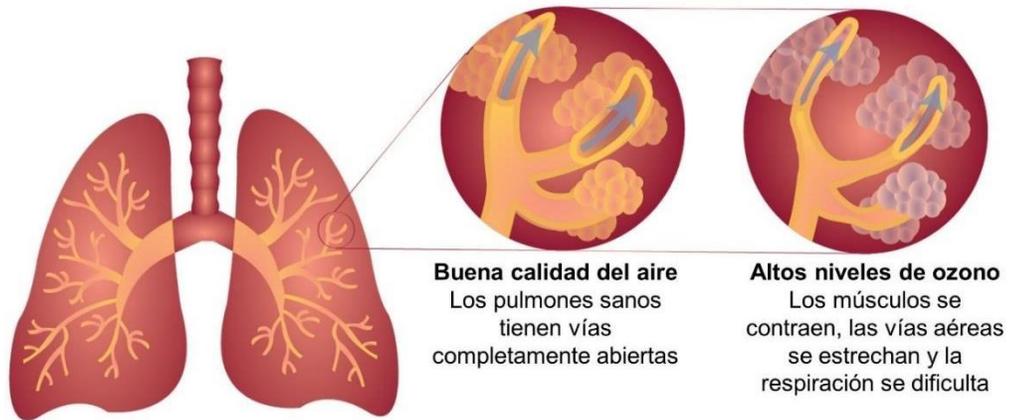
291

292 A través de la inhalación, el ozono reacciona con lípidos, proteínas y antioxidantes
293 presentes en el líquido de revestimiento epitelial de las vías respiratorias. El cuerpo
294 humano induce respuestas endocrinas, inmunes e inflamatorias a niveles celular, en
295 tejidos y órganos como respuesta fisiológica inicial a la exposición a ozono. De
296 acuerdo con evidencia reciente (Zanobetti y Schwartz, 2011; Koman y Mancuso,
297 2017), establecen que el ozono posee efectos directos en el sistema respiratorio
298 principalmente.

299

300 Por otro lado, las afectaciones metabólicas, cardiovasculares, reproductivas y al
301 sistema nervioso en la población humana siguen siendo estudiadas y analizadas para
302 relacionar evidencias con la exposición a ozono a corto y largo plazo (EPA, 2020). En
303 la población en general, el ozono puede provocar dificultad para respirar, dolor al
304 inspirar profundamente, tos, irritación en la garganta e inflamación de las vías
305 respiratorias (Fig. 2). Estos efectos adversos pueden agravar el estado de salud de la
306 población que padece enfermedades pulmonares como asma, enfisema y la
307 enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). En niños, como otro sector
308 vulnerable, el riesgo de padecer los síntomas mencionados aumenta, ya que su dosis
309 de inhalación por masa corporal es mayor y sus pulmones siguen en desarrollo
310 (Zhang et al., 2019).

311



312

313 **Figura 2.** Efectos a nivel pulmonar de la exposición de ozono. Tomada de
314 Corporación Universitaria de Investigación Atmosférica (UCAR, 2024).

315

316 Debido a las limitaciones metodológicas y poco desarrollo de estudios sobre los
317 efectos crónicos (largo plazo) por exposición a ozono, existen resultados que
318 solamente comprueban una relación directa con el agravamiento de los síntomas
319 del asma. Los factores que influyen en la variabilidad del impacto a la salud por
320 exposición a ozono pueden ser tanto biológicos como externos al individuo. Estos
321 pueden ser la edad, el género, la actividad física, padecimientos pulmonares previos,
322 entre otros y serán determinantes para asociar la susceptibilidad al ozono (Nuvolone
323 et al., 2017). Estudios recientes (Zanobetti y Schwartz, 2011; Di et al., 2017; Turner et
324 al., 2016) sugieren que pueden existir alteraciones en la mortalidad respiratoria y
325 cardiorrespiratoria en personas con predisposición a enfermedades como
326 consecuencia de la exposición a largo plazo.

327

3. OBJETIVOS

328

3.1 Objetivo General

329

330 Determinar la exposición personal a ozono troposférico de residentes de la Ciudad
331 de México mediante monitoreo personal de alta resolución temporal para identificar
332 variaciones espaciales y temporales causadas por el tránsito por microambientes en
333 comparación con monitoreo fijo.

334

3.2 Objetivos Particulares

335

336 i. Analizar la exposición personal a ozono que experimentan individuos de la
337 Ciudad de México mediante monitores de alta resolución temporal (1-min) durante
338 actividades diarias.

339

340 ii. Identificar las variaciones de exposición a ozono en ambientes intra y
341 extramuros a través del seguimiento de las actividades diarias de los individuos
342 monitoreados.

343

344

345 iii. Comparar valores de exposición diaria a ozono, obtenidas tanto por
346 monitoreo personal a nivel de superficie como por monitoreo de sitio fijo medido a
347 10 m de altura.

348

349 iv. Identificar los periodos donde existen eventos de mayor exposición personal
350 a ozono dentro de la temporada seca caliente.

351

352

353

4. MÉTODOS

4.1 Diseño experimental

Se seleccionaron dos voluntarios para analizar su exposición a ozono durante 4 semanas dentro de la temporada seca-caliente y una semana en temporada seca-fría de la Ciudad de México. Con la finalidad de comparar la exposición personal en dos zonas de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), los voluntarios pertenecen a Tlalnepantla de Baz (Norte) y Coyoacán (Sur).

Durante el monitoreo de los niveles de concentración de ozono, se llevó a cabo la elaboración de bitácoras de registro que detallaban los microambientes visitados por cada monitor durante cada semana de muestreo. En la bitácora anotaron el tiempo de permanencia en cada microambiente siendo entre extramuros (traslados a pie, patios, parques, jardines, terrazas, entre otros) e intramuros (residencia, escuela, transporte, gimnasio). Se solicitaron este tipo de registros con el objetivo de relacionar la concentración de ozono registrada por el equipo con cada microambiente. La Tabla 4 presenta los días que abarcaron las campañas semanales de muestreo.

Tabla 4. Calendario de semanas en las que se realizaron muestreos de la exposición personal a ozono en la Ciudad de México en el año 2023.

Semana	Fecha	Duración
1	6 – 10 marzo	5 días
2	24 – 27 abril	4 días
3	1 – 4 mayo	4 días
4	8 – 12 mayo	5 días
5	6 – 10 noviembre	5 días

375 Durante cada semana de muestreo, los voluntarios encendieron el equipo al
376 despertar. Durante sus actividades, llevaban consigo el equipo en una mochila
377 específica diseñada para tal fin manteniendo el cabezal del sensor expuesto. El
378 equipo era pagado después de las 10 p.m. para su recarga completa durante la
379 noche. En casos donde la permanencia en una habitación fuera mayor a 3 horas y no
380 hubiese cambio en la lectura de 0.000 ppm, el equipo era pausado para ahorro de
381 batería.

382 **4.2 Descripción de zonas de muestreo**

383 El proyecto se llevó a cabo escogiendo a dos voluntarios residentes de zonas
384 opuestas de la ZMVM (Fig. 3), con el fin de los perfiles de exposición a ozono a nivel
385 personal que ocurre durante trayectos, uso de transportes y rutinas diferentes.



386

387 **Figura 3.** Mapa de parte de la ZMVM con las localizaciones de los monitores y
388 estaciones de monitoreo ambiental cercanas.

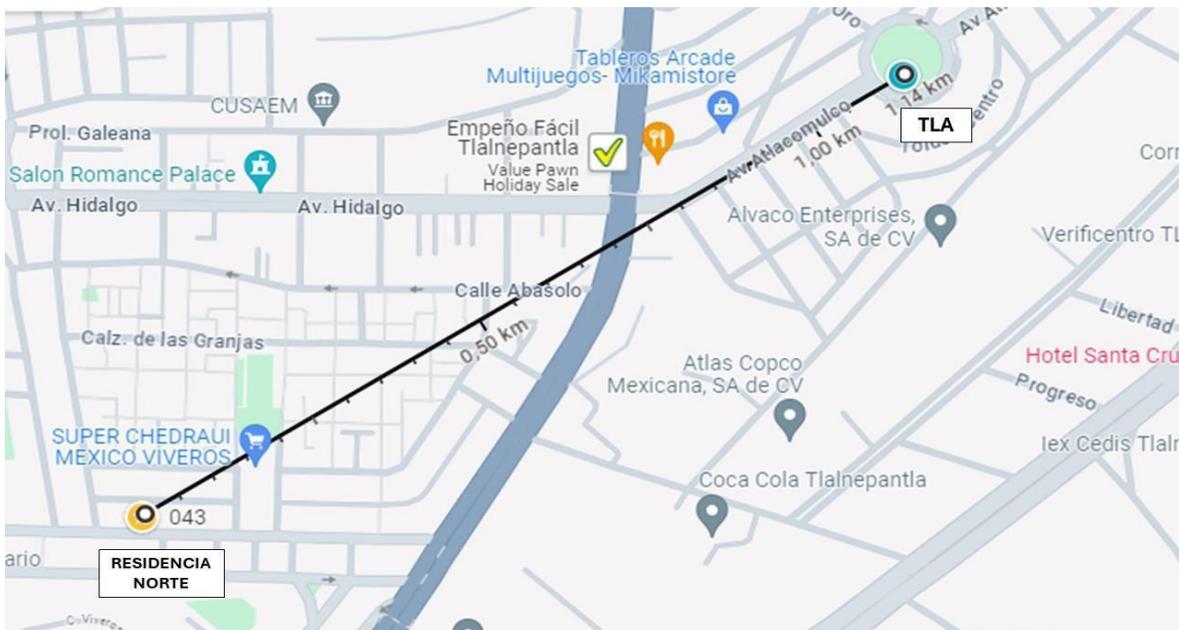
389 En sus patrones de actividad, los monitores permanecen en varios espacios
390 extramuros e intramuros, siendo la casa el lugar más determinante en los tiempos
391 de residencia en intramuros y en las áreas cercanas.

