



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL-AIRE

**EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE  
NORTEAMÉRICA**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN INGENIERÍA

**PRESENTA:**

I.Q. AMELIA JIMÉNEZ ALCÁNTARA

**TUTOR PRINCIPAL:**

DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA (INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA  
ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO)

**COMITÉ TUTOR:**

DR. ROGELIO SOTO AYALA (FACULTAD DE INGENIERÍA)  
DR. ERIK BERISTAIN MONTIEL (FACULTAD DE QUÍMICA)

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, SEPTIEMBRE, 2023



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:** Dr. David Allen Gay

**Secretaria:** Dra. Brenda Cecilia Alcántar Vázquez

**Vocal 1:** Dr. Erik Beristain Montiel

**Vocal 2:** Dr. Rogelio Soto Ayala

**Vocal 3:** Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

Lugar dónde se realizó la tesis: Sección de Contaminación Ambiental- Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM.

**Tutor de tesis:**

**Dr. Rodolfo Sosa Echeverría**

---

Firma

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC), por brindarme el apoyo en esta etapa de mi desarrollo profesional.

Al Programa de Posgrado en Ingeniería de la UNAM, por el apoyo económico brindado para asistir al “NADP 2023 Spring Meeting” en Madison, WI del 1 al 5 de mayo del 2023, así como para realizar la estancia académica de investigación en el *Wisconsin State Laboratory of Hygiene (WSLH)* del 8 al 31 de mayo del 2023.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado para el desarrollo de mis estudios de maestría.

A la Red de Deposito Atmosférico (REDDA) del Gobierno de la Ciudad de México y a su personal: Mónica Jaimes P., Olivia Rivera H., Miguel Sánchez R., Rocío Carmona M., Juan Manuel Campos D., Ernesto González C., Jorge Alberto Rodas R., Jorge Domínguez O; Miguel Sánchez R. y Olivia Rivera H.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM, Proyecto: “Establecimiento de la Red Nacional de Deposito Atmosférico” (PAPIIT IN112318).

A los Programas de Intercomparación de muestras de laboratorio a nivel internacional, así como a su personal, en especial a Gregory Wetherbee del “United States Geological Survey” (USGS), así como a Van Bowersox y Evan Rea de la “World Meteorological Organization” (WMO).

A mi tutor de tesis el Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, por su apoyo, conocimientos y consejos brindados durante el desarrollo y culminación de esta tesis.

Al comité tutorial integrado por el Dr. Erik Beristain Montiel, Dr. Rogelio Soto Ayala Dr. David Allen Gay y la Dra. Brenda Cecilia Alcántar Vázquez, por su tiempo dedicado a la revisión de esta tesis, así como por sus observaciones y sugerencias para la mejora de este trabajo.

Así como a la Sección de Contaminación Ambiental del ICAYCC, especialmente a la M. en I. Ana Alarcón Jiménez, por sus conocimientos transmitidos en los estudios de laboratorio correspondientes al análisis del depósito atmosférico húmedo, al Dr. Gilberto Fuentes García, Biol. Pablo Sánchez Álvarez y al pasante de I.Q.M Alejandro de David Palacios Ibarra.

Al National Atmospheric Deposition Program, por darme la oportunidad de realizar una estancia de investigación en sus instalaciones ubicadas en el WSLH, Madison WI, así como a todo el equipo que conforma este programa, el Dr. David Allen Gay por su mentoría y hospitalidad durante mi periodo de estancia, a la Directora de Laboratorio de Programas de Estudios Ambientales Amy Mager, a Katie Blaydes Supervisora de Laboratorio del NADP, por su guía y apoyo en el laboratorio, a Nichole Miller, Chris Bauknecht, Kathry McKinnon y Abigail Carr por la capacitación brindada en cada una de las técnicas de análisis de depósito atmosférico húmedo del NADP.

Al resto de mis compañeros M. en I. Mauro Cortez, M. en I. Rafael Esteban Antonio Duran, M. en I. Daimy Ávila Rodríguez por su apoyo, consejos y conocimientos transmitidos durante la maestría.

Finalmente, a Andrea Mariana Díaz y al resto de mis amigos de la maestría, Mitzy, Samanta y Mario, por su apoyo, motivación, experiencias compartidas y amistad, durante esta etapa de nuestras vidas profesionales.

## DEDICATORIA

*A mis padres Juan y Arisbeth por su amor y apoyo incondicional que me han llevado a culminar esta etapa de mi vida, este éxito también es de ustedes.*

*A mis hermanos Emilio y Santiago, por cada momento compartido juntos y por motivarme a ser mejor cada día.*

*A César, por cada palabra motivadora, por creer en mí siempre y hacerme recordar en los momentos más difíciles que yo puedo.*

*A mi tío Enrique que siempre me ha brindado motivación y apoyo en cada uno de los momentos de mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes.*

*En memoria de Norma, Quique y mi tía Gaby,  
siempre en mi recuerdo.*

# CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>ABREVIATURAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	4
1.2 HIPÓTESIS.....	5
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos .....	6
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>7</b>
2.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA .....	8
2.2 DEPÓSITO ATMOSFÉRICO .....	10
2.3 DEPÓSITO ATMOSFÉRICO HÚMEDO: LLUVIA ÁCIDA.....	10
2.4 CONTAMINANTES PRECURSORES DE LLUVIA ÁCIDA .....	15
2.4.1 Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ).....	15
2.4.2 Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ).....	16
2.5 EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA .....	18
<b>CAPÍTULO 3. SITIOS DE ESTUDIO</b> .....	<b>20</b>
3.1 ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.....	21
3.1.1 Sistema de monitoreo atmosférico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México .....	23
3.1.1.1 Red de Depósito Atmosférico (REDDA) .....	25
3.1.2 Antecedentes de los estudios de lluvia ácida en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. ....	27
3.1.3 Medidas implementadas para la prevención, control y minimización de contaminantes precursores de lluvia ácida en la ZMCM .....	28
3.1.4 Emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida en la ZMCM .....	32
3.2 ZONAS DE NORTEAMÉRICA (REGIÓN CANADÁ Y ESTADOS UNIDOS). ....	37
3.2.1 Monitoreo del depósito atmosférico en Norteamérica (Región Canadá y Estados Unidos). ....	38
3.2.1.1 National Trends Network (NTN) .....	41
3.2.2 Antecedentes de los estudios de lluvia ácida en la región de Norteamérica Estados Unidos-Canadá.....	43

3.2.3 Medidas implementadas para la prevención, control y minimización de contaminantes precursores de lluvia ácida en la región de Norteamérica Estados Unidos-Canadá.....	46
3.2.4 Área Metropolitana de Denver, Colorado.....	50
3.2.4.1 Emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida en el Área Metropolitana de Denver, Colorado.....	52
3.2.5 Los Ángeles, California.....	54
3.2.5.1 Emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida en Los Ángeles, California.....	56
3.2.6 Nueva York, Estados Unidos.....	58
3.2.6.1 Emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida en Nueva York.....	60
3.2.7 Toronto, Canadá.....	62
3.2.7.1 Emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida en Toronto, Canadá.....	63
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>66</b>
4.1 MUESTREO Y ANÁLISIS DEL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO HÚMEDO.....	69
4.1.1 Muestreo de depósito atmosférico húmedo.....	69
4.1.2 Obtención y preservación de muestras.....	70
4.1.3 Análisis fisicoquímico de las muestras.....	71
4.1.3.1 Medición de pH.....	72
4.1.3.2 Medición de conductividad.....	73
4.1.3.3 Determinación de la concentración de iones, mediante Cromatografía de intercambio iónico (CI).....	74
4.1.3.4 Determinación de la concentración de cationes, mediante Espectroscopía de Plasma (ICP-OES), NADP.....	76
4.1.3.5 Determinación de la concentración de amonio y ortofosfato, mediante un analizador de inyección de flujo (FIA).....	77
4.1.4 Validación de datos.....	78
4.1.5 Ponderado de datos.....	79
4.2 SELECCIÓN DE SITIOS URBANOS.....	80
4.2.1 Comparación de sitios urbanos.....	83
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....</b>	<b>84</b>
5.1 ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.....	85
5.1.1 Variación temporal y espacial del depósito atmosférico húmedo.....	85
5.1.2 Variación temporal y espacial del pH.....	87
5.1.3 Variación temporal y espacial de la conductividad.....	94
5.1.4 Composición iónica del depósito atmosférico húmedo en la ZMCM.....	99
5.1.5 Variación temporal y espacial del ión nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	100
5.1.6 Variación temporal y espacial del ion sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ).....	106
5.1.7 Variación temporal y espacial de la relación SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	111



5.1.8 Variación temporal y espacial del amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) .....	117
5.1.9 Variación temporal y espacial de la relación $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$ .....	122
5.2 COMPARACIÓN DEL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO HÚMEDO EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA.....	127
5.2.1 Variación del pH en sitios urbanos de Norteamérica .....	128
5.2.2 Variación del ion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en sitios urbanos de Norteamérica .....	132
5.2.3 Variación del ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en sitios urbanos de Norteamérica .....	137
5.2.4 Variación de la relación $\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$ en sitios urbanos de Norteamérica .....	142
5.2.5 Variación del ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en sitios urbanos de Norteamérica .....	146
5.2.6 Variación de la relación $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$ en sitios urbanos de Norteamérica..	151
<b>CAPÍTULO 6. PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL DE CONTAMINANTES PRECURSORES DE LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM .....</b>	<b>155</b>
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>160</b>
7.1 CONCLUSIONES .....	161
7.2 RECOMENDACIONES .....	164
<b>CAPÍTULO 8. REFERENCIAS .....</b>	<b>166</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>176</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sitios de muestreo de la REDDA .....	26
Tabla 2. Emisiones de NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub> por tipo de fuente en la ZMCM, 2018 .....	33
Tabla 3. Emisiones anuales de contaminantes en las principales fuentes del corredor Tula-Vito-Apasco (NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub> ).....	36
Tabla 4. Sitios de la NTN urbanos y suburbanos activos .....	43
Tabla 5. Emisiones anuales de NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub> , Área Metropolitana de Denver.....	54
Tabla 6. Emisiones anuales de NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub> , Los Ángeles .....	57
Tabla 7. Emisiones anuales de NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub> Nueva York .....	61
Tabla 8. Emisiones anuales de NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub> , Toronto, Canadá.....	64
Tabla 9. Condiciones cromatográficas experimentales para la determinación de aniones y cationes.....	75
Tabla 10. Descripción de la localización de sitios de muestreo de la REDDA .....	81
Tabla 11. Sitios urbanos de muestreo NADP .....	82
Tabla 12. Sitios de muestreo de depósito atmosférico húmedo en Ontario, Canadá. ....	83
Tabla 13. Promedios ponderados anuales de pH 2003-2019 por estación.....	87
Tabla 14. Promedio ponderado anual de la relación sulfato/nitrato por estación de la ZMCM, 2003-2019 .....	112
Tabla 15. Promedio ponderado anual de la relación amonio/nitrato por estación de la ZMCM, 2003-2019 .....	123
Tabla 16. Estrategias y tecnologías para la minimización de emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida en la ZMCM. ....	158
Tabla 17. Conductividad equivalente de los iones .....	179
Tabla 18. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2003, REDDA, NADP .....	180
Tabla 19. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2004, REDDA, NADP .....	181
Tabla 20. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2005, REDDA, NADP .....	182
Tabla 21. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2006, REDDA, NADP .....	183
Tabla 22. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2007, REDDA, NADP .....	184
Tabla 23. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2008, REDDA, NADP .....	185
Tabla 24. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2009, REDDA, NADP .....	186
Tabla 25. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2010, REDDA, NADP .....	187

Tabla 26. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2011, REDDA, NADP .....	188
Tabla 27. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2012, REDDA, NADP .....	189
Tabla 28. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2013, REDDA, NADP .....	190
Tabla 29. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2014, REDDA, NADP .....	191
Tabla 30. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2015, REDDA, NADP .....	192
Tabla 31. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2016, REDDA, NADP .....	193
Tabla 32. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2017, REDDA, NADP .....	194
Tabla 33. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2018, REDDA, NADP .....	195
Tabla 34. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2019, REDDA, NADP .....	196

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de formación del depósito atmosférico húmedo.....	14
Figura 2. Características de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México .....	21
Figura 3. Distribución de redes y sitios del SIMAT .....	24
Figura 4. Localización de sitios de la REDDA en la ZMCM.....	25
Figura 5. Distribución espacial de las emisiones de NO <sub>x</sub> en la ZMCM, 2018 .....	34
Figura 6. Distribución espacial de las emisiones de SO <sub>2</sub> en la ZMCM, 2018 .....	35
Figura 7. Mapa de sitios de la CAPMoN 2023.....	40
Figura 8. Mapa de sitios activos e inactivos de monitoreo de la NTN en Norteamérica .....	41
Figura 9. Área Metropolitana de Denver, Colorado .....	51
Figura 10. Ciudad de los Ángeles, California .....	55
Figura 11. Ciudad de Nueva York, Nueva York.....	59
Figura 12. Ciudad de Toronto, Canadá .....	62
Figura 13. Metodología para la evaluación de lluvia ácida en zonas urbanas de Norteamérica.....	68
Figura 14. Sistema automático de muestreo de depósito atmosférico REDDA.....	69
Figura 15. Sistema automático de muestreo de depósito atmosférico húmedo NADP .....	70
Figura 16. Etiqueta de identificación para muestras de depósito atmosférico húmedo de la REDDA.....	71
Figura 17. Sistema de filtración de las muestras de depósito atmosférico húmedo SCA-ICAYCC.....	72
Figura 18. Sistema de filtración de las muestras de depósito atmosférico húmedo, NADP .....	72
Figura 19. Potenciómetro pH, SCA-ICAYCC Metrohm 916 Ti-Touch .....	73
Figura 20. Potenciómetro de pH, NADP, Mettler S700 .....	73
Figura 21. Potenciómetro de conductividad SCA-ICAYCC HORIBA D-24 .....	74
Figura 22. Potenciómetro de conductividad, NADP, Mettler S700 HORIBA.....	74
Figura 23. Cromatógrafo de líquidos SCA-ICAYCC, Metrohm 850 Professional IC ..	75
Figura 24. Equipo cromatografía de intercambio iónico NADP, 3 Dionex Integrión ..	76
Figura 25. Equipo ICP, Agilent 5100/5110 ICP-OES, NADP.....	77
Figura 26. Equipo para determinación de amonio y ortofosfato. FIA (Flow Injection Analyzer) Lachat Instruments (Hach) QuickChem 8500 Series . NADP .....	78
Figura 27. Variación de la precipitación por estaciones de muestreo ZMCM 2003-2019 .....	86
Figura 28. Frecuencia pH ponderado anual ZMCM 2003-2019 .....	88
Figura 29. Variación del pH ponderado anual ZMCM 2003-2019 .....	89
Figura 30. Variación espacial del pH en la ZMCM 2003-2006 .....	90
Figura 31. Variación espacial del pH en la ZMCM 2007-2012 .....	91
Figura 32. Variación espacial del pH en la ZMCM 2013-2018 .....	92