392

393 **4.2.1 Ubicación de residencia en zona Norte**

394 Se encuentra en la colonia Adolfo López Mateos del municipio de Tlanepantla de
395 Baz, Estado de México. La colonia colinda con las alcaldías Azcapotzalco y Gustavo
396 A. Madero de la Ciudad de México. En el área cercana a la localización de la
397 residencia se encuentran zonas habitacionales y de comercios, además de la avenida
398 Dr. Gustavo Baz que la separa de una zona industrial. La estación de monitoreo
399 ambiental más cercana perteneciente a la Red Automática de Monitoreo Atmosférico
400 (RAMA) es Tlanepantla (TLA) que se encuentra a 1.14 km de la vivienda (Fig. 4).

401



402

403 **Figura 4.** Ubicación del monitor zona norte en la ZMVM y la estación de monitoreo
404 ambiental más cercana.

405

406 **4.2.2 Ubicación de residencia en zona Sur**

407 Se encuentra en la colonia Espartaco de la alcaldía Coyoacán en Ciudad de México.

408 En la cercanía se encuentran las avenidas División del Norte, Calzada de Tlalpan y

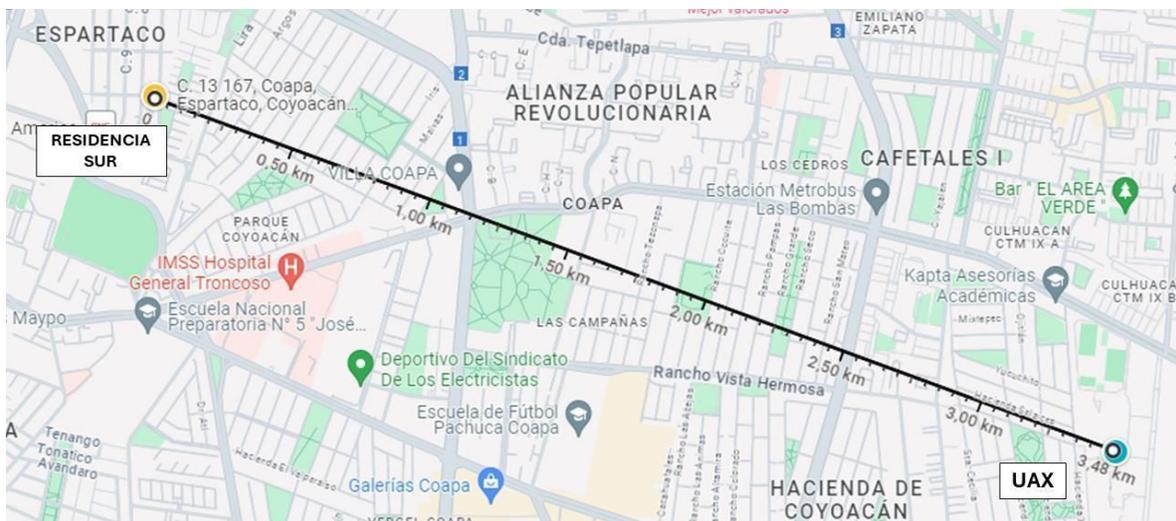
409 Canal de Miramontes. El área es de zona habitacional y de comercios. La estación de

410 monitoreo ambiental más cerca perteneciente a la RAMA es la que se encuentra en

411 las instalaciones de la Universidad Autónoma de México plantel Xochimilco (UAX) a

412 una distancia de 3.48 km de la vivienda (Fig. 5).

413



414

415 **Figura 5.** Ubicación del monitor zona sur en la ZMVM y la estación de monitoreo
416 ambiental más cercana.

417 .

418

419

420

421

422

423

424

425

426

427

428

429

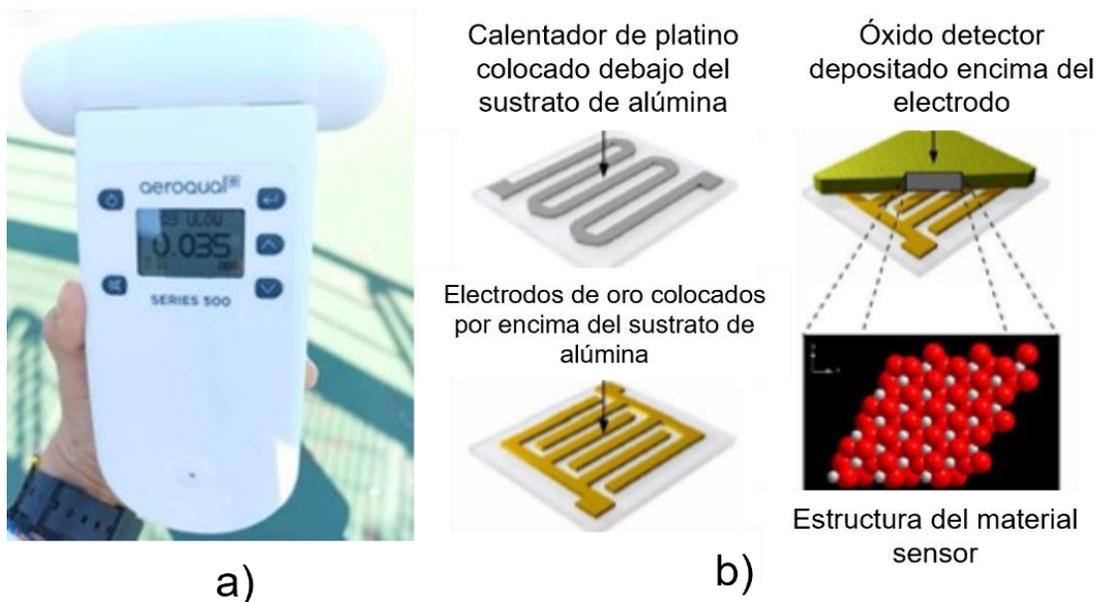
430

431 4.3 Descripción del equipo

432 El equipo de medición de concentración de ozono Aeroqual Series 500 (Fig. 6)
433 consiste en dos piezas: datalogger y el sensor de cabezal. El monitor funciona con
434 una pila recargable de litio de 11.1 V. Cuenta con una pantalla y botones para
435 configurar fecha, hora, resolución de la medición, unidades entre otras funciones.
436 Las mediciones de concentración de ozono son proporcionadas mediante la
437 tecnología del sensor que posee un material semiconductor sensible al gas (GSS).
438 Su funcionamiento consiste en utilizar la relación entre la concentración de un gas
439 al que es expuesto un óxido metálico y el cambio en la resistencia eléctrica que
440 ocurre en el material. Este cambio en la resistencia se produce debido a la ganancia
441 o pérdida de especies de oxígeno en la superficie del metal como consecuencia de
442 la reacción de estas especies con el gas a medir.

443

444



445

446 **Figura 6.** a) Fotografía de equipo de monitoreo personal a ozono Aeroqual S500
447 b) Sensor de tecnología sensible al gas (GSS) (Aeroqual, 2021).

448 En el caso del ozono, al ser un gas oxidante, produce un aumento en la concentración
449 de oxígeno, generando menos electrones de banda de conducción y por lo tanto
450 mayor resistencia en el material (Aeroqual, 2021). El arreglo donde se encuentra
451 depositado el óxido metálico consiste en una placa de alúmina como base, en la
452 parte inferior un calentador de platino y en la parte superior electrodos de oro (Fig.
453 5b).

454

455 **4.4 Procesamiento de datos y análisis estadísticos.**

456 Las bases de datos obtenidas durante las diferentes campañas de muestreo se
457 descargaron en archivos *.csv usando el software Aeroqual Series 500 versión 6.6
458 proporcionado por la empresa fabricante. En estos archivos, además de los registros
459 de concentración de ozono, también se obtuvieron los datos de fecha y hora, junto
460 con el identificador correspondiente a cada equipo. Utilizando el programa Excel
461 versión 2403 de Microsoft 360 con la finalidad de continuar el tratamiento de los
462 archivos de valores en formato de hoja de cálculo, se realizó una revisión visual a las
463 tablas de datos para identificar la presencia de datos inconsistentes. Para descartar
464 datos no consistentes con los perfiles de muestreo se realizaron inspecciones
465 visuales y posterior depuración.

466

467 El procedimiento para la depuración de datos consistió en determinar el promedio
468 de la lectura anterior y posterior para cada medición de 1-min. Después se obtuvo
469 la diferencia entre este promedio y el valor de la medición para finalmente aplicar el
470 criterio que, si el resultado de la diferencia era mayor a 5 ppb, la medición era
471 descartada. El valor de 5 ppb corresponde a la precisión reportada de ± 5 ppb para
472 cada monitor personal de ozono (Aeroqual, 2022). En total se descartó menos del
473 10% del total de mediciones obtenidas durante todas las campañas de medición.