Figura 33. Variación espacial del pH en la ZMCM 2019 .....	93
Figura 34. Relación de la dirección del viento con el pH de la lluvia en la ZMCM.....	94
Figura 35. Variación de la conductividad ZMCM 2003-2019 .....	95
Figura 36..Variación espacial de la conductividad en la ZMCM 2003-2008 .....	96
Figura 37.Variación espacial de la conductividad en la ZMCM 2009-2014 .....	97
Figura 38.Variación espacial de la conductividad en la ZMCM 2015-2019 .....	98
Figura 39. Composición iónica del depósito atmosférico húmedo en la ZMCM 2003-2019 .....	99
Figura 40. Variación de la concentración de $\text{NO}_3^-$ en el depósito atmosférico húmedo de la ZMCM 2003-2019.....	101
Figura 41. Variación espacial del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en la ZMCM 2003-2006. ....	102
Figura 42. Variación espacial del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en la ZMCM 2007-2012 .....	103
Figura 43. Variación espacial del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en la ZMCM 2013-2018. ....	104
Figura 44.Variación espacial del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en la ZMCM 2019. ....	105
Figura 45. Variación de la concentración de $\text{SO}_4^{2-}$ en el depósito atmosférico húmedo de la ZMCM 2003-2019.....	107
Figura 46. Variación espacial del sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en la ZMCM 2003-2008.....	108
Figura 47. Variación espacial del sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en la ZMCM 2009-2014.....	109
Figura 48. Variación espacial del sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en la ZMCM 2015-2019.....	110
Figura 49. Variación de la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ del depósito atmosférico húmedo de la ZMCM 2003-2019 .....	111
Figura 50. Variación espacial de la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ en la ZMCM 2003-2004	113
Figura 51. Variación espacial de la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ en la ZMCM 2005-2010 ..	114
Figura 52. Variación espacial de la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ en la ZMCM 2011-2016 .	115
Figura 53. Variación espacial de la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ en la ZMCM 2017-2019 .	116
Figura 54. Variación de la concentración de $\text{NH}_4^+$ del depósito atmosférico húmedo de la ZMCM 2003-2019.....	118
Figura 55. Variación espacial del amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en la ZMCM 2003-2008.....	119
Figura 56. Variación espacial del amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en la ZMCM 2009-2014.....	120
Figura 57. Variación espacial del amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en la ZMCM 2015-2019.....	121
Figura 58. Variación de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ del depósito atmosférico húmedo de la ZMCM 2003-2019 .....	122
Figura 59. Variación espacial de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la ZMCM 2003-2008..	124
Figura 60. Variación espacial de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la ZMCM 2009-2014 ..	125
Figura 61. Variación espacial de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la ZMCM 2015-2019 ..	126
Figura 62. Variación del pH ponderado anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2019.....	128
Figura 63. Variación del pH ponderado anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2010.....	130
Figura 64. Variación del pH ponderado anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2011-2019.....	131

Figura 65. Variación de la concentración $\text{SO}_4^{2-}$ anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2019.....	132
Figura 66. Variación de la concentración de $\text{SO}_4^{2-}$ anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2010.....	133
Figura 67. Variación de la concentración de $\text{SO}_4^{2-}$ anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2011-2019.....	134
Figura 68. Emisiones anuales de $\text{SO}_2$ en ciudades de Norteamérica de estudio ZMCM 2018, EPA 2017 .....	136
Figura 69. Variación de la concentración $\text{NO}_3^-$ del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2019.....	137
Figura 70. Variación de la concentración de $\text{NO}_3^-$ anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2010.....	138
Figura 71. Variación de la concentración de $\text{NO}_3^-$ anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2011-2019.....	139
Figura 72. Emisiones anuales de $\text{NO}_x$ en ciudades de Norteamérica de estudio ZMCM 2018, EPA 2017 .....	141
Figura 73. Variación de la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2019.....	143
Figura 74. Variación de la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2010.....	144
Figura 75. Variación de la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2011-2019.....	145
Figura 76. Variación de la concentración de $\text{NH}_4^+$ del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2019.....	146
Figura 77. Variación de la concentración de $\text{NH}_4^+$ anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2010.....	147
Figura 78. Variación de la concentración de $\text{NH}_4^+$ anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2011-2019.....	148
Figura 79. Emisiones anuales de $\text{NH}_3$ en ciudades de Norteamérica de estudio, ZMCM 2018, EPA 2017 .....	149
Figura 80. Variación de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2019.....	151
Figura 81. Variación de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2010.....	152
Figura 82. Variación de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2011-2019.....	153

## ABREVIATURAS

**AMNet:** Atmospheric Mercury Network

**AMoN:** Ammonia Monitoring Network

**APN:** Air and Precipitation Network

**Ca<sup>2+</sup>:** ion calcio

**CANSAP:** Canadian Network for Sampling Precipitation

**CAPMoN:** Canadian Air and Precipitation Monitoring Network

**Cl<sup>-</sup>:** ion cloruro

**CO<sub>2</sub>:** dióxido de carbono

**ECCE:** Environment and Climate Change Canada

**EIA:** Energy Information Administration

**FORF:** Field Observer Report Form

**H<sub>2</sub>O:** agua

**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:** ácido sulfúrico

**HNO<sub>3</sub>:** ácido nítrico

**ICAYCC:** Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

**K<sup>+</sup>:** ion potasio

**MDN:** Mercury Deposition Network

**Mg<sup>2+</sup>:** ion magnesio

**MLN:** Mercury Litterfall Network

**Na<sup>+</sup>:** ion sodio

**NADP:** National Atmospheric Deposition Program

**NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/ NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:** relación amonio/nitrato

**NH<sub>4</sub><sup>+</sup>:** ion amonio

**NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:** ion nitrato

**NO<sub>x</sub>:** óxidos de nitrógeno

**NTN:** National Trends Network

**O<sub>2</sub>:** oxígeno

**OMS:** Organización Mundial de la Salud

**pH:** potencial de hidrógeno

**PICCA:** Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica  
**PROAIRE:** Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la ZMCM  
**REDDA:** Red de Depósito Atmosférico  
**SEDEMA:** Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México  
**SO<sub>2</sub>:** dióxido de azufre  
**SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>:** ion sulfato  
**SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> :** relación sulfato/nitrato  
**UNEP:** Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente  
**US EPA:** United States Environmental Protection Agency  
**WMO:** World Meteorological Organization  
**ZMCM:** Zona Metropolitana de la Ciudad de México



## RESUMEN

Anualmente a nivel mundial se emiten a la atmósfera millones de toneladas de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) como resultado de la quema de combustibles fósiles y de otras fuentes de alta temperatura, estos gases reaccionan con el oxígeno, agua y otros oxidantes presentes en la atmósfera para formar compuestos ácidos, cuando estos compuestos caen a la superficie terrestre disueltos en lluvia, se conoce como “lluvia ácida”, provocando daños en cuerpos de agua, cultivos, ecosistemas, materiales y estructuras.

En este trabajo se evaluaron los parámetros fisicoquímicos del depósito atmosférico húmedo en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) para su comparación con otras zonas urbanas de Norteamérica (Los Ángeles, Nueva York y el Área Metropolitana de Denver) limitando el periodo de estudio del 2003-2019, debido a la pandemia por COVID-19, la cual impidió el muestreo del depósito atmosférico húmedo y obtención de datos para años posteriores al 2019.

Se llevó a cabo trabajo en laboratorio para la inducción a las técnicas de análisis fisicoquímico de muestras de depósito atmosférico húmedo y la validación de los resultados obtenidos, paralelo a ello se realizó la caracterización y recopilación de información acerca del depósito atmosférico húmedo perteneciente a la REDDA y al NADP para los sitios de Norteamérica elegidos, realizando un estudio que implicó el cálculo de los promedios ponderados anuales de cada parámetro fisicoquímico analizado en las muestras, para posteriormente realizar una comparación gráfica entre sitios.

De este análisis se obtuvo que tanto la ZMCM, como Nueva York y Los Ángeles presentaron medias del pH general en el depósito atmosférico húmedo correspondientes a lluvia ácida, mientras que, en el Área Metropolitana de Denver la media indicó un pH de la precipitación por encima de 5.6, lo que significa que no corresponde a lluvia ácida.

Se obtuvieron resultados que muestran que, el valor obtenido de la media de la concentración del ion  $\text{SO}_4^{2-}$  en la ciudad de los Ángeles, Nueva York y el Área Metropolitana de Denver fueron inferiores a la media de la ZMCM debido a la existencia del corredor industrial Tula-Vito Apasco donde la refinería, central eléctrica y otras grandes industrias, ubicadas en las afueras al norte de la ZMCM, siguen consumiendo combustibles fósiles con alto contenido de azufre arrastrando tanto  $\text{SO}_2$  como  $\text{SO}_4^{2-}$  hacia la ZMCM.

Al igual que con el ion sulfato, la media de las concentraciones del  $\text{NO}_3^-$  en las zonas urbanas de los Estados Unidos que se estudiaron, fueron inferiores a la media de la ZMCM, esto debido principalmente a menores emisiones de  $\text{NO}_x$  en las regiones estudiadas de los Estados Unidos con respecto a la ZMCM.

La relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ , indicó mayor presencia del ion sulfato en el depósito atmosférico húmedo de la ZMCM y Nueva York con valores de 1.47 y 1.04 respectivamente, mientras que en el Área Metropolitana de Denver la relación fue de 0.15 y en Los Ángeles de 0.70 lo que indica que hubo mayor presencia de  $\text{NO}_3^-$  ante  $\text{SO}_4^{2-}$ , es por esta razón que finalmente se propusieron las estrategias de prevención control y minimización para la ZMCM con mayor enfoque a la reducción de emisiones de  $\text{SO}_2$ , precursor del  $\text{SO}_4^{2-}$ , principalmente en el corredor Industrial Tula-Vito-Apasco.

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Justificación

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) ha representado desde su fundación un gran reto en materia ambiental, siendo la contaminación atmosférica uno de los principales problemas a enfrentar. Una de las consecuencias relevantes de la contaminación atmosférica es la presencia de lluvia ácida en gran parte de la ciudad, esto se refiere al depósito atmosférico húmedo con características ácidas, que surgen por la presencia en el aire de los contaminantes criterio: dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), los cuales reaccionan formando partículas de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), que dan como resultado el pH característico menor a 5.6 de la lluvia ácida (NADP, 2023a). La importancia de este tipo de depósito atmosférico es debido a sus efectos corrosivos sobre los materiales y las alteraciones que causa en el equilibrio de ecosistemas acuáticos y terrestres (Mehta, 2010).

En la actualidad la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) de la Ciudad de México, se encarga del muestreo de depósito atmosférico húmedo y seco en la ZMCM y desde el año 2003 se han evaluado las características de este depósito en colaboración con la Sección de Contaminación Ambiental del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (SCA-ICAYCC), con el propósito de conocer la composición y algunas propiedades del agua de lluvia, proteger materiales, ecosistemas forestales y acuáticos, entre otros receptores de lluvia ácida.

Por otro lado, la National Trends Network (NTN) perteneciente al National Atmospheric Deposition Program (NADP), es la única red que proporciona un registro a largo plazo de las características fisicoquímicas de precipitaciones en los Estados Unidos y otros sitios de Norteamérica, lo que ha permitido identificar que un gran número de lagos en regiones del norte de Estados Unidos presentan un pH ácido, provocando una gran preocupación por los impactos adversos en los ecosistemas forestales y acuáticos (Williston et al., 2016).

Partiendo de la problemática y efectos adversos que causa la lluvia ácida en el medio ambiente, se justificó llevar a cabo el desarrollo de esta investigación para evaluar la

composición química de la lluvia en la ZMCM obtenida en las estaciones de monitoreo de la REDDA así como en el sitio de monitoreo del ICAYCC, para la posterior comparación de los resultados obtenidos con sitios urbanos pertenecientes a Nueva York, Los Ángeles y Denver en Estados Unidos, mediante las colaboraciones con instituciones como el NADP y la United States Environmental Protection Agency (US EPA), con el fin de contar con información útil para evaluar estrategias de prevención, minimización y control de precursores contaminantes de lluvia ácida en los distintos centros urbanos estudiados y determinar su implementación, así como su posible efectividad en la ZMCM.

## 1.2 Hipótesis

La relación de  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  será mayor en la ZMCM comparada con otras ciudades de Norteamérica, debido a que en México se siguen consumiendo combustibles fósiles con un alto contenido de azufre. No obstante, que en la ZMCM se ha prohibido su consumo, existen fuentes de emisión importantes de  $\text{SO}_2$  externas viento arriba desde dónde se arrastra parte de este contaminante, así como ion  $\text{SO}_4^{2-}$  hacia la zona metropolitana.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Evaluar los parámetros fisicoquímicos del depósito atmosférico húmedo en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) para su comparación con otras zonas urbanas de Norteamérica.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Interpretar la información del muestreo del depósito atmosférico húmedo de la ZMCM, de acuerdo con el programa de aseguramiento y control de calidad establecido por el National Atmospheric Deposition Program (NADP) y la World Meteorological Organization (WMO).
- Evaluar la información generada por la Red de Depósito Atmosférico de la Ciudad de México (REDDA) del año 2003 al 2022, correspondiente a la composición química de iones (sodio  $[Na^+]$ , amonio  $[NH_4^+]$ , potasio  $[K^+]$ , magnesio  $[Mg^{2+}]$ , calcio  $[Ca^{2+}]$ , sulfato  $[SO_4^{2-}]$ , cloruro  $[Cl^-]$ , y nitrato  $[NO_3^-]$ ), pH y conductividad, así como las relaciones  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  y  $NH_4^+/NO_3^-$ , del depósito atmosférico húmedo en la ZMCM, con base en el convenio de colaboración UNAM-SEDEMA y en el sitio de muestreo localizado en el ICAYCC.
- Identificar las características del depósito atmosférico húmedo en zonas urbanas de Norteamérica (Denver, Los Ángeles y Nueva York en los Estados Unidos, así como Toronto en Canadá), del año 2003-2022 y compararlas con la ZMCM.
- Proponer estrategias de implementación en la Ciudad de México para la prevención, minimización y control de contaminantes de precursores de lluvia ácida ( $SO_2$  y  $NO_x$ ), con base en la comparación y evaluación de los datos obtenidos en zonas urbanas de Norteamérica.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

## 2.1 Contaminación atmosférica

Se define como contaminación atmosférica a la presencia de una o más sustancias químicas o factores que, en concentraciones suficientemente altas en el aire pueden causar daño a los seres humanos, ecosistemas o materiales. Tales sustancias o condiciones físicas (como el calor excesivo o el ruido) son consideradas contaminantes atmosféricos (US EPA, 2022d).

Según el origen de los contaminantes estos pueden dividirse en dos tipos:

- Contaminantes primarios: Que provienen directamente de fuentes de emisión como el plomo, monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y partículas.
- Contaminantes secundarios: Que son originados en el aire por la interacción entre dos o más contaminantes primarios o por sus reacciones con otros componentes de la atmósfera, estos son el ozono, peroxiacetil-nitrato, sulfatos, nitratos y el ácido sulfúrico (SEMARNAT, 2018).

En términos de calidad del aire, los contaminantes normados a los que se les ha establecido un límite máximo permisible de concentración en el aire ambiente, para proteger la salud humana y el bienestar de la población, se denominan contaminantes criterio, si no lo son, entonces son nombrados contaminantes no criterio.

Los contaminantes atmosféricos antes mencionados pueden provenir de diferentes tipos de fuentes que se clasifican a continuación:

- Fuentes de área: aquellas instalaciones emisoras de contaminantes, pequeñas, numerosas y dispersas, que en conjunto pueden llegar a generar emisiones considerables, se incluyen emisiones domésticas, de combustibles, de residuos orgánicos, de solventes, ganaderas, agrícolas y comercios y servicios no regulados.



- Fuentes naturales: cualquier proceso natural en la vegetación y suelos generador de emisiones como erosión eólica, incendios forestales y erupciones volcánicas.
- Fuentes móviles: este tipo de fuente considera a cualquier forma de transporte y vehículos automotores.
- Fuentes fijas o puntuales: estas se caracterizan por ubicarse en un punto fijo y que, al ejecutar operaciones o procesos industriales, comerciales o de servicios, generan emisiones contaminantes.

La contaminación atmosférica es de gran importancia pues impacta negativamente en la salud de la población, y de la biodiversidad, su efecto puede verse reflejado en la disminución de indicadores como la calidad de vida, reducción en la productividad y la generación de impactos no deseados en la economía.

En el mundo, el 99% de la población respira aire que supera los límites de contaminantes recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), los datos indican que la exposición es mayor en los países de ingresos medianos y bajos (OMS, 2022). En la ZMCM, según el último Informe Nacional de Calidad del Aire del año 2020, el número de días en que se incumplió al menos una norma de salud ambiental, a nivel de toda la zona metropolitana, fue de 262 lo que equivale al 72% del año. El contaminante que con mayor frecuencia superó su límite superior fue el ozono (64% de los días del año), seguido de las  $PM_{10}$  (21%),  $SO_2$  (12%) y las  $PM_{2.5}$  (4%) (INECC, 2021).