474

475 Se empleó el software R versión 4.3.3 para realizar la representación de las series de
476 tiempo de las concentraciones de ozono registradas en cada semana de monitoreo
477 utilizando la base de datos depurada. También se realizaron análisis de distribución
478 de datos usando gráficas de cajas y bigotes mediante el paquete ggplot2 versión
479 4.3.0. Para realizar el análisis estadístico, se compararon los percentiles 5, 25, 50, 75
480 y 95 de los registros de concentración de ozono por microambiente; lo anterior para
481 las cinco semanas de monitoreo en ambas zonas. Finalmente, utilizando el mismo
482 software, se elaboraron perfiles de concentración de ozono promedio para cada hora
483 a partir de los registros de los monitores personales y registros de las tres estaciones
484 de monitoreo ambiental más cercanas a las residencias de ambas zonas. Esta
485 comparación no se realizó para la semana del 6 al 10 de noviembre del 2023 ya que
486 los registros ambientales de ese periodo no están disponibles al momento de la
487 elaboración del presente trabajo.
488

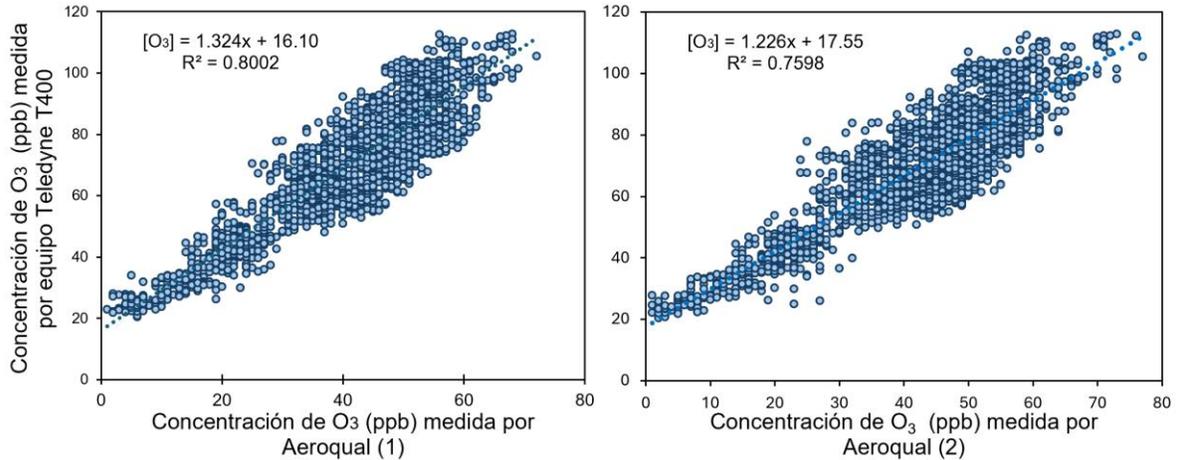
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Validación de mediciones de ozono del monitor personal Aeroqual S500.

Para validar los registros obtenidos con los equipos personales Aeroqual, se colocaron los dos monitores personales en el techo del Instituto de Ciencias de la Atmosfera y Cambio Climático (ICCAyC) donde se encuentra un equipo de referencia fotométrico de ultravioleta, perteneciente al Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, marca Teledyne API T400. Los monitores personales registraron datos con una resolución por minuto durante un periodo total de 10 horas en 5 días (2333 datos), y posteriormente fueron comparados con los correspondientes registrados por el equipo de referencia.

Para validar los registros de los monitores personales, se realizaron dos tipos de comparación contra el monitor de referencia: i) una regresión lineal entre los datos obtenidos con los monitores personales y el equipo de referencia, y ii) un análisis de regresión multivariable usando los datos meteorológicos registrados por la red de monitoreo ambiental correspondientes a los horarios de las mediciones de ozono.

Se aplicó el ajuste lineal al relacionar las mediciones de concentración de ozono de cada equipo personal y el de referencia. Se obtuvieron las ecuaciones de la recta del tipo $y = m x + b$, donde b corresponde a la ordenada al origen y su interpretación es discutida más adelante (Fig. 7).



515

516 **Figura 7.** Correlación de datos con equipo de referencia para unidad Aeroqual 1
 517 utilizado por el monitor zona norte y Aeroqual 2 utilizado por el monitor zona sur.

518

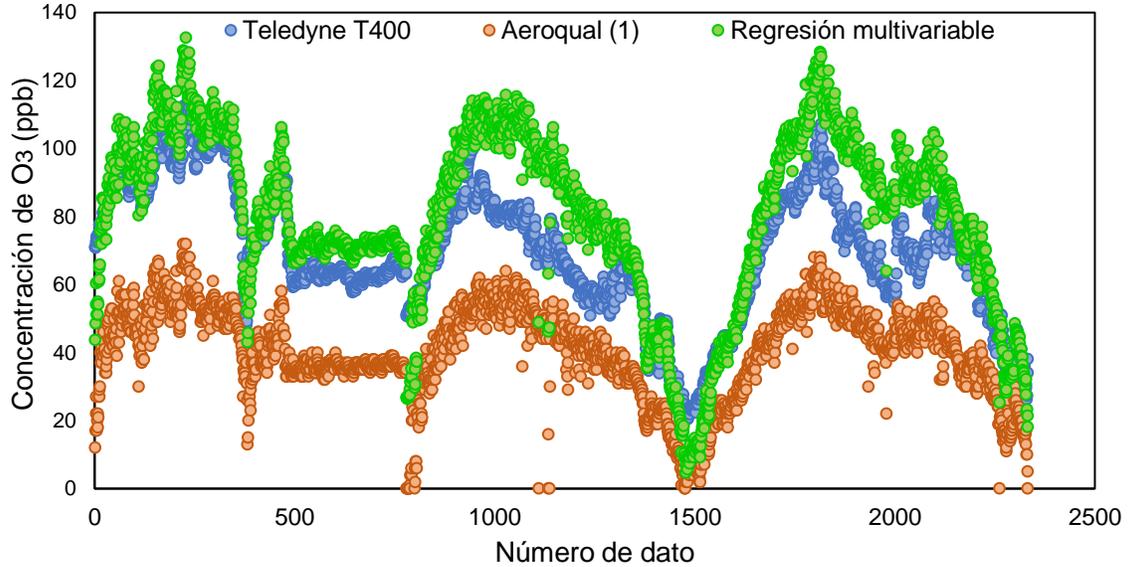
519 Para la regresión multivariable, se consideraron los valores de 1-min
 520 correspondientes a las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa,
 521 velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica, radiación, milímetros
 522 de lluvia total y máximo en dirección del viento. Los resultados de la primera
 523 evaluación estadística indicaron que las variables a considerar en el modelo de
 524 regresión son los promedios de temperatura, humedad relativa, radiación y la
 525 concentración de ozono ambiental de acuerdo con el criterio de significancia
 526 ($p < 0.05$). Por lo tanto, se llevó a cabo una segunda evaluación con las variables
 527 mencionadas para obtener los valores de los coeficientes de la ecuación
 528 multivariable correspondiente a cada monitor personal.

529

530 Al aplicar la ecuación correspondiente, se elaboraron gráficas como la Figura 8
 531 donde se visualizó el ajuste resultante que presentaron los datos del equipo
 532 Aeroqual con los registros del equipo de referencia. De acuerdo con los factores R^2
 533 de la Tabla 5, se observa que la correlación de los datos es mayor al aplicar el ajuste
 534 multivariable que con el ajuste lineal simple para ambos equipos. Sin embargo, la

535 diferencia entre los valores de este factor para ambos modelos es del orden de
 536 centésimas, es decir no significativa ($p > 0.05$).

537



538

539 **Figura 8.** Comparación de registros de monitor personal Aeroqual (1), los corregidos
 540 mediante regresión multivariada y los del equipo de referencia Teledyne API T400.

541

542 **Tabla 5.** Comparación de ecuaciones de corrección y factores de correlación para
 543 los monitores Aeroqual a partir de dos tipos de modelos de regresión.

Modelo de regresión lineal simple		
Equipo	Ecuación	Factor R ²
Aeroqual 1	$[O_3] = 1.324[O_3]_{AQ} + 16.10$	0.8002
Aeroqual 2	$[O_3] = 1.226[O_3]_{AQ} + 17.55$	0.7598
Modelo de regresión multivariable		
Equipo	Ecuación	Factor R ²
Aeroqual 1	$[O_3] = [O_3]_{AQ} + 1.23\bar{T} - 0.19\bar{HR} + 0.0013\bar{R} + 0.54[O_3]_{RAMA} - 26.98$	0.8393
Aeroqual 2	$[O_3] = [O_3]_{AQ} + 2.62\bar{T} - 0.14\bar{HR} + 0.0022\bar{R} + 0.53[O_3]_{RAMA} - 70.17$	0.7953

544

545 Donde $[O_3]_{AQ}$: concentración de ozono medida con Aeroqual; $[O_3]_{RAMA}$: concentración ambiental de
 546 ozono por RAMA; \bar{T} : temperatura promedio; \bar{HR} : humedad relativa promedio; \bar{R} : radiación promedio.

547

548

549 El uso del modelo multivariable implica realizar mediciones de las variables
550 meteorológicas para cada registro de concentración de ozono. Debido a las
551 limitaciones de equipo de uso personal capaz de medir temperatura, humedad
552 relativa y radiación con alta resolución (1-min), así como la dificultad práctica que
553 implica utilizar varios equipos personales durante las actividades diarias, se aplicaron
554 las ecuaciones de regresión lineal simple únicamente en función de la concentración
555 de ozono ambiental como ajuste de los datos de los monitores personales.