Adoptar políticas e inversiones de apoyo al uso de medios de transporte menos contaminantes, la mejora de la eficiencia energética de las viviendas, la generación eléctrica, la industria, y una mejor gestión de los desechos municipales han sido opciones consideradas para reducir algunas de las principales fuentes de contaminación del aire.

## 2.2 Depósito atmosférico

El depósito atmosférico hace referencia a los contaminantes como partículas, aerosoles, gases y otros compuestos que se encuentran en la atmósfera, estos son generados por fuentes naturales o antropogénicas y se depositan en la superficie terrestre o en el agua desde el aire, (NJDEP, 2009) por algún tipo de precipitación (depósito húmedo) o por sedimentación por gravedad (depósito seco).

Los gases y las partículas contaminantes en el aire sufren diversas transformaciones físicas y químicas, las cuales tienen un impacto importante en el destino y comportamiento en el medio ambiente, ya que existen varios parámetros físicos, químicos, biológicos y meteorológicos que afectan el proceso de formación del depósito atmosférico.

El efecto primario del depósito atmosférico es una limpieza del aire, el segundo es el impacto ambiental que causa este puede ser perjudicial o beneficioso, por ejemplo, el depósito de ozono en cultivos podría causar un efecto nocivo; en el caso de compuestos nitrogenados, estos pueden ser beneficiosos o dañinos, por un lado, pueden considerarse como un transporte adicional de nutrientes a las plantas, pero en exceso causan eutrofización y en consecuencia deficiencia de oxígeno en ecosistemas acuáticos (Pacyna, 2008). Otro ejemplo muy importante de los efectos nocivos que causa el depósito atmosférico en el ambiente es la acidificación de la precipitación, a menudo llamada lluvia ácida.

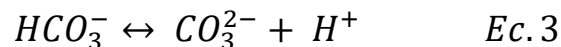
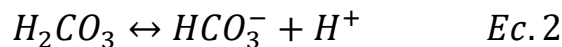
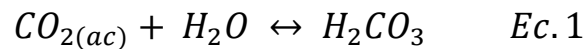
## 2.3 Depósito atmosférico húmedo: Lluvia ácida

Anualmente se emiten a la atmósfera millones de toneladas de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) resultado de la quema de combustibles fósiles y otras fuentes de alta temperatura, estos gases reaccionan con el oxígeno, agua y otros oxidantes presentes en la atmósfera para formar compuestos ácidos, que pueden transportarse a cientos de kilómetros mediante el viento, incluso algunas veces sobrepasando fronteras estatales y nacionales (US EPA, 2022b). El depósito atmosférico ácido se da cuando estos compuestos caen a la superficie terrestre ya sea

disueltos en lluvia, nieve, niebla o granizo, o bien de forma seca, como partículas sólidas y gaseosas que se depositan durante periodos sin precipitación.

Comúnmente el depósito atmosférico húmedo se conoce como “lluvia ácida”, este término fue acuñado por primera vez en el año de 1850 por Robert Angus Smith quién se dedicaba a investigar la química del aire en las industrias británicas de ese año, Smith, demostró que estas fábricas emitían hollín y otras sustancias que acidificaban aún más la lluvia (Granados et al., 2010).

Por otro lado, es indispensable mencionar que la lluvia en su estado natural se considera ya como una sustancia de carácter ácido, generado por el equilibrio existente con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera y la consecuente formación del ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), el cual es un ácido débil. Si se conoce la concentración de  $\text{CO}_2$  presente en la atmósfera, es posible realizar una estimación del valor de pH del agua de lluvia, considerando la constante de saturación del  $\text{CO}_2$  en el agua y los siguientes equilibrios químicos:



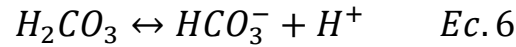
En el equilibrio:

$$K_{a_1} = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{H}_2\text{CO}_{3(ac)}} = 4.47 \times 10^{-7} \quad \text{A } 25^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 4}$$

$$K_{a_2} = \frac{[\text{CO}_3^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]} = 4.68 \times 10^{-11} \quad \text{A } 25^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 5}$$

(Masters & Wendell, 2008)

De los equilibrios anteriores la especie predominante es el  $\text{HCO}_3^-$ , porque la segunda constante de ionización es muy pequeña en comparación con la primera, por lo que se considera:



Inicio	$C_0$	-	-
En equilibrio	$C_0 - \alpha$	$\alpha$	$\alpha$

Despreciando  $\alpha$  con respecto a la  $C_0$

$$K a_1 = \frac{[\alpha]^2}{[C_0]} = 4.47 \times 10^{-7} \quad \text{Ec. 7}$$

Entonces, si “ $\alpha$ ” es la concentración del ion hidronio  $[\text{H}^+]$  y  $[C_0]$  la concentración del ácido carbónico que se forma:

$$[\alpha^2] = 4.47 \times 10^{-7} [C_0] \quad \text{Ec. 8}$$

$$(4.47 \times 10^{-7})C_0 - \alpha^2 = 0 \quad \text{Ec. 9}$$

Considerando que la concentración promedio de  $\text{CO}_2$  atmosférico en los últimos años es de 400 ppm (NOAA, 2022):

$$\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = \frac{(\text{ppm})(M)}{24.465} \quad \text{Ec. 10}$$

a  $25^\circ\text{C}$  y  $1 \text{ atm}$   
(Masters & Wendell, 2008)

$$\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \text{CO}_2 = \frac{(400 \text{ ppm})(44)}{24.465} = 719.4 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \text{CO}_2 \quad \text{Ec. 11}$$

$$719.4 \frac{mg}{m^3} \left( \frac{0.001 m^3}{1 L} \right) \left( \frac{1g}{1000 mg} \right) \left( \frac{1 mol CO_2}{44 g} \right) = 1.635 \times 10^{-5} \frac{mol CO_2}{L} \quad Ec. 12$$

Y suponiendo que todo el CO<sub>2</sub> disuelto en agua de lluvia forma H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> se resuelve la Ec. 9:

$$[\alpha^2] = \left( 4.47 \times 10^{-7} \frac{mol}{L} \right) [C_0] \quad Ec. 13$$

$$[\alpha^2] = \left( 4.47 \times 10^{-7} \frac{mol}{L} \right) \left( 1.635 \times 10^{-5} \frac{mol}{L} \right) \quad Ec. 14$$

$$[\alpha] = [H^+] = 2.703 \times 10^{-6} \frac{mol}{L} \quad Ec. 15$$

$$pH = -\log[H^+] \quad Ec. 16$$

$$pH = -\log \left[ 2.703 \times 10^{-6} \frac{mol}{L} \right] \quad Ec. 17$$

$$pH = 5.57 \quad Ec. 18$$

El valor final obtenido del pH natural de la lluvia (Ec. 18) es de 5.57 valor que se aproxima a 5.6, es por ello por lo que se considera que un valor de pH menor a 5.6 en la lluvia hace que esta se considere como “lluvia ácida”.

Cuando los valores del pH de la lluvia son superiores a 5.6, se puede atribuir a la presencia de depósito seco y la disolución de partículas con características alcalinas, como los carbonatos, pero cuando los óxidos de azufre y de nitrógeno intervienen en la química de la atmósfera y en su equilibrio, causan que el pH de la lluvia disminuya a menos de 5.6, generalmente la lluvia ácida suele tener un pH entre 4.2 y 4.4 (US EPA, 2022j).

El mecanismo de la formación del depósito atmosférico húmedo en forma de lluvia (Figura 1), se basa en el proceso en el que el dióxido de azufre gaseoso ( $\text{SO}_2$ ), los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), y los óxidos de carbono, reaccionan con el agua, teniendo como acelerador de las reacciones a la luz solar, es aquí, cuando los óxidos de azufre se convierten en ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), los óxidos de nitrógeno en ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y el dióxido de carbono en ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), de esta manera la concentración de iones hidronio ( $\text{H}^+$ ) en la lluvia aumenta significativamente y consecuentemente el pH baja aún más.

La lluvia ácida se forma a través de las siguientes reacciones fotoquímicas (Granados et al., 2010)

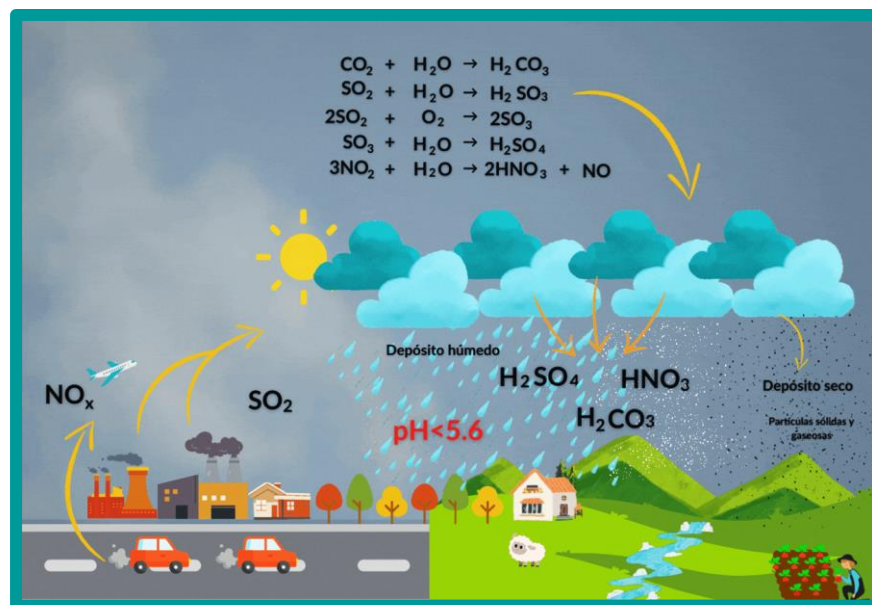
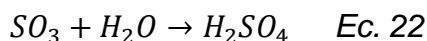
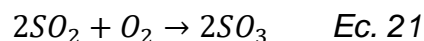
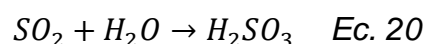
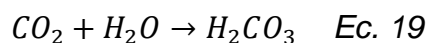


Figura 1. Esquema de formación del depósito atmosférico húmedo

## 2.4 Contaminantes precursores de lluvia ácida

Los principales contaminantes precursores de la lluvia ácida son el  $\text{SO}_2$  y los  $\text{NO}_x$ , estos se producen principalmente por fuentes antropogénicas como la quema de combustibles fósiles, en procesos de generación de energía, en el uso de vehículos y equipo pesado, en refinerías de petróleo y otras industrias, además de fuentes naturales, aunque en menor proporción, como las emisiones volcánicas, fuentes termales e incendios forestales.

### 2.4.1 Dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )

El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), es un gas tóxico, incoloro, de mal olor, altamente soluble en agua, forma parte de un grupo más grande de sustancias químicas conocidas como óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ). Este compuesto puede crear contaminantes secundarios una vez que se libera al aire como aerosoles de sulfato, partículas y lluvia ácida (US MPCA, 2022).

El  $\text{SO}_2$  se genera y emite a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles como el carbón, petróleo, diésel y otros materiales que contienen azufre. Las fuentes de emisión de este contaminante incluyen plantas de energía e instalaciones de procesamiento para fundición de metales, pero también es un subproducto de fuentes naturales como la actividad volcánica.

Por su efecto contaminante el  $\text{SO}_2$  puede dañar el sistema respiratorio y dificultar la respiración aún en exposiciones a corto plazo, personas con problemas de asma, especialmente niños son mayormente sensibles a los efectos del  $\text{SO}_2$  (US EPA, 2022i). Las emisiones atmosféricas con altas concentraciones de  $\text{SO}_2$ , llevan a la generación de otros óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), estos con otros compuestos de la atmósfera y producen partículas de un tamaño pequeño que contribuyen a la contaminación atmosférica por partículas (PM), este tipo de contaminantes entran a los pulmones por medio de la respiración y en una cantidad suficiente pueden desencadenar problemas respiratorios.

Con fines de cuidar la salud de las personas en México, la NOM-022-SSA1-2019 establece los límites permisibles de concentración del  $\text{SO}_2$  en aire ambiente, fijando un valor admitido de 0.075 ppm equivalente a  $196.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como valor límite de 1 hora y 0.040 ppm igual a  $104.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como valor límite de 24 horas. (SSA, 2019). Sin embargo, de acuerdo con las directrices mundiales de la Organización Mundial de la Salud, las cuáles fueron actualizadas por última vez en el año 2021, se establece que para periodos de 24 horas el valor permitido de  $\text{SO}_2$  es de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (OMS, 2021).

### 2.4.2 Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )

El nitrógeno se encuentra en la atmósfera en diferentes formas químicas, la primera de ellas es el llamado nitrógeno no reactivo ( $\text{N}_2$ ), este es relativamente inerte y compone alrededor del 80% del aire que respiramos, por otro lado, el nitrógeno reactivo ( $\text{Nr}$ ) está conformado por todas las demás formas de nitrógeno a excepción del  $\text{N}_2\text{O}$  y hace referencia a todos los compuestos de nitrógeno, química, fotoquímica y biológicamente activos (Walker & Beachley, 2019).

En la actualidad, la familia de los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) está formada por siete compuestos, óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), monóxido de nitrógeno/óxido nítrico ( $\text{NO}$ ), dióxido de dinitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}_2$ ), trióxido de dinitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}_3$ ), dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), tetróxido de dinitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}_4$ ), y pentóxido de dinitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}_5$ ), pero los únicos que son considerados contaminantes atmosféricos importantes son el monóxido de nitrógeno ( $\text{NO}$ ) y el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) (Masters & Wendell, 2008).

Las emisiones de  $\text{NO}_x$  a la atmósfera provienen principalmente de los automóviles y otras fuentes móviles que contribuyen con alrededor de la mitad de las emisiones de estos compuestos, además calderas de las plantas termoeléctricas producen alrededor del 40% de las emisiones de  $\text{NO}_x$  provenientes de fuentes estacionarias y se añaden emisiones sustanciales provenientes de fuentes antropogénicas tales como las calderas industriales, incineradores, turbinas de gas, motores estacionarios de diésel y de encendido por chispa, fábricas de hierro y acero, manufactura de cemento, de vidrio, refinerías de petróleo, y manufactura de ácido nítrico.



Las fuentes naturales de  $\text{NO}_x$  incluyen los relámpagos, incendios forestales, incendios de pastos, árboles y arbustos. Otra fuente son los procesos biológicos de los suelos, en los que se produce la emisión de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) por parte de los microorganismos (US EPA, 1999).

El dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) se usa como contaminante indicador para el grupo más grande de los  $\text{NO}_x$ , este un gas café rojizo, tóxico, irritante, precursor de la formación de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) el cual está presente en la lluvia ácida, una de las más grandes importancias de este gas es porque se le atribuye su participación como precursor de smog fotoquímico, pues al combinarse con otros contaminantes atmosféricos influye en las reacciones de formación de ozono.

El  $\text{NO}_2$  es el compuesto de mayor importancia por sus efectos en la salud dentro de los  $\text{NO}_x$ , este puede ser de origen primario, a partir de la oxidación del nitrógeno atmosférico durante la combustión, o secundario, por la oxidación en la atmósfera del  $\text{NO}$ . Respirar aire con concentraciones altas de  $\text{NO}_2$  causa irritación de las vías respiratorias, además, si se tienen exposiciones en periodos cortos se pueden agravar las enfermedades respiratorias, en particular el asma, provocando síntomas como tos, sibilancias e incluso dificultad para respirar, lo que desencadena en hospitalizaciones y visitas a salas de emergencia. Por otra parte, el  $\text{NO}_2$  interactúa con el agua, el oxígeno y otras sustancias químicas en la atmósfera para formar lluvia ácida, dañando ecosistemas sensibles como lagos y bosques (US EPA, 2022).

En México, de acuerdo con la NOM-023-SSA1-2021 que establece el valor permisible del  $\text{NO}_2$  en aire ambiente, con el fin de proteger la salud de la población, la concentración de este contaminante criterio debe estar debajo de 0.106 ppm, lo que es equivalente a  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para periodos de una hora y de 0.021 ppm o  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  anual (SSA, 2021), mientras que la OMS establece en sus directrices mundiales que para periodos de 24 horas el valor permitido de  $\text{NO}_2$  es de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y anualmente de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (OMS, 2021).

## 2.5 Efectos de la lluvia ácida

La lluvia ácida es uno de los fenómenos de mayor relevancia en el mundo que se deriva de la contaminación atmosférica, su presencia causa afectaciones en los ecosistemas del planeta, este tipo de depósito atmosférico húmedo llega a la superficie terrestre y a cuerpos acuáticos mediante los eventos pluviales o por las escorrentías de las zonas aledañas (Xu & Ji, 2001).

Los efectos y consecuencias más importantes que tiene la lluvia ácida son:

- La acidificación de lagos y arroyos con baja capacidad de amortiguamiento. Los lagos que presentan pH entre 6 y 8 pueden mitigar mejor el efecto ácido de la lluvia; mientras que, aquellos que son naturalmente más ácidos tienen menor capacidad de hacerlo, afectando el equilibrio de ecosistemas y causando disminución de las poblaciones de invertebrados acuáticos, así como del peso y talla de los peces presentes, lo que impacta el éxito reproductivo y la abundancia de las aves que se alimentan de ellos. Por otro lado, las escorrentías pueden arrastrar elementos tóxicos como el aluminio, el cual agrava el problema de la acidificación de las aguas porque afecta directamente a los organismos (SEMARNAT, 2013).
- En ecosistemas terrestres, la lluvia ácida causa la lixiviación de nutrientes como el magnesio y calcio del suelo antes de que las plantas puedan aprovecharlos, también provoca daños y alteraciones fotosintéticas en las hojas y cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo, incluso permite que el aluminio se escape al suelo, lo cual hace difícil que los árboles puedan absorber agua (Saavedra et al., 2003). Los árboles que se hallan en regiones montañosas muy elevadas, tales como piceas y abetos, corren mayor riesgo por estar expuestos a las nubes y la niebla ácidas, estas disuelven los nutrientes importantes que los árboles tienen en sus hojas y agujas, esta pérdida de nutrientes disminuye la resistencia de los árboles y los bosques a los daños causados por infecciones e insectos, y también por el frío del invierno (US EPA, 2022a).

- En los materiales, la lluvia ácida puede dañar estatuas, edificios, vehículos y otras estructuras artificiales esto es porque las partículas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{HNO}_3$  presentes, corroen el metal y hacen que la pintura y la piedra se deterioren más rápidamente, generando problemas de materiales dañados que necesitan ser reparados o reemplazados, lo que conlleva un aumento en los costos de mantenimiento, así como pérdidas de patrimonios culturales (US EPA, 2022f).
- En la salud humana los efectos son indirectos, pues la acidificación de aguas subterráneas, ríos y lagos que se utilizan para obtener agua potable, provoca la disolución de metales tóxicos como el aluminio, cadmio y plomo a un pH inferior a 5, esto hace que se vea afectado el abastecimiento de agua potable y que estos metales se incorporen a las cadenas alimentarias que terminan en última instancia en el hombre (IDEAM, 2021).

Actualmente se han redoblado esfuerzos alrededor del mundo para disminuir las emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida, con el fin común de proteger ecosistemas y la salud de las personas mejorando la calidad del aire que respiramos.

## CAPÍTULO 3. SITIOS DE ESTUDIO

### 3.1 Zona Metropolitana de la Ciudad de México

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se encuentra en la región central de la República Mexicana, ubicada sobre los 19°20' de Latitud Norte y 99°05' de Longitud Oeste, forma parte de la cuenca atmosférica del Valle de México, con una elevación promedio de 2,240 msnm (SEDEMA, 2002). De acuerdo con las delimitaciones mexicanas, la ZMCM, está integrada por 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca en el Estado de Hidalgo, en total comprende una superficie de 7,866.1 km<sup>2</sup> y cuenta con una población de 21.69 millones de habitantes (Figura 2) (SEDEMA, 2021).

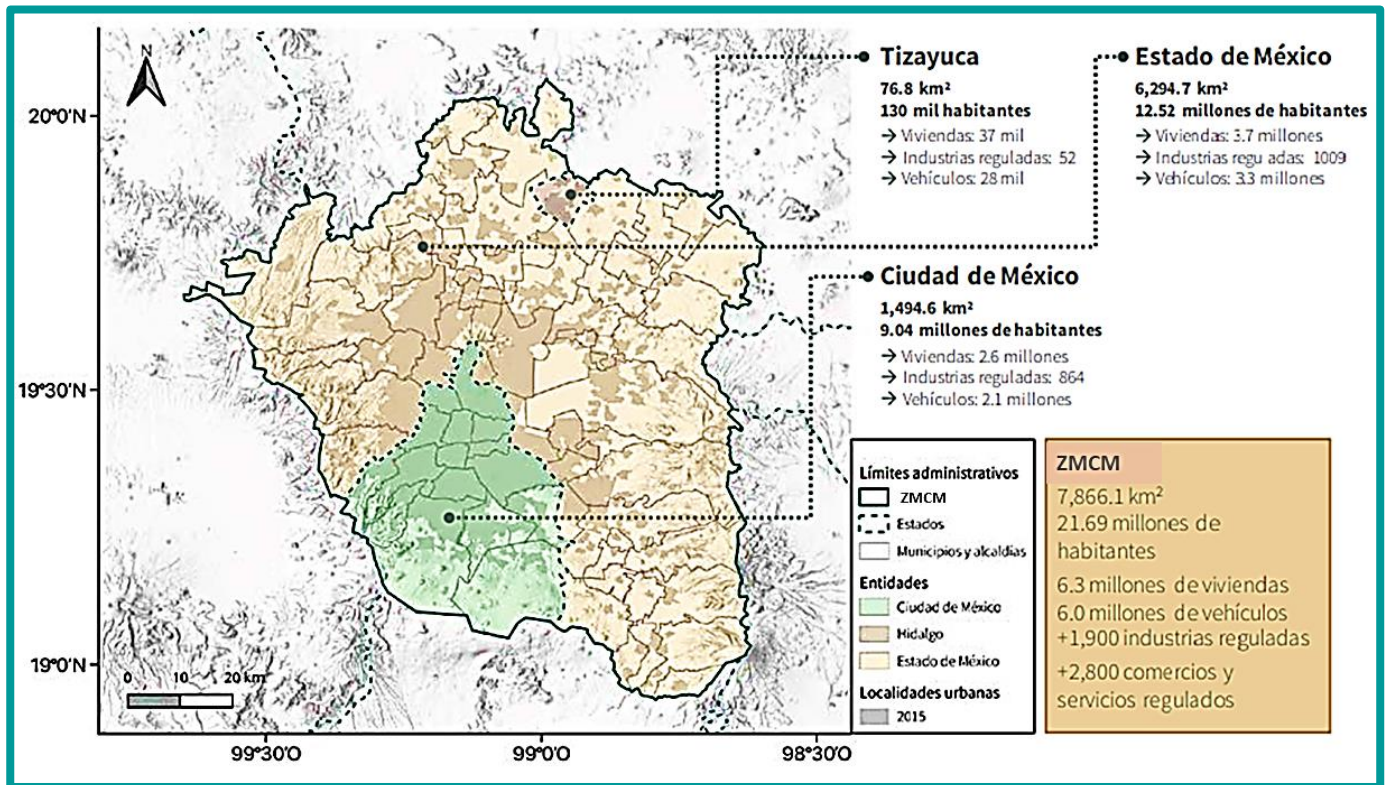


Figura 2. Características de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. (SEDEMA, 2021)

En la ZMCM, la calidad del aire se ve influenciada por diversas características como el relieve y el clima, pero también variables demográficas, económicas, urbanas y sociales, como lo son:

- El hecho de que la cuenca de la ZMCM está delimitada por sistemas montañosos, al sur se encuentra la Sierra del Ajusco-Chichinautzin, al oeste la Sierra de las Cruces y al este se ubica la Sierra Nevada, este tipo de relieve forma una barrera física que no permite una adecuada circulación del viento y una limitación en la dispersión de los contaminantes atmosféricos (SEDEMA et al., 2021), y aunque hay entradas de aire al norte y sureste de la región, los vientos que predominan soplan desde el norte y noreste; regiones desde donde se arrastra la contaminación hacia el sur de la región.
- Los sistemas anticiclónicos que afectan a la región durante una gran parte del año generan condiciones de estabilidad atmosférica o bien una especie de cápsulas de aire inmóvil lo que inhibe la circulación del aire y la dispersión de contaminantes.
- La existencia de diferentes temporadas climatológicas durante el año. La **temporada seca-fría** presente de noviembre a febrero en la que las temperaturas bajas se combinan con sistemas anticiclónicos y propician la formación de inversiones térmicas, formando una capa de aire caliente sobre una fría impidiendo el movimiento del aire y dispersión de contaminantes. De marzo a mayo se da la **temporada seca-caliente**, caracterizada por el aumento de temperatura, mayor radiación solar, falta de nubes y estabilidad atmosférica, estos factores hacen a la atmósfera foto-reactiva, favoreciendo reacciones químicas entre compuestos del aire. Finalmente, la **temporada húmeda**, que tiene inicio en las últimas semanas de mayo y termina en las primeras de octubre, durante esta temporada existe una entrada de aire cálido y húmedo procedente del Océano Pacífico, el Mar Caribe y el Golfo de México, favoreciendo el movimiento ascendente del aire y la dispersión de los contaminantes, además, hay un incremento de la precipitación, ayudando a remover la contaminación atmosférica pero registrando impactos negativos por el depósito atmosférico húmedo con características ácidas (SEDEMA et al., 2021).

- La ZMCM, es el centro económico, financiero, cultural y social del país, generador del 23% del producto interno bruto (PIB) nacional, se registran más de 77,000 establecimientos industriales en la zona, que generan contaminantes por quema de combustibles fósiles, uso de solventes y algunos procesos productivos específicos (INEGI, 2019).

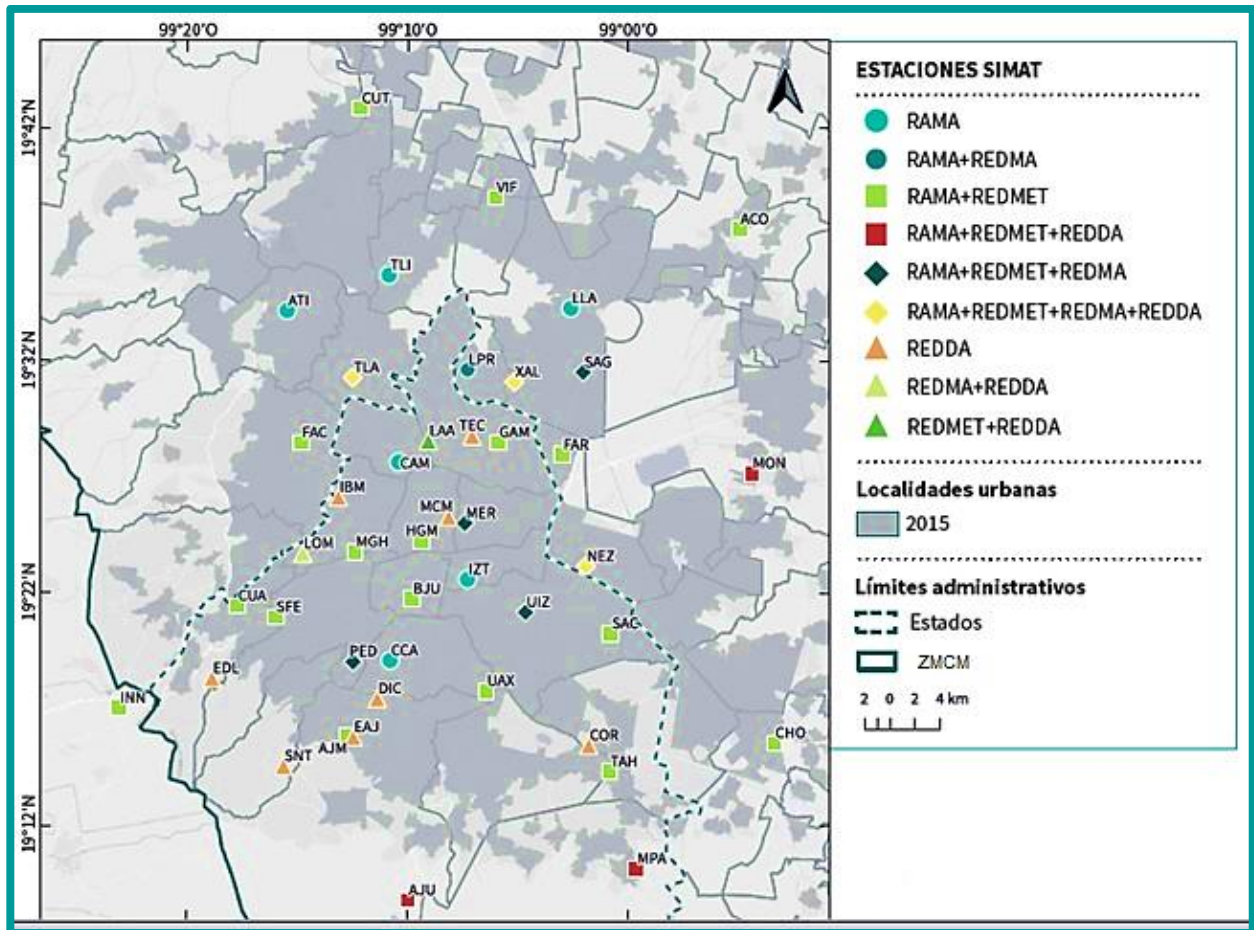
Por último, algunas de las variables meteorológicas en la ZMCM, son temperatura de 17.2°C, precipitación acumulada de 565.3 mm, 53.5% de humedad relativa, 2.1 m/s para la variable de velocidad del viento y 585 mmHg de presión barométrica, todos estos valores representan el promedio anual de acuerdo con el último Informe Anual de Calidad del Aire de la ZMCM (SEDEMA, 2022).

### 3.1.1 Sistema de monitoreo atmosférico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

La concentración de contaminantes atmosféricos en la ZMCM ha alcanzado niveles que afectan la salud humana y el medio ambiente, por esto, el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) del Gobierno de la Ciudad de México, es una herramienta indispensable en la evaluación de la calidad del aire de la ZMCM, este sistema cuenta actualmente con 44 sitios de monitoreo en operación (Figura 3), divididos en 4 subredes:

- **La Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)**, la cual se encarga de recolectar partículas suspendidas, así como de su análisis gravimétrico y determinar metales pesados.
- **La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)**, que es la responsable de las mediciones de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono, monóxido de carbono, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.
- **La Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)**, que se encarga de la medición de las variables meteorológicas de superficie.

- **La Red de Depósito Atmosférico (REDDA)**, que realiza la recolección de muestras de depósito seco (polvo sedimentable) y depósito húmedo (lluvia, granizo, nieve y rocío) (SIMAT, 2021).



*Figura 3. Distribución de redes y sitios del SIMAT (SEDEMA et al., 2021)*

La información generada por el SIMAT es de ayuda y relevancia para estudiar tendencias históricas de los niveles de contaminación, así como para la evaluación de estrategias en la mejora de la calidad del aire, pero también para evaluar el cumplimiento de los Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental de los contaminantes criterio.



### 3.1.1.1 Red de Depósito Atmosférico (REDDA)

En la década de los 80's se realizaron las primeras investigaciones sobre la presencia de la lluvia ácida en la ZMCM, así como de su caracterización y efectos en la región, ya para el año 1987 se dio inicio al monitoreo sistematizado, pero fue hasta el 2001 cuando se integró sólidamente la Red de Depósito Atmosférico (REDDA), y posteriormente se integró al Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, utilizando colectores automáticos (Alarcón, 2012).