556

557 Los valores de la ordenada al origen en la ecuación de la recta del ajuste lineal
558 corresponden al *offset* o desfase de cada equipo personal con respecto al registro
559 del equipo de la red ambiental. En el caso del monitor Aeroqual 1 el valor es de 16.1
560 ppb mientras que para el monitor Aeroqual 2 es 17.5 ppb (Fig. 7). Este offset se
561 determinó con respecto a un equipo de referencia con un principio de
562 funcionamiento de fotometría UV.

563

564 El fabricante reporta en el manual que por calibración de fábrica el equipo tiene una
565 precisión $< \pm 5$ ppb. En Edimburgo, Reino Unido, Lin et al. (2014) desarrolló un estudio
566 de evaluación de equipos Aeroqual para medición de ozono y de dióxido de
567 nitrógeno, obteniendo un offset negativo de $6.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$, equivalentes a 3.40 ppb,
568 mediante un ajuste lineal de concentraciones de ozono con respecto a un equipo de
569 referencia de absorción UV. Este estudio es comparable con el presente proyecto a
570 pesar de la diferencia de unidades utilizadas para expresar la concentración de ozono
571 en su ajuste lineal. Los valores de la pendiente, por ejemplo, son adimensionales en
572 este caso, ya que las unidades de los ejes X y Y utilizan las mismas unidades de
573 concentración de ozono y al determinar la pendiente se anulan. El desarrollo de este
574 cálculo se encuentra en el Anexo I.

575 La diferencia en el funcionamiento que presentan los monitores, de acuerdo con el
576 fabricante, se puede atribuir a la reactividad del ozono y sus gradientes en
577 concentración.

578 Las mediciones menores a 200 ppb son más susceptibles a ser modificadas debido
579 a las reacciones con compuestos orgánicos y superficies, así como a la variación de
580 concentración de ozono por las corrientes de aire (Aeroqual, 2022).

581

582 Es posible que haya ocurrido lo anterior debido a que los monitores midieron
583 durante horas al aire libre en la Ciudad de México, donde existen condiciones
584 meteorológicas y de contaminación urbana diferentes a las de Edimburgo donde se
585 reportó un desfase y offset menor en los monitores Aeroqual. Además, el fabricante
586 también reporta que los registros se pueden modificar al tener un impedimento
587 físico por la acumulación de partículas de polvo en la malla de acero que posee la
588 entrada del sensor.

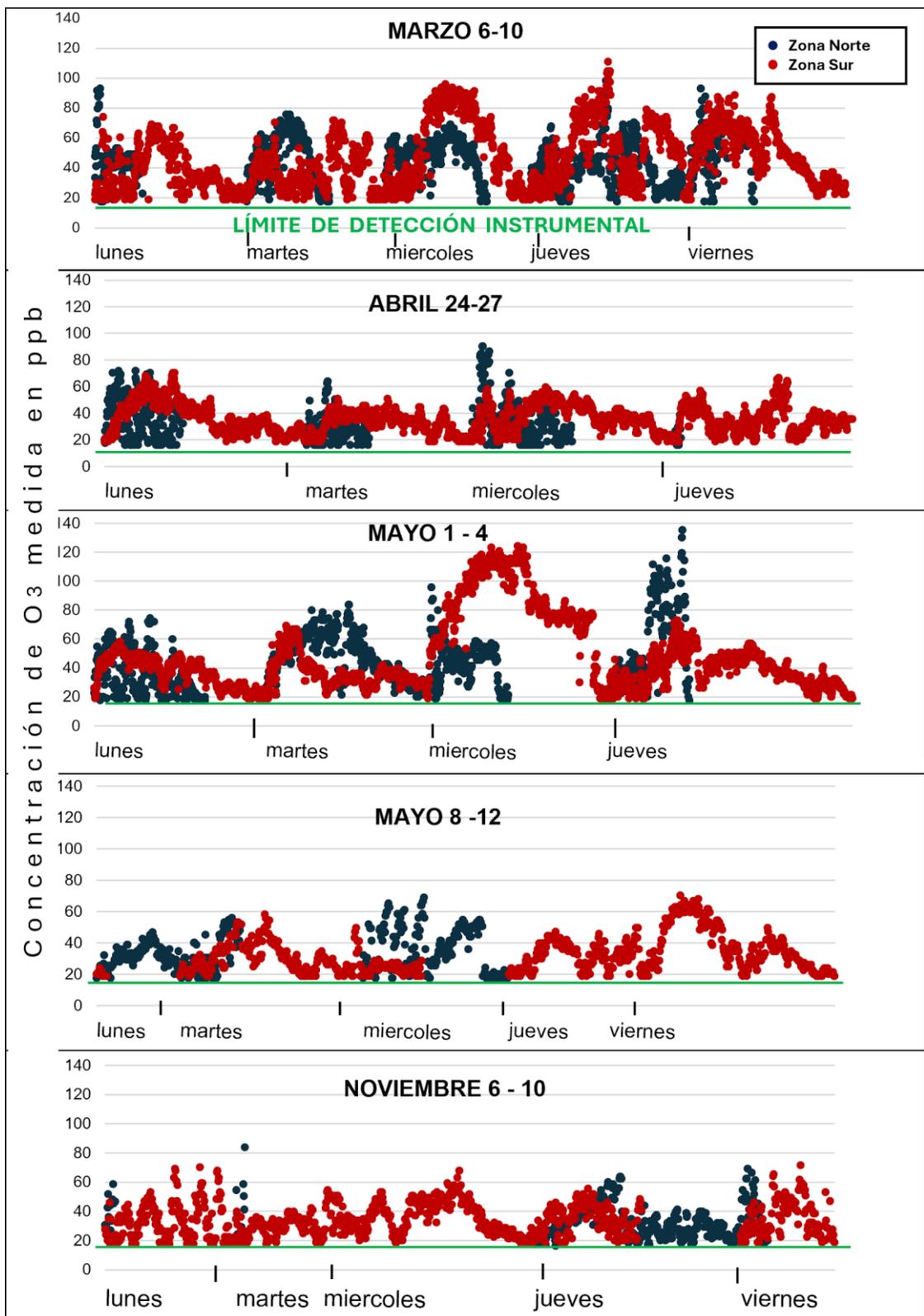
589

590 **5. 2 Niveles de exposición personal a ozono obtenidos por monitoreo activo.**

591 A partir de 3961 registros (66 horas) en la zona norte y 8103 registros (135 horas) en
592 la zona sur, obtenidos dentro de las semanas de campaña de muestreo (Tabla 4.), se
593 construyeron los perfiles de concentración de ozono en partes por billón (ppb) a
594 través del tiempo (Fig. 9). Con base en el offset calculado para cada equipo, las
595 gráficas presentan el valor de este offset como el límite de detección instrumental
596 (LDI), donde, por debajo de este valor no hay puntos de registros. Así como algunos
597 espacios discontinuos a lo largo de la línea de los perfiles. Esto no implica que no
598 haya presencia de ozono en el microambiente o en el horario de monitoreo. Lo que
599 ocurre es que, debido a su tecnología, el monitor personal no logra proporcionar
600 una medición en rangos de concentración de ozono menores a 16.10 ppb (Aeroqual
601 1) y 17.55 ppb (Aeroqual 2).

602

603 Estos valores determinados mediante la validación del funcionamiento del equipo
604 (Sección 5.1) indican que, aunque el equipo registre 0 ppb, la concentración de
605 ozono se puede encontrar entre cero y el valor del offset. Al no conocer con precisión
606 el valor, se muestra el espacio en blanco y no el valor de cero. Debido a este desfase
607 en los registros se debe tomar en cuenta que los perfiles muestran niveles de
608 exposición a ozono con base en este desfase. Para comparar el comportamiento
609 diario entre los registros de ozono obtenidos en la zona norte y en la zona sur se
610 muestran los dos grupos de datos en una misma gráfica utilizando puntos azul y rojo
611 respectivamente.



612

613 **Figura 9.** Perfiles semanales de concentración de ozono para zona norte y sur de la
 614 Ciudad de México medidos por monitores Aeroqual S500.

615 En los perfiles semanales de la Figura 9 se observa el comportamiento diario donde
616 al inicio del día existen niveles de concentración de ozono cercanos a 20 ppb, los
617 valores aumentan a lo largo del día presentando picos o niveles máximos por la tarde
618 y finalmente disminuyen durante la tarde noche. Este fenómeno está determinado
619 por el ciclo de formación del ozono ambiental (SEDEMA, 2024).

620

621 Las emisiones de especies precursoras de ozono troposférico (NO_x y COVs)
622 provenientes de las actividades antropogénicas se acumulan en la troposfera a lo
623 largo del horario matutino. A partir del mediodía se presenta un aumento en la
624 radiación solar lo cual favorece la producción de ozono a partir de reacciones
625 fotoquímicas que involucran a los compuestos precursores (Zhang et al., 2019).

626 En el horario de la tarde la radiación disminuye y por lo tanto la producción de ozono.
627 Además, debido a la dispersión de los contaminantes por las corrientes de aire y su
628 deposición en superficies, resultan concentraciones bajas ya durante el anochecer.