Actualmente, la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) está formada por 16 estaciones (Figura 4) de las cuales 12 se encuentran en la Ciudad de México y los 4 restantes tienen su ubicación en el Estado de México dentro del área perteneciente a la ZMCM (Tabla 1).

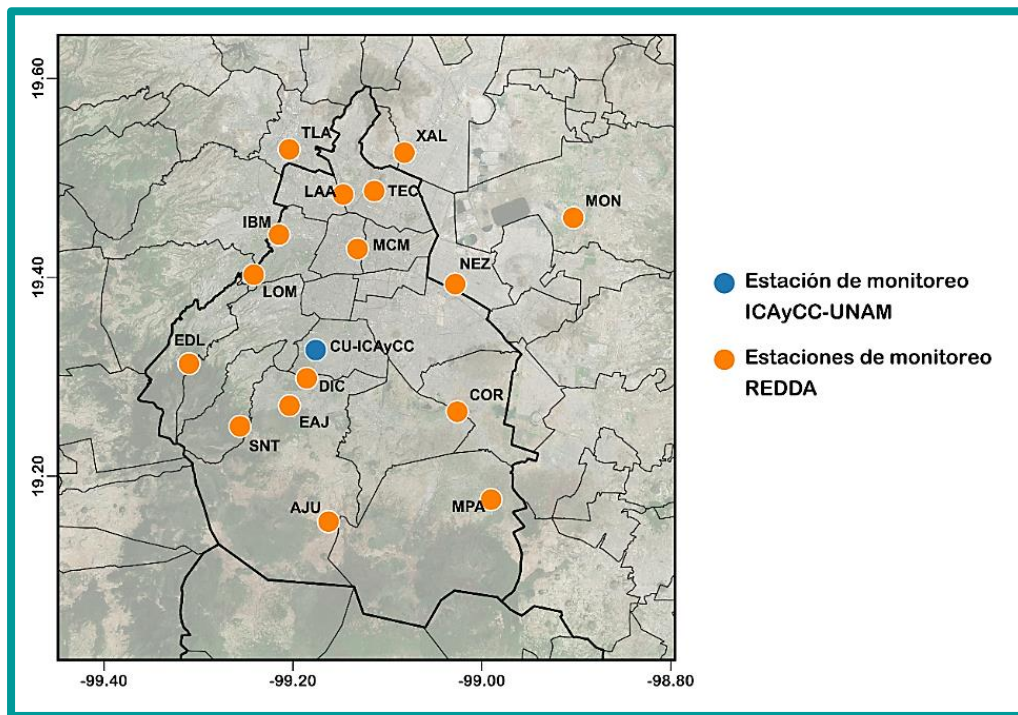


Figura 4. Localización de sitios de la REDDA en la ZMCM

Tabla 1. Sitios de muestreo de la REDDA (SIMAT, 2021)

ENTIDAD	CLAVE	NOMBRE	ALCALDÍA O MUNICIPIO	PARÁMETROS DE ANÁLISIS
Ciudad de México	AJU	Ajusco	Tlalpan	pH, PP, CE, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , H <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup>
	TEC	Cerro del Tepeyac	Gustavo A. Madero	
	COR	Corena	Xochimilco	
	DIC	Diconsa	Tlalpan	
	EAJ	Ecoguardas Ajusco	Tlalpan	
	EDL	Ex Convento Desierto de los Leones	Cuajimalpa	
	LAA	Laboratorio de Análisis Ambiental	Gustavo A. Madero	
	IBM	Legaria	Miguel Hidalgo	
	LOM	Lomas	Miguel Hidalgo	
	MPA	Milpa Alta	Milpa Alta	
	MCM	Museo de la Ciudad de México	Cuauhtémoc	
SNT	San Nicolás Totolapan	Magdalena Contreras		
Estado de México	MON	Montecillo	Texcoco	
	NEZ	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	
	TLA	Tlalnepantla	Tlalnepantla	
	XAL	Xalostoc	Ecatepec de Morelos	

Las muestras de depósito atmosférico húmedo son recolectadas semanalmente en las estaciones de la REDDA y son trasladadas bajo cadena de custodia hasta el laboratorio de la SCA-ICAYCC de la UNAM dónde se realiza el análisis fisicoquímico correspondiente para conocer las características físicas de la precipitación, su composición iónica (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, H<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>), conductividad eléctrica y acidez como pH, esta colaboración UNAM-SEDEMA, se realiza de manera continua desde el año 2003.

Es importante mencionar que la mayor parte de los 700 milímetros de agua de lluvia que caen en promedio anualmente en la región se concentra en unas cuantas tormentas intensas, en el periodo de junio a septiembre y durante el resto del año las precipitaciones pluviales suelen ser escasas o nulas (Sheinbaum, 2008).

### 3.1.2 Antecedentes de los estudios de lluvia ácida en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

A finales de la década de los 80's, las partículas y el  $\text{SO}_2$  fueron identificados como los principales contaminantes atmosféricos en la ZMCM, por esta razón se hizo un esfuerzo por reducir sus emisiones mediante el cambio de combustóleo a gas natural en las centrales eléctricas de la zona, lo resultó en una reducción en los niveles de ambos contaminantes, sin embargo, estuvo acompañado de un aumento de los  $\text{NO}_x$  por falta de equipos de control (Sosa et al., 2019).

Fue entonces que en la misma década (1981) cuando a cargo del Dr. Humberto Bravo, se realizaron muestreos de agua de lluvia para determinar el potencial de hidrógeno (pH) y la presencia de los iones sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), y en 1984, se realizó otro estudio que determinó la presencia de precipitaciones ácidas en el Valle de México y áreas rurales vecinas (SEDEMA, 1995).

Los resultados hallados en los estudios anteriores fueron poco representativos pues se utilizaban colectores convencionales de depósito atmosférico total, había recolección de lluvia y depósito seco conjuntamente, por esto en el año 1984 se instaló el primer colector de depósito atmosférico automático dentro de las instalaciones de la UNAM, este tipo de colector permite la colección de depósito atmosférico húmedo y seco por separado (Alarcón, 2012). En ese mismo año se evaluaron el  $\text{HNO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  del depósito atmosférico húmedo colectado en el centro histórico de la Ciudad de México y en 1988 se realizó un estudio que permitió evaluar el impacto de los precursores de la lluvia ácida sobre la vegetación (Muñoz et al., 2008).

En 1987 comenzó el monitoreo sistematizado del depósito atmosférico húmedo en la ZMCM, mediante el Programa de Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México a cargo del Instituto Nacional de Ecología, con el objetivo de evaluar el pH, conductividad, sulfatos, nitratos, cloruros, sodio, potasio, magnesio y calcio (SEDEMA, 1995), pero fue en el año 2001 cuando se consolidó la Red de Depósito Atmosférico (REDDA), y se integró al Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (Alarcón, 2012).

Todos estos avances han llevado a obtener resultados relevantes como es el estudio publicado en el año 2019 dónde se presentó que hay una disminución del pH de la lluvia en dirección de norte a sur de la ZMCM, teniendo además en el depósito atmosférico húmedo niveles importantes de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  con 24 y 20 kg/ha, respectivamente (Sosa et al., 2019). Lo anterior se ha confirmado actualmente pues los valores de pH de las muestras en las estaciones ubicadas en el sur son más ácidos que los pH de las estaciones en el norte, debido a que, aunque en el norte de la ZMCM hay mucha contaminación, existe una alta neutralización que resulta en un pH más alto, mientras que, en el sur, aunque también existe alta contaminación, hay menos neutralización y por lo tanto, un pH más bajo (Sosa et al., 2023).

Actualmente la REDDA cuenta con 16 estaciones de monitoreo distribuidas en las áreas urbana, rural y de conservación ecológica de toda la ZMCM, de las muestras obtenidas se analizan parámetros como pH, conductividad y la concentración de iones presentes en la lluvia, este análisis se ha llevado a cabo dentro de la SCA del ICAYCC-UNAM, la cual ha estado en constante participación en la evaluación de la química de las precipitaciones de la ZMCM, desde el año 2003 en colaboración con el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México.

### **3.1.3 Medidas implementadas para la prevención, control y minimización de contaminantes precursores de lluvia ácida en la ZMCM**

A lo largo de la historia, una de las principales problemáticas ambientales a enfrentar en la ZMCM ha sido la contaminación atmosférica, en 1971 ya se contaba con una Red Manual de Monitoreo de la calidad del aire, y con el fin de proteger la salud de los habitantes, publicaron por primera vez los criterios de la Calidad del Aire en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1982 (SEDEMA & SMAGEM, 2011).

En 1986 se instaló la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) la cuál permitía tener un registro sistemático de los niveles de contaminación del aire en la ZMCM para dar seguimiento a las “21 acciones para reducir la Contaminación del Aire” y las “100

Medidas Necesarias” que entraron en vigor en 1986 y 1987 respectivamente, estas acciones marcaron un inicio muy importante en la sustitución de combustibles con alto contenido de azufre, además de dar pie a la creación de programas como “Un Día sin Auto” que se transformó en 1989 y permanece en la actualidad como el “Programa Hoy no circula”.

Durante el periodo de 1988-1990 la contaminación ambiental en la ZMCM había alcanzado niveles críticos, este hecho llevó a crear el primer programa formal con el objetivo de combatir la contaminación atmosférica, el cuál llevó por nombre “Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica” (PICCA), publicado en 1990. Entre las principales acciones de la aplicación del PICCA, estaban la introducción de convertidores catalíticos de dos vías en vehículos nuevos, además de que el programa de verificación vehicular se hizo obligatorio para todos los vehículos, en 1990 se comenzó con la elaboración de diésel y combustóleo con bajo contenido de azufre y en la industria, así como en termoeléctricas se inició la sustitución de combustóleo por gas natural.

En 1991 se realizó el cierre definitivo de la Refinería 18 de marzo ubicada en la hoy Alcaldía Azcapotzalco, como consecuencia de una decisión para detener el deterioro progresivo del medio ambiente y la calidad de vida en la ZMCM, que presentaba altos índices de contaminación ambiental del aire. En 1993 se introdujo el Diesel Sin, caracterizado por tener un bajo contenido de azufre (0.05%) además de la incorporación del convertidor catalítico de tres vías e inyección electrónica para todos los autos nuevos (SEDEMA & SMAGEM, 2011).

En 1996 la SEMARNAT y el entonces Gobierno del Distrito Federal hoy Ciudad de México y el Gobierno del Estado de México, acordaron la instrumentación del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la ZMCM 1995-2000 (PROAIRE) con el propósito de darle continuidad a las medidas ya establecidas contra la contaminación atmosférica. Parte de las medidas de este programa fueron la reducción de emisiones de NO<sub>x</sub> en las termoeléctricas “Valle de México” y “Jorge Luque” a través de la instalación de quemadores con baja emisión, modificación a los orificios de los quemadores de gas natural y de las condiciones de operación en el generador de vapor

(SEDEMA, 2000), también se aplicó una nueva regulación de gasolinas, limitando de manera importante, el contenido de azufre, para lo cual PEMEX introdujo la gasolina PEMEX Premium.

Durante 1997, se modernizó el Programa de Verificación Vehicular, con la medición de 5 gases, dónde se incluían los  $\text{NO}_x$ , también hubo una sustitución del diésel industrial de 0.5 % de azufre por uno de bajo contenido de azufre de 0.05 %, y en diciembre del mismo año, PEMEX-Refinación sustituyó en la ZMCM el gasóleo industrial con 2% de contenido de azufre por un combustible industrial cuyo contenido máximo en peso era del 1%.

Para el siguiente año se logró que la central termoeléctrica “Jorge Luque” dejara de consumir combustóleo y que el contenido de azufre del combustible industrial que se distribuía en la ZMCM fuera menor del 1%. Además, en 1999 se publicaron las normas NOM-041-ecol-1999 y la NOM-042-ECOL-1999, la primera establece límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes de vehículos automotores que usan gasolina como combustible y la segunda establece los límites máximos permisibles de emisión de  $\text{NO}_x$  y partículas suspendidas entre otros, provenientes del escape de automóviles (SEDEMA, 2000).

Con el PROAIRE 1995-2000, se logró la reducción de emisiones de  $\text{SO}_2$ , por la disminución progresiva del azufre en la gasolina, esto también permitió un aumento de la vida media de los convertidores catalíticos, sin embargo, aún se veían reflejados picos importantes de alta concentración de este contaminante en algunas estaciones de monitoreo.

El PROAIRE continuó siendo una herramienta importante para establecer medidas contra la contaminación atmosférica, por ello los gobiernos que integran la Comisión Ambiental Metropolitana asumieron el compromiso de elaborar un nuevo programa de calidad de aire PROAIRE 2002-2010, enfocado principalmente en los contaminantes que excedían en mayor número de días las normas de calidad del aire, entre los que se encontraba el  $\text{SO}_2$ .

Entre las acciones más importantes que se realizaron durante el periodo 2002-2010 para la reducción de contaminantes precursores de lluvia ácida se encuentran, el fomento del uso de transporte limpio de cero emisiones a través de la construcción de la primer ciclista en la Ciudad de México en el 2003, mientras tanto al llegar el 2006 PEMEX inició en la ZMCM con el suministro de gasolina Premium UBA, de ultra bajo contenido de azufre y se incentivó el uso de vehículos híbridos gasolina-eléctricos en la región para disminuir emisiones.

En el transcurso del 2008 se inició la generación de electricidad a pequeña escala con energía solar como opción a desarrollar una alternativa más limpia de emisiones y en 2009 PEMEX comenzó con el suministro en la ZMCM de PEMEX Magna y Pemex Diesel de ultra bajo contenido de azufre, también se sustituyó la circulación de microbuses por trolebuses eléctricos en el corredor Cero Emisiones en el Eje Central de la Ciudad de México.

Con la llegada del 2010 se dio formalmente inicio al Sistema de Transporte Público ECOBICI en la Ciudad de México, en materia de salud ambiental se publicó la norma mexicana NOM-022-SSA1-2010, que establece los criterios para evaluar la calidad del aire ambiente respecto al  $\text{SO}_2$ . Con la implementación del PROAIRE 2002-2010, se alcanzó la meta de reducir las concentraciones promedio diario de  $\text{SO}_2$  y la concentración promedio anual desde el 2003, sin embargo, no se logró eliminar la presencia en forma esporádica de picos horarios con concentraciones mayores a 0.2 ppm en las zonas industriales de la ZMCM. Además, se estimaron reducciones de 506 ton/año de  $\text{SO}_2$  y 65,779 ton/año de  $\text{NO}_x$  (SEDEMA & SMAGEM, 2011).

Continuando con el PROAIRE 2011-2020, se implementaron estrategias como la modernización y homologación del programa de verificación vehicular, el fortalecimiento de la aplicación del programa para la sustitución de convertidores catalíticos, clave para la disminución de emisiones de  $\text{NO}_x$ , también se implementó la renovación de la flota vehicular de transporte de pasajeros de baja, mediana y alta capacidad de la ZMCM, se promovió el uso de combustibles menos contaminantes en vehículos de transporte público, pasajeros y de carga, se fortaleció el programa de

autorregulación de vehículos a diésel, además de la promoción del uso de la bicicleta como medio de transporte en la ZMCM. Todas estas acciones llevaron a una reducción de 122,140.67 ton de NO<sub>x</sub> y 298.28 ton de SO<sub>2</sub>, durante los años del periodo de aplicación del PROAIRE 2011-2020 (SEDEMA et al., 2021).

El último PROAIRE de la ZMCM publicado, corresponde al periodo 2021-2030, este enfoca sus estrategias en el reforzamiento de la normatividad para reducir y controlar las emisiones en el sector transporte público y particular, control de emisiones generadas por actividades industriales mediante la creación o actualización de instrumentos regulatorios y el uso de tecnologías de control de emisiones, reducción de emisiones asociadas a la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, mitigación de emisiones por quema a cielo abierto de residuos y el fomento a la investigación para mejorar la gestión de la calidad del aire y la salud de la población en la ZMCM.