629

630 Comparando los niveles máximos por día entre ambas zonas, los de mayor tiempo
631 de duración se observaron en la zona sur. A pesar de que la zona norte registró
632 concentraciones mayores a 70 ppb y 138 ppb como valor máximo en la semana del
633 1° al 4 de mayo 2023, son entre 3 y 5 minutos cuando los valores de concentración
634 se encontraron dentro de este rango. En el caso contrario, la zona sur presentó
635 registros durante más de 1 hora que no sobrepasaron 70 ppb, por ejemplo, en la
636 semana del 24 al 27 de abril, pero se mantuvieron dentro de un rango de 40 a 60
637 ppb. El hecho que en la zona sur se registraran concentraciones de ozono por mayor
638 periodo de tiempo y, en algunos días, con valores mayores a los de la zona norte se
639 puede atribuir al comportamiento de las corrientes de viento de la Ciudad de México.

640

641 La Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT), a partir de
642 información meteorológica reportada por la RAMA, analizó el flujo promedio de
643 viento en la Ciudad de México definiendo que el movimiento de las corrientes de
644 viento es casi homogéneo de Norte a Sur causando la dispersión de contaminantes
645 en esta dirección (PAOT, 2002). Lo anterior explica que, para la región norte donde
646 se encuentra Tlalnepantla, las altas concentraciones de ozono registradas se
647 mantienen por periodos cortos de tiempo. Para ambas zonas, la semana del 1° al 5
648 mayo presentó las concentraciones de ozono más altas de las seis campañas de
649 muestreo, con 125 ppb en la zona sur y 138 ppb en la zona norte.

650

651 **5.3 Comparación por semana de concentraciones de O₃ en microambientes**

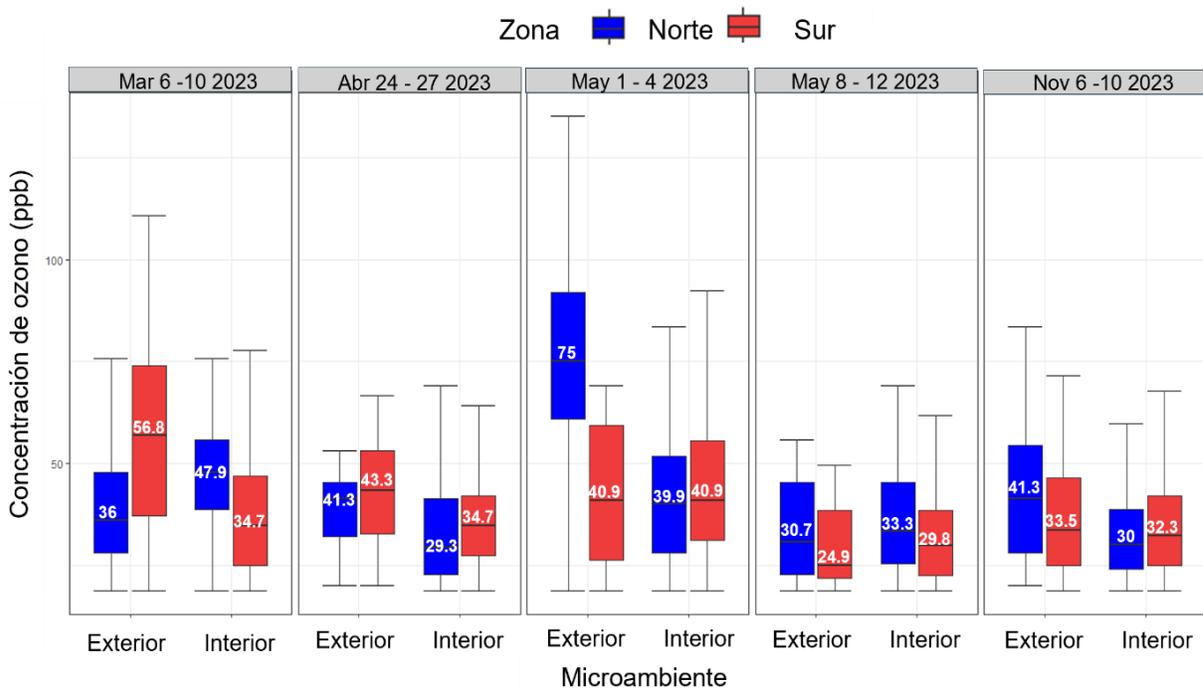
652 Usando las bitácoras de registro de actividades diarias de los monitores, se
653 identificaron las mediciones de concentración de ozono con los diferentes
654 microambientes donde se encontraban los monitores. La totalidad de las mediciones
655 registradas se dividieron en ambientes exterior e interior:

656

- 657 ● Exterior. Incluye espacios al aire libre, como calles y patios; así como medios
658 de transporte (camión, metro y automóvil particular).
- 659 ● Interior. Correspondiente a casa-habitación, escuela y edificios de trabajo.

660

661 Se elaboraron gráficas de cajas y bigotes con la finalidad de comparar las
662 concentraciones de ozono obtenidas en cada microambiente para las 5 semanas de
663 muestreo llevadas a cabo en el presente proyecto (Fig. 10).



664

665 **Figura 10.** Boxplot de concentraciones de ozono en microambientes para zona norte
 666 y sur en las semanas de muestreo.

667

668 Debido a la naturaleza de los datos, al ser registros de alta resolución (1-min), el
 669 calcular valores máximos y mínimos correspondería a la concentración de ozono
 670 registrada en 1 minuto, mientras que el uso de percentiles permite observar
 671 ampliamente la distribución de valores que poseen los registros. Por lo tanto, para
 672 realizar el análisis de exposición a ozono mediante gráficas de cajas y bigotes, se
 673 utilizó el percentil 95 que indica la cobertura del 95 % de datos de concentración de
 674 ozono para cada microambiente. La Figura 10 muestra variación temporal en la
 675 exposición a ozono entre cada semana, así como una diferencia espacial entre los
 676 microambientes determinados. Por microambiente, la zona sur presenta para todas
 677 las semanas de medición, un rango de valores mayores de concentración de ozono
 678 en los registros. El mayor valor de exposición se registró durante la semana del 6-10
 679 marzo de 2023 correspondiente a 88.7 ppb en el percentil 95 y 56.8 ppb para la
 680 mediana (Tabla 6).

681 **Tabla 6.** Percentiles 5, 25, 50, 75 y 95 de las concentraciones de ozono por
 682 microambiente en la zona sur y norte en las semanas de muestreo.

Semana	Marzo 6 - 10				Abril 24 - 27			
	Norte		Sur		Norte		Sur	
	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior
P5	20.1	22.7	22.5	20	22.9	18.7	22.5	20
P25	27.4	38.6	37.2	24.9	32	22.7	32.3	27.4
P50	36	47.9	56.8	34.7	41.3	29.3	43.3	34.7
P75	47.9	55.8	74	47	45.2	41.3	53.1	42.1
P95	83.6	66.4	88.7	65.4	51.3	65.1	64.2	53.1

683

684 **Tabla 6.** Continuación.

Semana	Mayo 1 - 4				Mayo 8 - 12			
	Norte		Sur		Norte		Sur	
	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior
P5	24	20.1	18.8	21.2	18.8	18.7	18.8	18.8
P25	60.1	28	26.1	31	22.7	25.4	21.2	22.5
P50	75	39.9	40.9	40.9	30.7	33.3	24.9	29.8
P75	92.5	51.8	59.3	55.6	45.2	45.2	40.9	38.4
P95	112.9	67.7	66.6	109.5	52.5	57.3	49.4	59.3

685

686 **Tabla 6.** Continuación.

Semana	Noviembre 6 - 10			
	Norte		Sur	
	Exterior	Interior	Exterior	Interior
P5	20.7	18.7	20	20
P25	28	24	24.9	24.9
P50	41.3	30	33.5	32.3
P75	54.5	38.6	47	42.1
P95	75	55.8	58	51.9

687

688 Durante la semana de 1- 4 mayo, se obtuvo el mayor valor de exposición total de
 689 109.5 ppb (P₉₅) en la zona sur, pero en los registros de interiores. En este caso, al
 690 tener un rango central de datos entre 31-55.6 ppb, se identifica una alta dispersión
 691 de los registros. Este comportamiento se puede explicar mediante la Figura 9, que

692 contiene los perfiles por minuto. Se muestra para el miércoles 3 de mayo periodos
693 de varias horas con los valores más altos de concentración de ozono, duplicando los
694 registros de los demás días. Las gráficas de cajas y bigotes permiten observar que
695 las altas concentraciones del 3 de mayo de 2023 pertenecen a microambientes
696 interiores, pero la asimetría de los datos para esta semana muestra que la mayoría
697 de los registros pertenecen al rango de 21.2 y 40.9 ppb.

698

699 En la zona norte el comportamiento es semejante al sur, entre las categorías de
700 microambientes con rango de valores mayores de concentración de ozono en los
701 registros en exteriores (22.7 – 92.5 ppb) que los de interiores (22.7 – 55.8 ppb). Con
702 excepción de la semana de marzo 6-10, el rango de valores centrales presenta
703 registros de ozono mayores en interiores que en exteriores. En este caso, el valor
704 mayor del rango de concentraciones de ozono se encontró en la semana de mayo
705 1-4, de igual manera en microambientes exteriores, con 112.9 ppb (P_{95}) y 75 ppb de
706 mediana.

707

708 La zona norte presenta mayor dispersión en los registros a comparación de la zona
709 sur. La dispersión se observa en las gráficas de cajas, donde el límite de los “bigotes”
710 muestra el rango de valores donde el 50 % de los datos no centrales con la mediana.
711 Además, esta dispersión existe con una tendencia hacia el límite superior, indicando
712 una asimetría hacia esta dirección para los datos tanto en interiores como exteriores.
713 Se representa esta tendencia debido a que existen picos de concentraciones altas de
714 ozono en la zona norte, pero durante 5 a 10 minutos aproximadamente. Sin
715 embargo, el área de la caja en los gráficos permite observar que la magnitud de la
716 exposición a ozono corresponde, en la mayoría de los registros, a menos de 50 ppb.

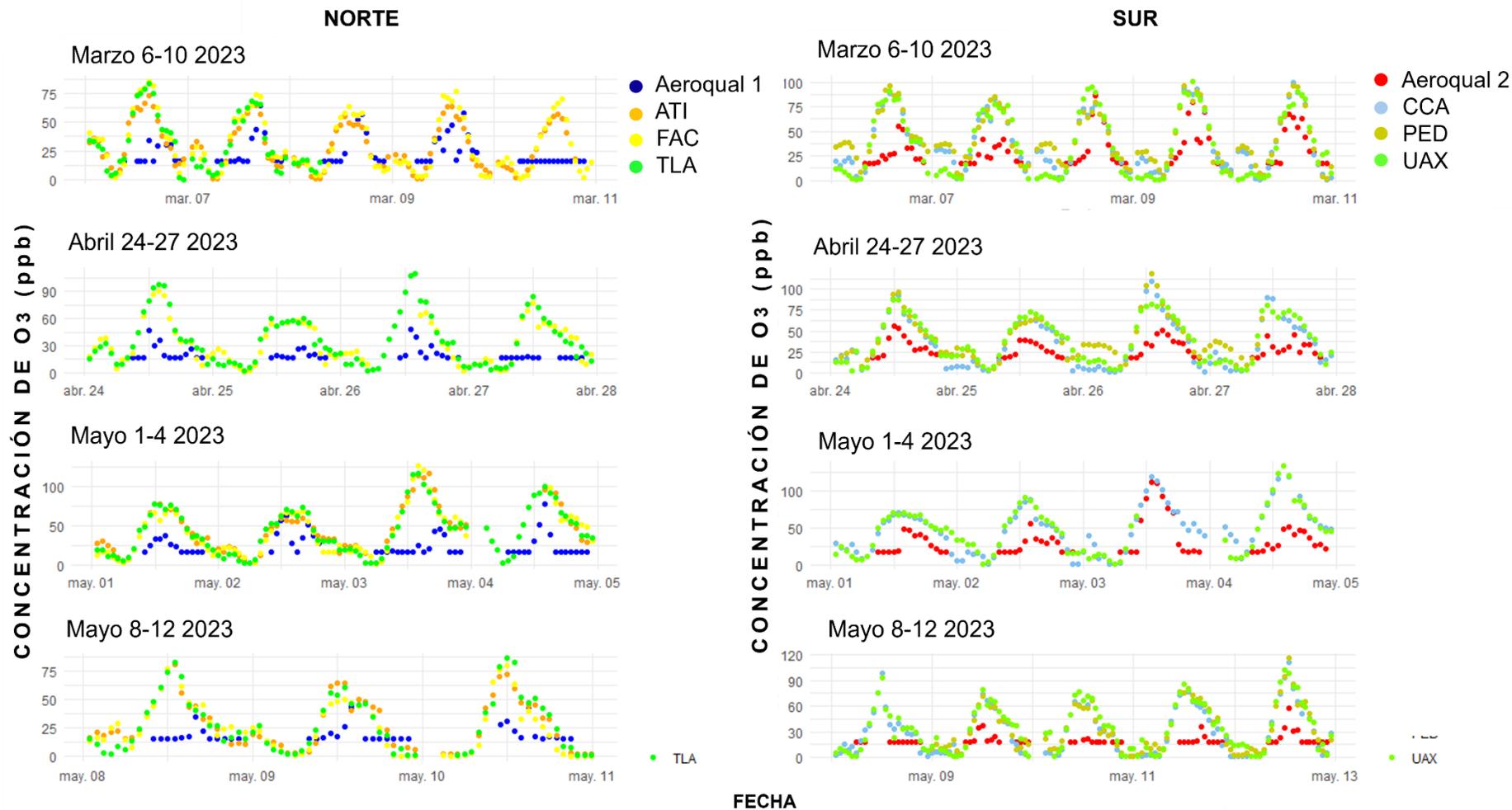
717

718 A través del seguimiento de los patrones de actividad, las campañas de monitoreo
719 personal de este proyecto exhiben el diferente comportamiento que puede
720 presentar el ozono como contaminante en ambientes intramuros y extramuros.
721 Estudios de investigación que han utilizado monitores de ozono pasivos y activos,
722 han encontrado que no siempre en interiores ocurre menor exposición a ozono que
723 en extramuros. Esta variación tiene dependencia con las características físicas
724 (dimensiones y tipo de ventilación) y patrones de actividad (fumar, tránsito en las
725 habitaciones, uso de aparatos como impresoras, purificadores de aire y aire
726 acondicionado). Estudios recientes como el de Zhang & Jenkins (2016), se han
727 dedicado a cuantificar la aportación a la exposición a ozono que proporcionan
728 aparatos domésticos como purificadores de aire, sanitizadores de alimentos,
729 secadores de cabello, entre otros; ya sea de manera directa o como un subproducto.
730

731 A pesar de ser relevante, los efectos directos de la ventilación y acomodo de
732 superficies han sido analizados de manera más amplia desde hace más de 20 años
733 cuando la presencia de los aparatos mencionados era escasa. Demostrando que, en
734 casos donde hay buena ventilación, las concentraciones de ozono registradas en
735 intramuros pueden alcanzar valores iguales a los de extramuros (Blondeu et al., 2005;
736 Heroux et al., 2010). De acuerdo con las bitácoras, las habitaciones de ambos
737 participantes se encuentran en una segunda planta y cuentan con una ventana
738 amplia la cual permanece abierta o cerrada de manera aleatoria durante el día.
739 Asimismo, los lugares donde permanecieron en interiores, además de la vivienda,
740 fueron salones de la facultad y laboratorio del ICAYCC, ambos con buena ventilación
741 y aire acondicionado en el laboratorio.
742

743 La relevancia en la ventilación en un edificio fue reportada por Romieu et al. (1998)
744 quienes realizaron mediciones de ozono en escuelas y viviendas de la Ciudad de
745 México mediante monitores pasivos. Ellos determinaron que la concentración de
746 ozono es menor en interiores que en exteriores, pero si la ventana se mantiene
747 abierta puede ser 5 veces la concentración registrada cuando se encuentran cerrada.
748 Esto concuerda con el comportamiento mencionado de los registros en ambas zonas
749 donde se observaron niveles mayores de ozono en exteriores que en interiores.
750 También esto se observa en algunas semanas de muestreo donde los valores
751 centrales se encuentran en rangos cercanos de concentración de ozono, por
752 ejemplo, la semana de abril 24-27, mayo 8-12 y noviembre 6-10 de 2023.
753

754 **5.4 Comparación con monitoreo ambiental**



755 **Figura 11.** Perfiles semanales de concentraciones promedio de ozono para la zona norte y sur medidas por el monitor personal y por
 756 las tres estaciones de monitoreo ambiental más cercanas.
 757

758 En los registros de monitores ambientales para ambas zonas se puede observar el
759 patrón de aumento y disminución de concentración de ozono para cada día.

760

761 Es posible observar el comportamiento completo del contaminante a nivel ambiental
762 al emplear los datos de tres estaciones para cada zona. Existen horarios y días donde
763 no hay registros en alguna estación o estaciones, por lo tanto, se completaron los
764 perfiles con datos de las demás estaciones. Esto permite analizar la exposición a
765 ozono en ambas áreas de la ZMVM de manera más amplia. La Figura 11 muestra que
766 los perfiles de concentración promedio son cercanos entre las tres estaciones de
767 cada zona. Lo anterior indica que el comportamiento del ozono es parecido dentro
768 de las secciones del norte y sur que monitorean los equipos.

769

770 Por otra parte, los perfiles de concentraciones promedio de los monitores personales
771 no presentan la misma continuidad que los monitores ambientales. Debido a que los
772 niveles de ozono son bajos durante la noche, estos se encuentran por debajo del
773 límite de detección del equipo, por lo que no aparecen datos durante la noche y
774 madrugada, registros que si alcanza a medir el equipo ambiental. Los valores
775 promedio de concentración de ozono obtenidos por monitores Aeroqual son
776 menores o, en pocos casos, iguales a los promedios de los monitores ambientales
777 para toda la campaña de muestreo. Sin embargo, muestran la misma tendencia en
778 la formación del pico máximo diario durante el mismo horario.

779

780 Comparando las zonas norte y sur, los datos del equipo personal de la zona sur
781 permiten observar el perfil de concentración de manera más completa, además de
782 ser de una magnitud mayor que los perfiles construidos a partir de datos del
783 monitoreo en el norte. De acuerdo con la Figura 9, los registros de ozono en el norte

784 alcanzan valores mayores a 60 ppb, pero por periodos de menos de 1 hora en la
785 mayoría de los días, por lo tanto, sus promedios horarios son entre 20 y 50 ppb. Las
786 diferencias en el comportamiento de los datos promedio de concentración a ozono
787 entre los sitios de monitoreo fijo y los monitores activos, muestran que existe
788 concordancia con estudios realizados en zonas urbanas sobre los cambios en el nivel
789 de exposición a contaminantes atmosféricos que experimentan las personas al
790 desplazarse durante su día a día (O'Neill et al., 2003; Violante et al., 2006).