### **3.1.4 Emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida en la ZMCM**

Mejorar la calidad del aire en la ZMCM es un proceso complejo que debe ser atendido de manera prioritaria. De acuerdo con el inventario de emisiones del 2018 para la ZMCM, publicado por la SEDEMA en el año 2021, se pueden observar las emisiones totales de contaminantes precursores de lluvia ácida, por tipo de fuente (Tabla 2).

En total se emitieron 144,598 ton de NO<sub>x</sub> en la ZMCM durante el año 2018, en mayor proporción provenientes de fuentes móviles con un 85.8% de las emisiones totales, es decir, 124,115 ton de NO<sub>x</sub>, la mayor contribución de este tipo de fuentes fue por parte del transporte particular y el transporte público de baja y mediana capacidad (taxis, vagonetas, microbuses y motocicletas), pero también se consideraron unidades pesadas de carga y uso público. Todo esto derivado de los procesos de combustión de los vehículos.



**Tabla 2. Emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> por tipo de fuente en la ZMCM, 2018** (SEDEMA, 2021)

Tipo de fuente	NO <sub>x</sub>		SO <sub>2</sub>	
	Emisión (ton/año)	Porcentaje de emisión (%)	Emisión (ton/año)	Porcentaje de emisión (%)
Fuentes puntuales	9,506	6.6	1,019	33.2
Fuentes de área	10,624	7.4	991	32.3
Fuentes móviles	124,115	85.8	1,059	34.5
Fuentes naturales	353	0.2	N/A	N/A
<b>TOTAL</b>	<b>144,598</b>	<b>100</b>	<b>3,069</b>	<b>100</b>

N/A: no aplica; la categoría no emite el contaminante referido.

Las fuentes de área representaron el 7.4% de las emisiones totales, mientras que las fuentes puntuales un 6.6%. En el caso de las fuentes de área los NO<sub>x</sub> fueron provenientes de procesos de combustión en la operación de aeronaves, vehículos y maquinaria fuera de ruta, mientras que en las fuentes puntuales se consideraron procesos generadores de NO<sub>x</sub> como la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, además de la fabricación de productos a base de minerales no metálicos con un 2.0% y 1.5% respectivamente del total de emisiones (SEDEMA, 2021).

Puesto que los NO<sub>x</sub> en la ZMCM son generados principalmente por las fuentes móviles (medios de transporte), la distribución de este contaminante depende de los patrones de movilidad en las vialidades de mayor flujo, así como de la congestión vehicular.

En la figura 5, se observa gráficamente la distribución espacial de las emisiones de NO<sub>x</sub> en la ZMCM, observándose mayor número de toneladas emitidas al año en la región centro, debido a una mayor afluencia vehicular diaria, además se considera que, en algunas zonas, las emisiones vehiculares se suman con aquellas provenientes de actividades industriales y fuentes de área. Por ejemplo, la alcaldía Venustiano Carranza, es uno de los puntos de generación de NO<sub>x</sub> más importantes puesto que ahí se ubica el Aeropuerto Internacional Benito Juárez, que cuenta con un tráfico y operación diaria de aeronaves, considerables en las emisiones de este contaminante precursor de lluvia ácida.

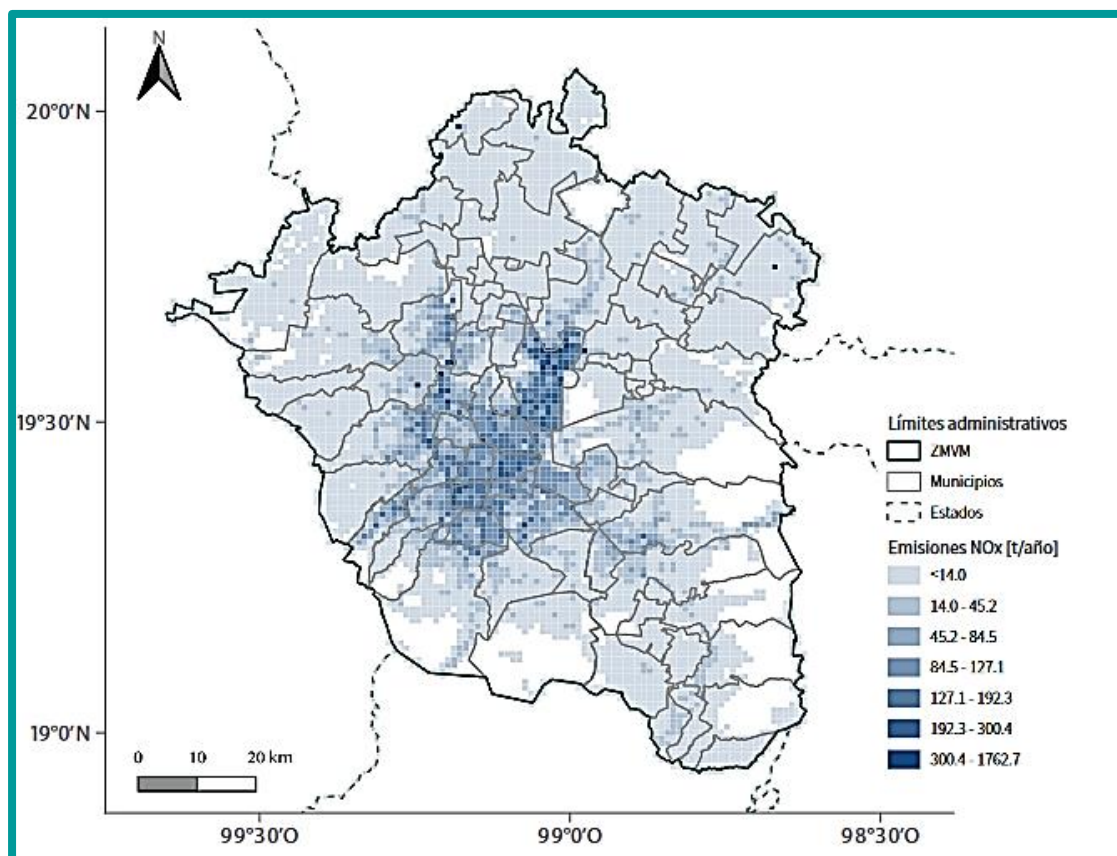
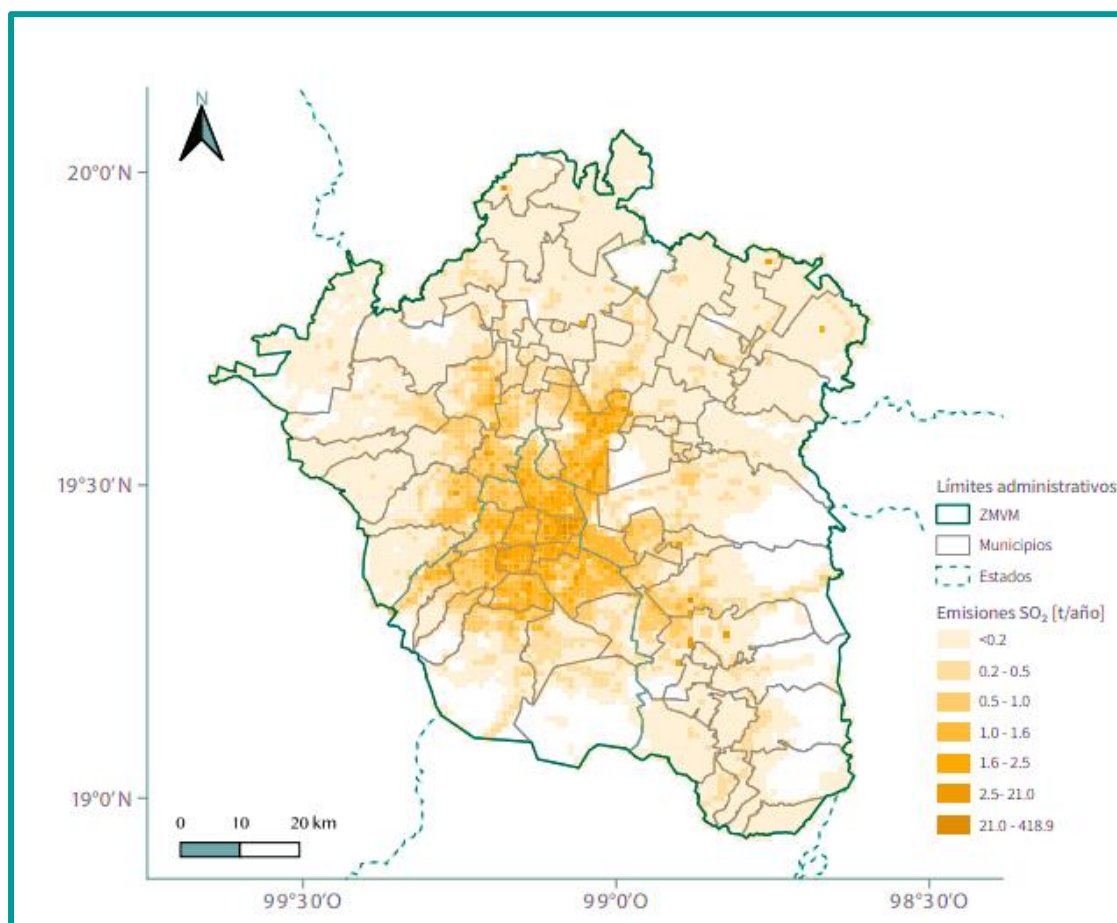


Figura 5. Distribución espacial de las emisiones de  $\text{NO}_x$  en la ZMCM, 2018 (SEDEMA, 2021)

Con respecto a las emisiones de  $\text{SO}_2$  en la ZMCM, la emisión total de este contaminante según el inventario de emisiones 2018, fue de 2,069 ton (Tabla 2), el mayor porcentaje de emisión fue por parte de fuentes móviles con 1,059 ton al año, de las cuáles la mayor aportación fue por parte de autos particulares, microbuses, tractocamiones, camionetas SUV y vehículos de carga mayores a 3.8 ton.

Las fuentes puntuales representaron el 33.2% equivalente a 1,019 ton de  $\text{SO}_2$ , la mayor parte de estas emisiones fueron provenientes de procesos industriales para la fabricación de productos a base de minerales no metálicos, seguido de la industria del papel, industrias metálicas básicas y químicas. Por último, las fuentes de área aportaron el 32.3% de las emisiones totales de  $\text{SO}_2$ , la quema a cielo abierto, combustión habitacional, combustión industrial no regulada y las operaciones de aeronaves representan la mayor contribución de  $\text{SO}_2$  de este tipo de fuentes (SEDEMA, 2021).

La distribución espacial de las emisiones de  $\text{SO}_2$  en la ZMCM, para el año 2018, puede apreciarse en la Figura 6, dónde se observa que las emisiones de este contaminante se concentran mayormente hacia el centro de la ZMCM, debido al mayor flujo diario de diferentes fuentes móviles ya antes mencionadas, además de que la mancha urbana de la región, se concentra en el centro y se ve desplazada hacia el norte, lo que propicia una mayor existencia de combustión habitacional que es una de las fuentes principales de  $\text{SO}_2$  en la zona.



*Figura 6. Distribución espacial de las emisiones de  $\text{SO}_2$  en la ZMCM, 2018 (SEDEMA, 2021)*

Es de relevancia mencionar que estaciones de monitoreo atmosférico localizadas al noroeste de la ZMCM, registran los mayores niveles de  $\text{SO}_2$ , lo que ha llevado a

detectar dos fuentes externas a la ZMCM que, por la magnitud de sus emisiones, inciden significativamente en la calidad del aire local: El corredor Industrial Tula-Vito-Apasco, en el Estado de Hidalgo y el volcán Popocatepetl en el límite oriental de la ZMCM con el estado de Puebla (SEDEMA et al., 2021).

El corredor Industrial Tula-Vito-Apasco, ubicado al noreste de la ZMCM, tiene una gran actividad industrial, destacando dos fuentes fijas de jurisdicción federal, la refinería Miguel Hidalgo de PEMEX, que es la segunda más grande de México y la planta termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de la CFE, la cual cuenta con una central de generación de ciclo combinado y una de generación termoeléctrica convencional. El consumo de combustóleo pesado y gas natural en estas instalaciones genera la emisión de contaminantes, entre los que se encuentran el SO<sub>2</sub> y los NO<sub>x</sub>, precursores de la lluvia ácida.

Anualmente la emisión total de SO<sub>2</sub> por parte de la refinería Miguel Hidalgo y la planta termoeléctrica Francisco Pérez Ríos (Tabla 3), es de 139,166 ton, esto es 45 veces más que las emisiones totales de la ZMCM, en el caso de los NO<sub>x</sub>, la ZMCM emite 8 veces más de este contaminante que lo emitido en el corredor Tula-Vito-Apasco. Sin embargo, el arrastre de estos contaminantes principalmente de SO<sub>2</sub> desde este corredor industrial hacia la ZMCM, se debe a las masas de aire que lo transportan desde el norte de la región debido a los vientos predominantes que soplan del norte hacia el sur durante la mayor parte del año (Sosa et al., 2023), lo que en consecuencia afecta la calidad del aire de la ZMCM.

**Tabla 3. Emisiones anuales de contaminantes en las principales fuentes del corredor Tula-Vito-Apasco (NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>)** (SEDEMA et al., 2021)

Fuentes	Emisiones (ton/año)	
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Refinería Miguel Hidalgo	29,929	3,103
Termoeléctrica F.P.R	109,237	15,295
<b>Total</b>	<b>139,166</b>	<b>18,398</b>

Finalmente, el volcán Popocatepetl que se encuentra a 80.7 km de la ciudad entre los límites del Estado de México, Puebla y Morelos, es una fuente de emisión constante de SO<sub>2</sub> (Sosa et al., 2019), por efecto de los patrones de viento en la región, estas fumarolas pasivas pueden dispersarse hasta la ZMCM, representando un problema de salud pública.

### 3.2 Zonas de Norteamérica (Región Canadá y Estados Unidos).

La región del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) Norteamérica, comprende dos países Canadá y los Estados Unidos, en estos países la gestión ambiental es una responsabilidad que se comparte entre el gobierno federal y el gobierno provincial/territorial en el caso de Canadá y gobiernos estatales para los Estados Unidos. (UNEP, 2020) ). El Acuerdo de calidad del aire entre Canadá y Estados Unidos fue firmado en 1991, para abordar la contaminación del aire transfronteriza que conduce a la lluvia ácida. Ambos países acordaron reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> precursores de la lluvia ácida, y trabajar juntos en la cooperación científica y técnica relacionada con la mejoría de la calidad del aire (ECCC, 2020).

En el mes de abril del 2020, se publicó el National Emissions Inventory Report 2017 (NEI), el último de los inventarios publicado por la EPA, dónde se menciona que, en Estados Unidos durante el año 2017, se emitieron 2.5 millones de ton de SO<sub>2</sub> de las cuáles el 50% proviene de la generación de energía eléctrica, un 38% de fuentes industriales, 4% por la combustión no industrial, 1% de sistemas de transporte en carretera, 3% de transporte no terrestre y el 4% por otras fuentes antropogénicas.

En el caso de los NO<sub>x</sub> la emisión total fue de 9.7 millones de toneladas en 2017, de las cuales la mayoría fueron emitidas por el transporte terrestre en un 35%, 25% por transporte no terrestre, 22% por fuentes industriales, 11% proveniente de la generación de energía eléctrica, 5% por combustible de uso no industrial y el 3% por otras fuentes antropogénicas (US EPA, 2020).