791

792 Para este proyecto, se determinó que la exposición de los habitantes de la ZMVM,
793 considerando los sitios de monitoreo fijos, se ve sobreestimada con respecto a la
794 medida mediante monitoreo personal. Sin embargo, el comportamiento de
795 aumento y disminución de ozono se registra de manera similar por lo monitores
796 personales a lo largo de las horas del día, incluso a magnitudes iguales en días y
797 horarios con concentraciones ambientales promedio iguales o mayores a 100 ppb
798 (Fig. 11).

799

800 **5.5 Estudios existentes de exposición personal a ozono**

801 Los monitores personales son considerados equipos de bajo costo, además de
802 presentarse en el mercado unidades tanto de carácter comercial como apropiados
803 para la investigación (WMO, 2021). La ventaja principal que representa el uso de
804 equipos de monitoreo activo es la posibilidad de obtener datos de alta resolución
805 que permitan observar los aumentos y disminuciones en la concentración de
806 contaminantes a través del tiempo. Como un antecedente relevante, O'Neill et al.,
807 (2003) realizó un estudio en calles de la Ciudad de México con 39 voluntarios
808 trabajadores de exteriores quienes utilizaron monitores de concentración de ozono
809 y se compararon con la estación ambiental más cercana. Obteniendo promedios

810 menores que los de la estación de monitoreo fijo, concluyó que los datos de
 811 monitoreo ambiental pueden ser utilizados para identificar la exposición en
 812 exteriores pero que si existe una diferencia con los niveles experimentados a nivel
 813 de superficie.

814

815 **Tabla 7.** Estudios existentes de exposición a ozono por monitoreo personal activo.

No.	Autor, Año	Ciudad	País	Equipo
1	O'Neill et al., 2003	Ciudad de México	México	Bombeo a tubos de muestreo recubiertos con nitrito.
2	Bart et al., 2014	British Columbia	Canadá	Sensor de óxido metálicos.
3	Spinelle et al., 2015	Pianura Padana	Italia	Sensor electroquímico/Sensor de oxido metálico.

816

817

818 A pesar de usar una tecnología diferente, el estudio destaca la relevancia de
 819 continuar con investigaciones de monitoreo a nivel personal para la Ciudad de
 820 México debido a la recurrencia de eventos con altas concentraciones de ozono que
 821 se presentan anualmente. Por otro lado, como desventaja principal de los monitores
 822 de bajo costo es la precisión de sus datos. El desempeño de los monitores de óxidos
 823 metálicos ha sido investigado al presentar susceptibilidad a los cambios de
 824 temperatura y humedad (Spinelle et al., 2015). En consecuencia, estudios como Bart
 825 et al. (2014) y Spinelle et al. (2015) reportan métodos para validar los registros de
 826 equipos con esta tecnología comparando con equipos de referencia con el principio

827 de fotometría UV. Así como métodos estadísticos de corrección de los registros de
828 los monitores personales como regresiones lineales, multivariadas e incluso de
829 aprendizaje automatizado.

830

831 Una vez acentuada la importancia de contar con la validación del correcto
832 funcionamiento de los monitores personales, ambos estudios concluyen que este
833 tipo de equipos pueden proporcionar datos suficientes para aumentar el
834 conocimiento del comportamiento de los contaminantes. Lo anterior mediante su
835 integración en redes de monitoreo híbridas funcionando en conjunto a las estaciones
836 ambientales y/o como equipos de monitoreo en zonas locales donde no existen
837 equipos de referencia.

838

839

6. CONCLUSIONES

840

841

842 En el presente proyecto se realizaron mediciones de exposición personal a ozono
843 que experimentaron dos voluntarios de la región Norte y Sur en la Zona
844 Metropolitana del Valle de México. Los registros se llevaron a cabo utilizando
845 monitores personales de alta resolución temporal (1-min) Aeroqual S500. A través
846 de la obtención de series de tiempo y patrones de actividad registrados por los
847 individuos, se realizó el análisis de exposición personal para 5 semanas de muestreo
848 de 2023, comparando microambientes interiores y exteriores para ambas zonas. Los
849 valores más altos se registraron en ambientes exteriores en ambas zonas.

850

851 Se determinaron 112.9 ppb de ozono (P_{95}) como el valor máximo registrado en la
852 semana de 1-4 mayo 2023 para la zona norte, mientras que el nivel más alto de
853 ozono para la zona sur fue de 88.7 ppb (P_{95}) pero durante la semana del 6-10 marzo
854 2023. A pesar de la que la zona norte mostró el valor más alto de ozono a nivel de
855 calle, también exhibió más variabilidad de datos. Esto se debió a picos altos de
856 ozono, pero con pocos minutos de duración en solo un día de esa semana,
857 presentándose el caso contrario en la zona sur. En el caso de las demás semanas,
858 los valores centrales de concentración de ozono se mantuvieron entre 21 y 60 ppb
859 para las dos categorías de microambientes. Las diferencias entre los microambientes
860 tuvieron como factores principales la ventilación de las habitaciones, ya que fue en
861 interiores donde pasaron la mayor parte del tiempo durante las campañas de
862 muestreo, pero los valores de medianas de concentración de ozono fueron cercanos
863 en 3 de las 5 semanas de la campaña.

864

865 Comparando las concentraciones promedio de ozono de los monitores personales
866 con los registros ambientales, en ambas zonas se mantuvieron por debajo de los

867 datos del monitoreo fijo. Sin embargo, se observó una mayor similitud del perfil
868 diario de concentración de ozono en la zona sur, además de obtención de valores
869 cercanos entre ambos equipos en las semanas de 1-6 de marzo y 1-4 de mayo de
870 2023.

871

872 El análisis del presente trabajo demostró un buen funcionamiento del monitoreo
873 personal de un sensor de óxido metálico para detectar ozono en periodos minuto a
874 minuto. A través de una validación inicial y corrección correspondiente, permitió
875 conocer la magnitud de la diferencia en exposición a este contaminante que existe
876 en la ZMVM. Asimismo, se reconoce la influencia que tienen los patrones de
877 actividad en la exposición a nivel superficie y cómo no puede ser completamente
878 representada solamente por los monitores ambientales locales. Finalmente se
879 recomienda incrementar el alcance de este tipo de estudios con la posibilidad de
880 ampliar la cantidad de voluntarios que proporcionen una mejor cobertura de
881 distintas zonas del Valle de México.

7. REFERENCIAS

882

883

884 1. Aeroqual (2021). *How Gas Sensitive Semiconductor (GSS) Technology Can*
885 *Help You Produce Highly Accurate Data*. Aeroqual. Consultado 01 de marzo
886 2024. Disponible en [https://www.aeroqual.com/blog/how-gss-technology-](https://www.aeroqual.com/blog/how-gss-technology-can-help-you-produce-highly-accurate-data)
887 [can-help-you-produce-highly-accurate-data](https://www.aeroqual.com/blog/how-gss-technology-can-help-you-produce-highly-accurate-data)

888

889 2. Aeroqual (2022). *Sensors – Ozone*. Aeroqual Support. Consultado 18 marzo
890 2024. Disponible en
891 https://support.aeroqual.com/Wiki/O3_Sensor_Head_Information

892

893 3. Bart, M., Williams, D. E., Ainslie, B., McKendry, I., Salmond, J., Grange, S. K., ...
894 Henshaw, G. S. (2014). *High Density Ozone Monitoring Using Gas Sensitive*
895 *Semi-Conductor Sensors in the Lower Fraser Valley, British Columbia*.
896 *Environmental Science & Technology*, 48(7), 3970–3977.
897 doi:10.1021/es404610t

898

899 4. Blondeau, P., Iordache, V., Poupard, O., Genin, D., & Allard, F. (2005).
900 *Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools*.
901 *Indoor Air*, 15(1), 2–12. doi:10.1111/j.1600-0668.2004.00263.x

902

903 5. Clements, A.L., Griswold, W.G., Rs, A., Johnston, J.E., Herting, M.M., Thorson, J.,
904 Collier-Oxandale, A. and Hannigan, M. (2017). *Low-cost air quality monitoring*
905 *tools: from research to practice (a workshop summary)*. *Sensors*, 17(11), p.2478

906

- 907 6. Comisión para la Cooperación Ambiental CEC (2008). *Aire y atmósfera, ozono*
908 *troposférico*. El mosaico de América del Norte panorama de los problemas
909 ambientales más relevantes. Págs. 11-15. Canadá.
- 910
- 911 7. Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Schwartz, J.
912 D. (2017). *Air Pollution and Mortality in the Medicare Population*. New England
913 Journal of Medicine, 376(26), 2513–2522. doi:10.1056/nejmoa1702747
- 914
- 915 8. EPA (2020). *Integrated Science Assessment (ISA) for Ozone and Related*
916 *Photochemical Oxidants* U.S. Environmental Protection Agency, Washington,
917 DC, EPA/600/R-20/012, 2020.
- 918
- 919 9. Foley, G. J., Georgopoulos, P. G., & Lioy, P. J. (2003). *Peer Reviewed:*
920 *Accountability Within New Ozone Standards*. *Environmental Science &*
921 *Technology*, 37(21), 392A–399A. doi:10.1021/es032605b.
- 922
- 923 10. Héroux, M.-E., Clark, N., Ryswyk, K. V., Mallick, R., Gilbert, N. L., Harrison, I.,
924 Wheeler, A. J. (2010). *Predictors of Indoor Air Concentrations in Smoking and*
925 *Non-Smoking Residences*. *International Journal of Environmental Research*
926 *and Public Health*, 7(8), 3080–3099. doi:10.3390/ijerph7083080
- 927
- 928 11. Koman, P. D., & Mancuso, P. (2017). *Ozone Exposure, Cardiopulmonary Health,*
929 *and Obesity: A Substantive Review*. *Chemical Research in Toxicology*, 30(7),
930 13841395. doi:
931 10.1021/acs.chemrestox.7b00077 10.1021/acs.chemrestox.7b00077