Con respecto a Canadá, durante el año 2017 las emisiones de SO<sub>2</sub> sumaron 1 millón de toneladas, siendo la fuente industrial la de mayor aporte a estas emisiones con un 71%, el 26% proviene de la generación de energía eléctrica, 2% de medios de transporte no terrestres y el 1% restante de fuentes de combustión no industriales. De los NO<sub>x</sub> se emitieron 1.8 millones de toneladas, 35% fue proveniente de fuentes industriales, 30% de medios de transporte no terrestres, 22% fue aportado por medios de transporte terrestre, 8% por la generación de energía eléctrica y el 5% restante debido al uso de combustibles no industriales (UNEP, 2020).

Información obtenida de las estaciones de monitoreo en toda la región indica que la calidad del aire ha mejorado significativamente bajo el acuerdo firmado entre Canadá y Estados Unidos, sin embargo, contaminantes como el SO<sub>2</sub> y los NO<sub>x</sub> siguen siendo motivo de preocupación pues continúan causando impactos en la salud humana y el medio ambiente en ambos países, por ello, se necesitan esfuerzos bilaterales continuos para reducir el impacto transfronterizo de estos contaminantes y garantizar que la contaminación atmosférica transfronteriza no afecte la capacidad de cada país para alcanzar y mantener sus estándares nacionales de calidad del aire ambiental.

### **3.2.1 Monitoreo del depósito atmosférico en Norteamérica (Región Canadá y Estados Unidos).**

El depósito atmosférico se monitorea en Canadá y Estados Unidos a través de redes bien establecidas que miden la composición química del aire y la precipitación. Los países aportan sus resultados de monitoreo a un conjunto de datos integrado a partir del cual se producen mapas de depósito atmosférico húmedo en esta región de Norteamérica.

En la región de Estados Unidos y algunos sitios al este de Canadá, el National Atmospheric Deposition Program (NADP) es la organización dedicada a la medición y evaluación del depósito atmosférico. Organizado en 1977 bajo el liderazgo de las Estaciones Experimentales Agrícolas del Estado (SAES), el NADP continúa monitoreando el fenómeno que representa el depósito atmosférico y sus efectos en

cultivos agrícolas, bosques, pastizales y aguas superficiales, así como en otros recursos naturales y culturales (Lamb & Van Bowersox, 2000).

Actualmente el NADP, está conformado por 5 redes:

- **La Mercury Deposition Network (MDN)** que es la única red que proporciona un registro a largo plazo de la concentración y deposición total de mercurio (Hg) en las precipitaciones en los Estados Unidos y Canadá.
- **La Ammonia Monitoring Network (AMoN)**, que proporciona un registro de mediciones constantes y a largo plazo de las concentraciones de gas amoniacal ( $\text{NH}_3$ ) en los Estados Unidos.
- **La Atmospheric Mercury Network (AMNet)** que tiene el propósito de medir las fracciones de mercurio atmosférico que contribuyen al depósito total y seco, además de concentraciones en formas de mercurio atmosférico, gaseoso oxidado, unido a partículas y elemental en ubicaciones seleccionadas.
- **La Mercury Litterfall Network (MLN)** aprobada en 2021 para complementar la Mercury Deposition Network (MDN) que monitorea el mercurio en la precipitación y la Atmospheric Mercury Network (AMNet), que cuantifica el depósito de mercurio atmosférico en los bosques de los Estados Unidos.
- **La National Trends Network (NTN)** que es la única red que proporciona un registro a largo plazo de la química de las precipitaciones en los Estados Unidos (NADP, 2022b).

Por otra parte, Canadá cuenta con su propia red de monitoreo The Canadian Air and Precipitation Monitoring Network (CAPMoN), operada por el Environment and Climate Change Canada (ECCC), la cual está diseñada para estudiar los patrones y tendencias regionales de los contaminantes atmosféricos como la lluvia ácida, el smog, las partículas y el mercurio, tanto en el aire como en la precipitación, esta red comenzó a operar en 1983. La CAPMoN actualizó y reemplazó dos redes más antiguas la Canadian Network for Sampling Precipitation (CANSAP) y la Air and Precipitation

Network (APN), la integración de esta última red como parte de la CAPMoN, amplió los registros de datos desde 1978 (ECCC, 2017).

Inicialmente la CAPMoN se diseñó para ayudar a los canadienses a comprender las fuentes de contaminantes precursores de lluvia ácida y sus impactos en el medio ambiente, esto incluyó mediciones integradas del depósito húmedo (a través de la lluvia o la nieve) y el depósito seco, así como las concentraciones ambientales de gases y partículas que forman ácidos. Los sitios regionalmente representativos requeridos para comprender las fuentes y cómo el transporte de largo alcance impactan el medio ambiente canadiense han demostrado ser invaluable para una amplia gama de problemas atmosféricos. En la actualidad la CAPMoN cuenta con 27 sitios activos que miden diferentes parámetros (Figura 7).

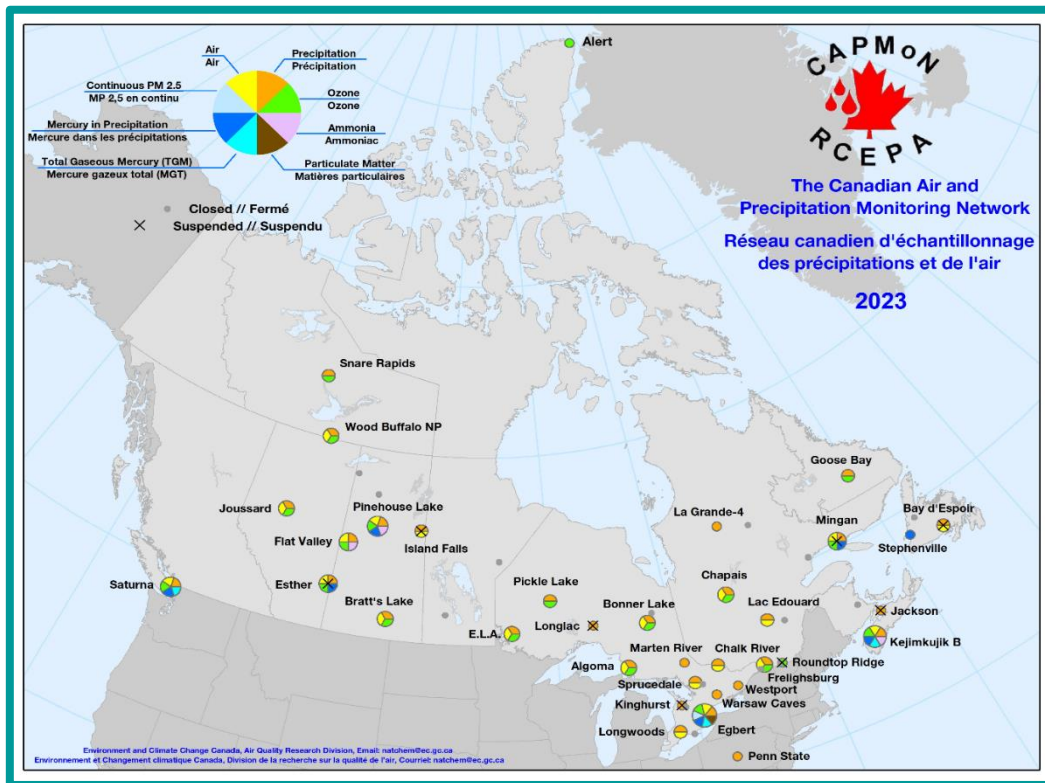


Figura 7. Mapa de sitios de la CAPMoN 2023 (ECCC, 2023c)



### 3.2.1.1 National Trends Network (NTN)

La National Trends Network (NTN) perteneciente al National Atmospheric Deposition Program, cuenta con 256 sitios activos de muestreo de depósito atmosférico húmedo, la mayoría ubicados lejos de áreas urbanas y de fuentes puntuales de contaminantes (Figura 8).

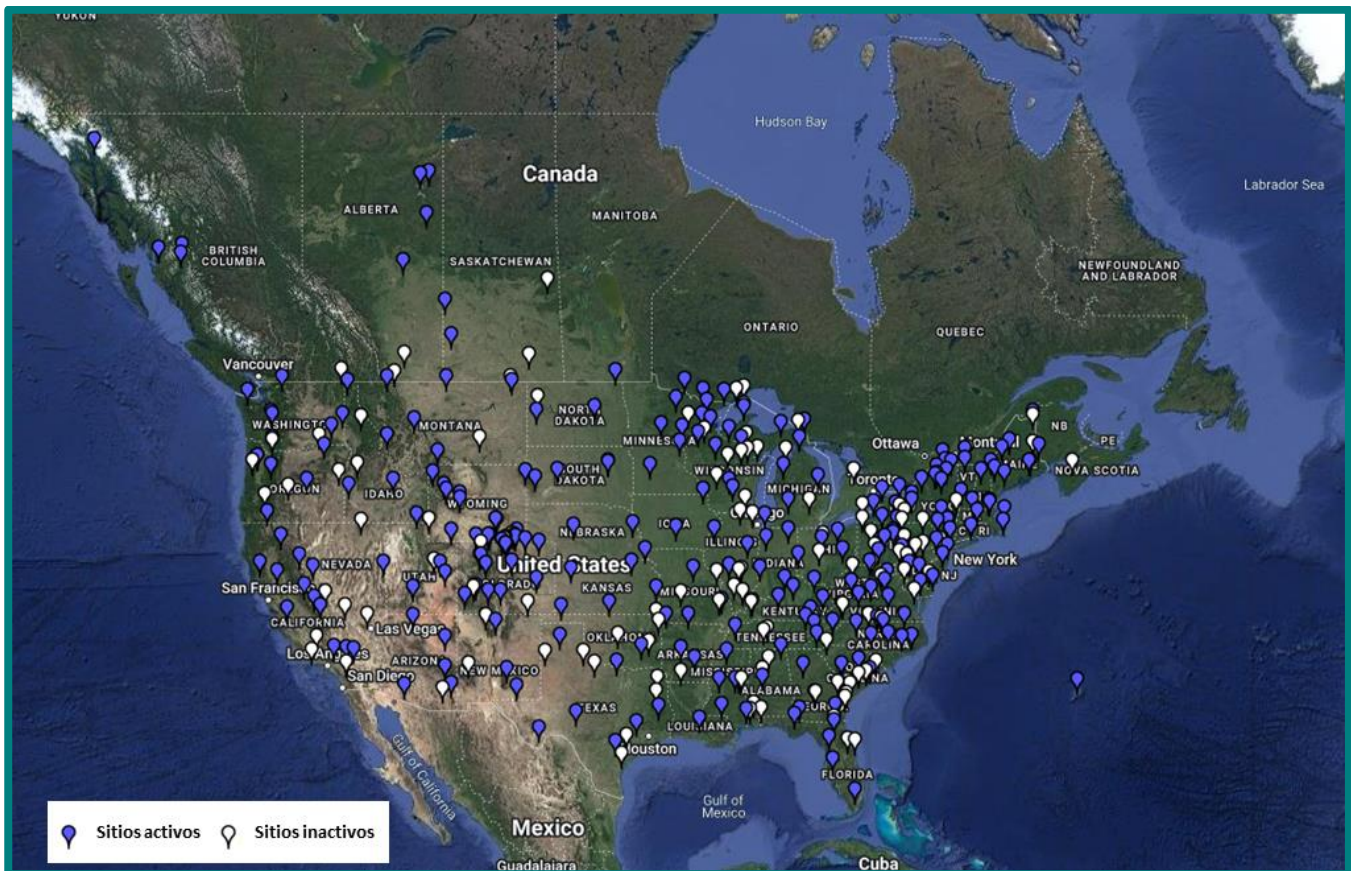


Figura 8. Mapa de sitios activos e inactivos de monitoreo de la NTN en Norteamérica (NADP, 2023b)

Cada sitio de muestreo de la NTN tiene un colector y un medidor de precipitación. El recolector automático asegura que la muestra esté expuesta solo durante la precipitación (muestreo solo húmedo), las muestras son recolectadas semanalmente los días martes y posteriormente son enviadas al Laboratorio Analítico Central (CAL, por sus siglas en inglés) en el Laboratorio de Higiene del Estado de Wisconsin (WSLH, por

sus siglas en inglés) para realizar su análisis, que consiste en la medición de la acidez libre ( $H^+$  como pH), conductividad, calcio ( $Ca^{2+}$ ), magnesio ( $Mg^{2+}$ ), sodio ( $Na^+$ ), potasio ( $K^+$ ), sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), nitrato ( $NO_3^-$ ), cloruro ( $Cl^-$ ) y amonio ( $NH_4^+$ ). El CAL también mide el ortofosfato, pero sólo como indicador de contaminación de la muestra (NADP, 2022c).

La NTN se estableció originalmente utilizando sitios dedicados a proporcionar datos representativos a nivel regional del depósito atmosférico, pero la red ha crecido para incluir sitios en áreas urbanas y otros para investigación. Se sospecha que las muestras recolectadas de zonas urbanas y sitios de investigación representan depósitos húmedos afectados por fuentes de emisión antropogénicas locales y contaminantes del aire distribuidos regionalmente, debido a esto ha surgido el cuestionamiento sobre si la urbanización de la tierra alrededor de los sitios de monitoreo NADP/NTN afecta las características de asentamiento húmedo del sitio a largo plazo. Especialmente la tendencia de la química del depósito atmosférico húmedo (Wetherbee et al., 2011).

Derivado de esto el NADP/NTN ha evaluado las tendencias en la química del depósito atmosférico húmedo con respecto al porcentaje de aumento de la superficie de la tierra urbanizada durante los últimos años dentro de un radio de 30 millas de cada sitio de monitoreo, considerando así a los sitios con mayor crecimiento poblacional y actividad humana para evaluar e identificar aquellos con el mayor potencial de efectos de la urbanización en la composición química de la precipitación, clasificando como "urbanos", a los sitios dentro de los 15 km de un área con una densidad de población superior a 400 personas/km<sup>2</sup> (Wetherbee et al., 2019).

Actualmente, la NTN cuenta con 28 sitios activos clasificados como urbanos y suburbanos, distribuidos en diferentes condados de los Estados Unidos (Tabla 4).

**Tabla 4. Sitios de la NTN urbanos y suburbanos activos** (NADP, 2023b)

ID del sitio	Nombre del sitio	Inicio de muestreo	Condado	Estado	Clase del sitio
AR27	Fayetteville	13/05/1980	Washington	Arkansas	S
CA42	Tanbark Flat	12/01/1982	Los Angeles	California	S
CA88	Davis	04/09/1978	Yolo	California	S
IL11	Bondville	27/02/1979	Champaign	Illinois	S
IN34	Indiana Dunes National Lakeshore	15/07/1980	Porter	Indiana	S
IN41	Agronomy Center for Research and Extension	13/07/1982	Tippecanoe	Indiana	S
KY19	Cannons Lane	07/10/2003	Jefferson	Kentucky	U
MA22	Boston University	16/06/2015	Suffolk	Massachusetts	U
MA98	Arnold Arboretum	09/02/2016	Suffolk	Massachusetts	U
MD99	Beltsville	01/06/2004	Prince Georges	Maryland	U
MS10	Clinton	10/07/1984	Hinds	Mississippi	S
NC29	Hofmann Forest	02/07/2002	Onslow	North Carolina	S
NC30	Duke Forest	03/03/2020	Orange	North Carolina	S
NC41	Finley Farm	03/10/1978	Wake	North Carolina	U
NJ00	Edwin B. Forsythe National Wildlife Refuge	13/10/1998	Atlantic	New Jersey	S
NJ39	Cattus Island County Park	04/12/2012	Ocean	New Jersey	U
NJ99	Washington Crossing	04/08/1981	Mercer	New Jersey	U
NY06	Bronx	22/01/2013	Bronx	New York	U
NY43	Rochester	30/04/2013	Monroe	New York	U
NY92	Amherst	29/10/2013	Erie	New York	U
NY99	West Point	13/09/1983	Orange	New York	S
OR97	Hyslop Farm	26/04/1983	Benton	Oregon	S
PA13	Allegheny Portage Railroad National Historic Site	26/07/2011	Cambria	Pennsylvania	S
PA15	Penn State	07/06/1983	Centre	Pennsylvania	S
TN00	UT Forest Research Station	11/03/1980	Anderson	Tennessee	S
UT01	Logan	06/12/1983	Cache	Utah	S
VA00	Charlottesville	02/10/1984	Albemarle	Virginia	S
WI06	UW Arboretum	11/02/2019	Dane	Wisconsin	U

S: suburbanos activos

U: urbanos activos

### 3.2.2 Antecedentes de los estudios de lluvia ácida en la región de Norteamérica Estados Unidos-Canadá.

El Bosque Experimental Hubbard Brook (HBEF) se estableció en 1955 como la principal instalación de investigación hidrológica en el noreste de los Estados Unidos, en 1963 FH Bormann, GE Likens, NM Johnson y RS Pierce iniciaron la Hubbard Brook Ecosystem Study (HBES) para evaluar la composición química de la lluvia en ese sitio, desde el inicio del estudio la lluvia y la nieve muestreada fueron inusualmente ácidas, al analizar los datos se mostró que la deposición del ion  $\text{SO}_4^{2-}$  estaba fuertemente

relacionada con la emisión de  $\text{SO}_2$  a cientos o miles de kilómetros de distancia (Likens & Bailey, 2013).