- 932 12. Lin C., Gillespie J., Schuder M.D., Duberstein W., Beverland I.J., Heal M.R. (2014).
933 *Evaluation and calibration of Aeroqual series 500 portable gas sensors for*
934 *accurate measurement of ambient ozone and nitrogen dioxide.* Atmospheric
935 Environment Volume 100 (2015) 111-116. ISSN 1352-2310,
936 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.002>.
937
- 938 13. McDonald B.C., de Gouw J.A., Gilman J.B., Jathar S.H., Akherati A., Cappa C.D.,
939 et al. (2018) *Volatile chemical products emerging as largest petrochemical*
940 *source of urban organic emissions.* Science 359:760–4. doi: 10.1126/science.
941 aaq0524.
942
- 943 14. Monks, P. S., Archibald, A. T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R.,
944 Fowler D., Granier C., Law K.S., Mills G.E., Stevenson D.S., Tarasova O., Thouret
945 V., von Schneidemesser E., Sommariva R., Wild O., Williams, M. L.
946 (2015). *Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global*
947 *scale from air quality to short-lived climate forcer.* Atmospheric Chemistry and
948 Physics, 15(15), 8889–8973. doi:10.5194/acp-15-8889-2015.
949
- 950 15. Nuvolone, D., Petri, D., & Voller, F. (2017). *The effects of ozone on human*
951 *health.* Environmental Science and Pollution Research, 25(9), 8074–
952 8088. doi:10.1007/s11356-017-9239-3 10.1007/s11356-017-9239-3.
953
- 954 16. Ollison, W. M., Crow, W., & Spicer, C. W. (2013). *Field testing of new-*
955 *technology ambient air ozone monitors.* Journal of the Air & Waste
956 Management Association, 63(7), 855–
957 863. doi:10.1080/10962247.2013.796898.

- 958 17. O'Neill, M. S., Ramirez-Aguilar, M., Meneses-González, F., Hernández-Ávila, M.,
959 Geyh, A. S., Sienra-Monge, J. J., & Romieu, I. (2003). *Ozone Exposure among*
960 *Mexico City Outdoor Workers*. *Journal of the Air & Waste Management*
961 *Association*, 53(3), 339–346. doi:10.1080/10473289.2003.10466156
962
- 963 18. Perevochtchikova, M. (2009). *La situación actual del sistema de monitoreo*
964 *ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. *Estudios*
965 *demográficos y urbanos*, 24(3), 513-
966 547. <https://doi.org/10.24201/edu.v24i3.1327>.
967
- 968 19. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (2002). *Patrón del*
969 *Viento en el Valle de México*. Gobierno de la Ciudad de México, PAOT.
970 Consultado 18 marzo 2024. Disponible en
971 <https://paot.org.mx/centro/libros/mayo02/Rmayo6.pdf>
972
- 973 20. Rivera C., Sánchez-Rojas F. y Andrade Robles M. A. (2016). *Contaminación*
974 *atmosférica de la Zona Metropolitana del Valle de México y sus efectos en la*
975 *salud*. MADIC, Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Consultado 20 de
976 octubre 2023. Disponible en
977 <http://dccd.cua.uam.mx/archivos/Madic/terminal/ContaminacionAtmosferica>
978 [ZMVM.pdf](http://dccd.cua.uam.mx/archivos/Madic/terminal/ContaminacionAtmosferica).
979
- 980 21. Romieu, I., Lugo, M. C., Colome, S., García, A. M., Ávila, M. H., Geyh, A., Rendon,
981 E. P. (1998). *Evaluation of Indoor Ozone Concentration and Predictors of*
982 *Indoor-Outdoor Ratio in Mexico City*. *Journal of the Air & Waste Management*
983 *Association*, 48(4), 327–335. doi:10.1080/10473289.1998.10463684

984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009

22. Sagona, J. A., Weisel, C. P., & Meng, Q. (2018). *Accuracy and practicality of a portable ozone monitor for personal exposure estimates*. Atmospheric Environment, 175, 120–126. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.11.036

23. SALUD Secretaria de Salud (2021). *NOM-020-SSA1-2021: Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al ozono (O3). Valores normados para la concentración de ozono (O3) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población*. Disponible en https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633956&fecha=28/10/2021#gsc.tab=0

24. SEDEMA Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2024). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2021*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire. Disponible en <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-2021.pdf>

25. SEMARNAT (2011) *Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Consultado 20 de octubre 2023. Disponible en https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/proaire/11_ProAire%20ZMVM.pdf.

26. Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., & Bonavitacola, F. (2015). *Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality*

1010 *monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide. Sensors and Actuators B:*
1011 *Chemical*, 215, 249–257. doi: 10.1016/j.snb.2015.03.031
1012

1013 27. Turner, M. C., Jerrett, M., Pope, C. A., Krewski, D., Gapstur, S. M., Diver, W. R.,
1014 Burnett, R. T. (2016). *Long-Term Ozone Exposure and Mortality in a Large*
1015 *Prospective Study*. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*,
1016 193(10), 1134–1142. doi:10.1164/rccm.201508-1633oc
1017

1018 28. Violante, F. S., Barbieri, A., Curti, S., Sanguinetti, G., Graziosi, F., & Mattioli, S.
1019 (2006). *Urban atmospheric pollution: Personal exposure versus fixed*
1020 *monitoring station measurements*. *Chemosphere*, 64(10), 1722–1729. doi:
1021 10.1016/j.chemosphere.2006.01
1022

1023 29. Wilson, W. E., Mage, D. T., & Grant, L. D. (2000). *Estimating Separately Personal*
1024 *Exposure to Ambient and Nonambient Particulate Matter for Epidemiology*
1025 *and Risk Assessment: Why and How*. *Journal of the Air & Waste Management*
1026 *Association*, 50(7), 1167–1183. doi:10.1080/10473289.2000.1046416.
1027

1028 30. World Health Organization. (2019) *Contaminación atmosférica*. World Health
1029 Organization, WHO. Consultado 09 de octubre 2023. Disponible en
1030 <https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab 1>.
1031

1032 31. World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines:*
1033 *particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide*
1034 *and carbon monoxide*. World Health Organization, WHO. License: CC BY-NC-
1035 SA 3.0 IGO.

1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060
1061

32. WMO, World Meteorological Organization. (2021). *An Update on Low-cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition, December 2020*. Editado por R. Peltier. Geneva 2, Suiza. Consultado 25 abril 2024. Disponible en: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10620

33. Zanobetti, A., & Schwartz, J. (2011). *Ozone and Survival in Four Cohorts with Potentially Predisposing Diseases*. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 184(7), 836–841. doi:10.1164/rccm.201102-0227oc

34. Zhang, Q., & Jenkins, P. L. (2016). *Evaluation of ozone emissions and exposures from consumer products and home appliances*. Indoor Air, 27(2), 386–397. doi:10.1111/ina.12307

35. Zhang J., Wei Y. y Fang Z. (2019) *Ozone Pollution: A Major Health Hazard Worldwide*. Frontiers in Immunology 10:2518. doi: 10.3389/fimmu.2019.02518.

8.ANEXOS

1.1 Anexo I. Conversión de ozono de unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a ppb

- Tomando el dato de temperatura ambiental promedio del artículo de Lin et al., (2014) de 19°C y asumiendo una presión de atmosférica de 1 atm , se calcula el volumen en L que hay en un mol de aire. Se utiliza la ecuación general del gas ideal

$$\frac{V}{n} = \frac{RT}{P} = \frac{0.082\text{ L} \frac{\text{atm}}{\text{mol}} \text{K} (19 + 273.15\text{ K})}{1\text{ atm}} = 23.96\text{ L/mol}$$

- Se utiliza este valor en el factor de conversión de la concentración de ozono indicada como masa de ozono (μg) en volumen de aire (m^3)

$$6.82 \frac{\mu\text{g ozono}}{\text{m}^3 \text{ aire}} = \frac{1\text{ g ozono}}{10^6 \mu\text{g ozono}} \cdot \frac{1\text{ mol ozono}}{48\text{ g ozono}} \cdot \frac{23.96\text{ L ozono}}{1\text{ mol ozono}} \cdot \frac{1\text{ m}^3 \text{ ozono}}{1000\text{ L ozono}}$$
$$3.40 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^3 \text{ ozono}}{\text{m}^3 \text{ aire}}$$

- Este valor corresponde a la cantidad de ozono en 1 m^3 de aire. Para expresarse en ppb se determina la cantidad del contaminante en 1 billón de partes o m^3 de aire.

$$3.40 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ ozono} \cdot \frac{10^9 \text{ m}^3 \text{ aire}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} = 3.40 \text{ ppb}$$