En Canadá, la evidencia científica de la acidificación de los sistemas acuáticos aumentó a lo largo de las décadas de 1960 y 1970. Entre 1972 y 1977, la acidificación de estos sistemas se vinculó con el transporte de largo alcance de  $\text{SO}_2$  desde los Estados Unidos, pero también había transporte de largo alcance entre las provincias de Canadá (ECCC, 2010).

Fue entonces, cuando se comenzó a considerar a la lluvia ácida como un problema regional generalizado en Norteamérica, donde el pH promedio de la lluvia fue de 4.2 a 4.5 y los eventos de niebla podían tener valores de pH inferiores a 3.0 (Likens & Butler, 2018). Durante ese tiempo se presentó la pérdida de poblaciones de peces en muchos lagos y arroyos, así como la disminución del crecimiento de los bosques como los primeros signos del daño causado por el depósito atmosférico húmedo ácido, estos daños se estaban produciendo en regiones remotas, lejos de las principales áreas metropolitanas y fuentes de contaminación, es decir la precipitación ácida podía ocurrir a cientos o miles de kilómetros de distancia de las principales fuentes de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ .

Dado lo anterior, en Canadá se comenzó con el monitoreo de la precipitación gracias a The Canadian Network for Sampling Precipitation (CANSAP) la cual inició operaciones en 1976, mientras que en 1978 en Estados Unidos surgió el National Atmospheric Deposition Program (NADP), ambas redes tenían la tarea de proporcionar mapas detallados de tendencias espaciales y temporales de la composición química de la precipitación (Driscoll et al., 2010).

A principios de la década de 1980, los bosques del este de Norteamérica presentaron daños en la *Picea Rubens* o Pícea roja, que es una especie de conífera nativa del este de Norteamérica, además se documentó la disminución de la especie de árboles “arce azucarero” en muchas partes del área de distribución de la especie arbórea expuesta a cantidades significativas de precipitación ácida (Likens & Butler, 2018).

En 1991, Estados Unidos y Canadá firmaron un acuerdo para abordar la contaminación del aire transfronteriza, mediante la cual los contaminantes liberados en un lugar pueden viajar largas distancias, afectando la calidad del aire en las fuentes de emisión, así como a muchas millas de distancia, este acuerdo condujo principalmente a la reducción de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , para la disminución de la lluvia ácida pero también se amplió hasta el año 2000 para reducir las emisiones transfronterizas de smog (US EPA, 2023b).

En estudios realizados por Driscoll et al., se informa sobre las tendencias en indicadores químicos en aguas superficiales de América del Norte, se menciona que las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  disminuyeron a menos de  $2 \mu\text{eq/L}$  al año en 48 lagos que fueron monitoreados en las Montañas de Adirondack, Estados Unidos durante el periodo de 1992 al 2013. Por otro lado, de 1999 al 2014 se reportó la disminución significativa en las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  en 40 tramos de arroyos al oeste de Maryland, Estados Unidos (Kline et al., 2016).

En Canadá se reportó en el periodo 1980-2012 que las tendencias de composición química de la corriente de dos sitios en Ontario tenían una recuperación limitada del pH, también que el clima jugaba un papel importante en la acidificación de las corrientes a corto plazo durante el otoño (Watmough et al., 2016). Por otro lado, se demostró que la lluvia ácida afecta los recursos culturales y acelera el desgaste de los edificios y esculturas al aire libre, por ello se desarrolló un nuevo enfoque para estudiar las tasas de erosión de las esculturas de mármol y bronce (Burns et al., 2016).

Por último, aunque en la región de Norteamérica comprendida por los Estados Unidos y Canadá se ha colaborado y redoblado esfuerzos desde 1991 para la reducción de contaminantes de precursores de lluvia ácida, esta sigue siendo un tema de estudio importante, pues obtener una mejor comprensión de cómo la lluvia ácida interactúa con los ecosistemas sigue siendo un desafío para la comunidad científica (Burns et al., 2016). El experimento involuntario de lluvia ácida continúa brindando oportunidades para estudiar los efectos a largo plazo de los contaminantes del aire en los ecosistemas terrestres y acuáticos.

### 3.2.3 Medidas implementadas para la prevención, control y minimización de contaminantes precursores de lluvia ácida en la región de Norteamérica Estados Unidos-Canadá.

El Acuerdo de Calidad del Aire entre Canadá y Estados Unidos fue firmado en 1991, para abordar la contaminación del aire transfronteriza que conducía a la formación de lluvia ácida. Ambos países acordaron reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, precursores de la lluvia ácida, y trabajar juntos en la cooperación científica y técnica relacionada con este tipo de precipitación (ECCC, 2020).

A continuación, se describen las medidas de reducción de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> implementadas a lo largo de los años en Estado Unidos y Canadá, según lo reportado en los U.S. - Canada Air Quality Agreement Progress Reports.

#### *Canadá:*

Para la reducción de las emisiones de SO<sub>2</sub> en el año 1994, las empresas de servicios eléctricos canadienses pusieron en marcha tres nuevas centrales eléctricas de carbón diseñadas para cumplir con los estándares nacionales de emisiones de SO<sub>2</sub> de las centrales eléctricas, equipándolas con sistemas de lecho fluidizado con inyección de piedra caliza para capturar alrededor del 90% de emisiones de SO<sub>2</sub>. En 1993 la empresa Inco. Ltd., modernizó su complejo industrial de producción de cobre, reduciendo sus emisiones de 865 kilotoneladas a 256 kilotoneladas por año de SO<sub>2</sub>. Por otro lado, las plantas de energía existentes en New Brunswick y Ontario fueron equipadas con scrubbers o lavadores de gases de piedra caliza (IJC, 1994).

Con respecto a los NO<sub>x</sub>, su reducción en Canadá se debe inicialmente a que durante el periodo 1991-1994 se publicaron nuevas pautas federales para turbinas de combustión estacionarias que se usaron ampliamente en nuevos sistemas de generación de energía y se aprobó la instalación de la primera unidad de reducción catalítica selectiva en la central eléctrica de gas Burrard en Brithis Columbia, en esta misma provincia se comenzó con la implementación de estaciones de inspección y mantenimiento para reducir emisiones de NO<sub>x</sub> provenientes de los vehículos ligeros (IJC, 1994).

En 2001 Canadá anunció una serie de compromisos para vehículos, motores y combustibles, entre los que se encontraba la normativa que limitaba el nivel de azufre en diésel utilizado en vehículos de carretera a un máximo de 500 ppm (IJC, 2005) y posteriormente en 2006 reducido a 15 ppm (IJC, 2009).

Durante abril del 2005, la estación generadora eléctrica de carbón Lakeview, en Ontario cerró, eliminando las emisiones anuales de aproximadamente 4,000 toneladas de NO<sub>x</sub> y 15, 000 toneladas de SO<sub>2</sub>. En 2007 se redujo el contenido de azufre en el combustible diésel utilizado en vehículos todoterreno, ferroviarios y marítimos de 500 ppm hasta 15 ppm, durante el mismo año, Canadá limitó las emisiones de NO<sub>x</sub> a las centrales eléctricas de Ontario y Quebec a 39 y 5 kilotoneladas, respectivamente y hasta el 2008 Ontario había contratado un total de 1.370 MW de energía renovable limpia, suficiente para alimentar aproximadamente 350,000 hogares y disminuir las emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida (IJC, 2009).

En abril de 2014, Ontario anunció que había eliminado la generación de electricidad a carbón, mientras que en julio del mismo año entraron en vigor los nuevos límites para el combustible diésel utilizado en embarcaciones marinas grandes y motores estacionarios grandes, que limitan el azufre en estos combustibles a 1000 mg/kg (IJC, 2015).

Actualmente, Canadá continúa cumpliendo con su compromiso de monitorear y estimar las emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> de las unidades de servicios eléctricos nuevas y existentes con una capacidad nominal superior a 25 megavatios. Actualmente, la mayoría de las turbinas de gas natural con altas tasas de emisión operan con tecnología CEMS, al igual que las instalaciones donde se quema carbón (IJC, 2019). La tecnología CEMS es un sistema de monitoreo continuo de emisiones, es el equipo total necesario para la determinación de la concentración o tasa de emisión de un gas o materia particulada usando mediciones de un analizador de contaminantes y una ecuación de conversión, gráfico o programa de computadora para producir resultados en unidades de la limitación de emisión aplicable o estándar (US EPA, 2022g). Los CEMS son requeridos bajo algunas de las regulaciones de la EPA ya sea para determinaciones de cumplimiento continuo o para determinaciones de excedencias de los estándares.

*Estados Unidos:*

El Acid Rain Program derivado del compromiso de reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en los Estados Unidos, fue dividido en dos periodos. La fase I que abarca del año 1995 al 1999 y la Fase II que dio inicio en el año 2000.

El cumplimiento de la Fase I afectó a 263 unidades en 110 plantas de servicios públicos de electricidad, en su mayoría de carbón, ubicadas en 21 estados del este y medio oeste de los Estados Unidos, 182 unidades adicionales se unieron a la Fase I del programa como unidades de sustitución o compensación, elevando el número total de unidades afectadas de la Fase I a 445 (US EPA, 2022c). Esta fase permitió a las unidades afectadas elegir sus estrategias para el cumplimiento de emisiones de SO<sub>2</sub> establecido, las cuales eran:

- Cambio y/o mezcla de combustible, la cuál fue la estrategia principal para la reducción de emisiones de SO<sub>2</sub>, esto consistió en cambiar totalmente a carbón con bajo contenido de azufre, mezclar carbón con alto y bajo contenido de azufre o bien utilizar gas natural.
- Obtención de derechos de emisión adicionales, que implicaba obtener un número suficiente de derechos de emisión además de la asignación inicial, para no implementar ninguna otra acción para la reducción de emisiones.
- Instalación de scrubbers para la desulfuración de gases.
- Uso de controles implementados previamente, esto hace referencia a aquellas acciones que ya se habían tomado con anticipación para la reducción de emisiones debido a la existencia de un cumplimiento a nivel estatal.
- Retirar permanentemente una instalación con altas emisiones, o bien su utilización reducida o sustitución de las unidades.
- Repotenciación de calderas que consistió en reemplazar las calderas existentes por otras que utilizaran un combustible o tecnología diferente que causara menos emisiones de SO<sub>2</sub> (EIA, 1994).

La mayoría de las empresas de servicios públicos afectadas por la Fase I utilizaron uno o más de estas estrategias y con ello se logró una reducción de emisiones de SO<sub>2</sub> de



10 millones de toneladas, desde los niveles de 1980 hasta el año 2000 lo que representa una reducción general en las emisiones de este contaminante de más del 50%. Mientras tanto, las emisiones de NO<sub>x</sub> tuvieron una reducción hasta el año de 1999 de aproximadamente 424,000 toneladas, 32% en comparación a los niveles de 1980 (IJC, 2001).

En diciembre de 1999, la EPA anunció los estándares de emisiones para los tubos de escape en vehículos de pasajeros, incluidos los utilitarios, deportivos, furgonetas y camionetas, simultáneo a eso también incluyó estándares más estrictos del contenido de azufre en la gasolina disminuyéndolo a 30 ppm.

En el año 2000 comenzó en aplicación la Fase II del Acid Program Rain. Con respecto al control de emisiones de SO<sub>2</sub> se agregaron más unidades generadoras de electricidad a este programa, abarcando más de 2,000 unidades en total. Las unidades que se incluyeron por primera vez en la Fase II incluyeron unidades más pequeñas alimentadas con carbón, petróleo y gas, pero también involucró a las unidades de servicios públicos que daban servicio a los generadores con una capacidad de producción superior a 25 megavatios, mientras que para la reducción de los NO<sub>x</sub>, se implementó la tecnología del quemador de bajo NO<sub>x</sub> que fue más eficaz para poder establecer normas más estrictas para la emisión proveniente de calderas, además se establecieron limitaciones para otras calderas conocidas como Grupo 2 (calderas de fondo húmedo, ciclones, calderas de quemador de celda y calderas de combustión vertical), basadas en tecnologías de control de NO<sub>x</sub> (US EPA, 2022h). Aproximadamente 2,500 unidades de caldera dentro de aproximadamente 1,000 plantas de servicios públicos se vieron afectadas en la Fase II (EIA, 1994).

En septiembre de 2010, la EPA, estableció por primera vez los límites de emisión de NO<sub>x</sub> para todos los hornos de cemento nuevos, reconstruidos o modificado y en agosto del 2012 incluyó límites más estrictos para NO<sub>x</sub> en las unidades de producción de ácido nítrico, por otro lado, el combustible diésel para locomotoras y transportes marinos se redujo a un contenido de azufre de 15 ppm (IJC, 2015).

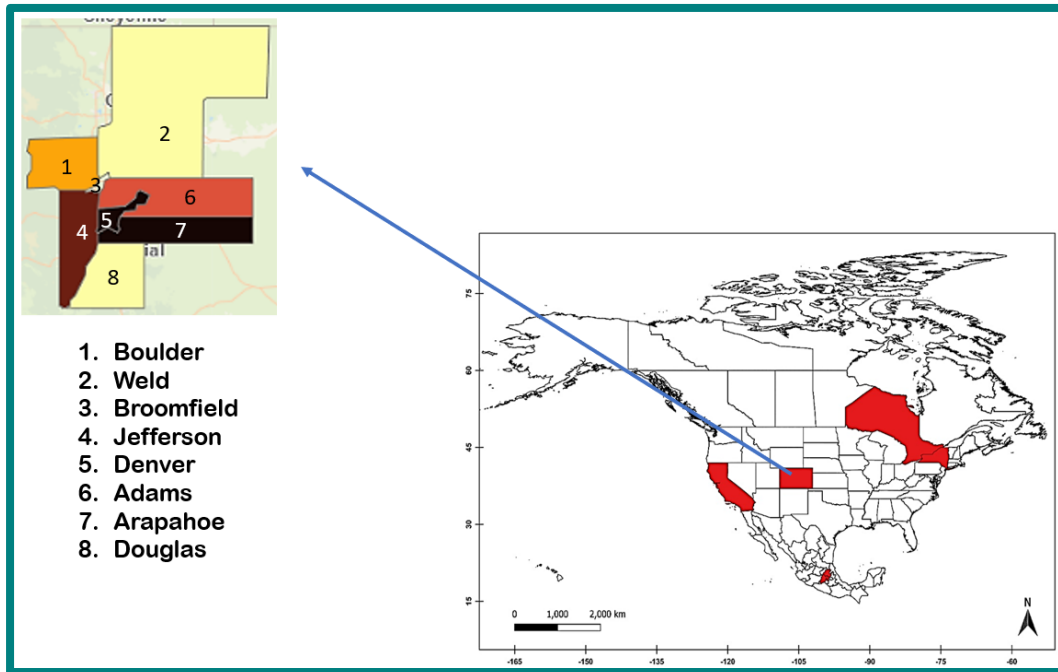
La EPA ha desarrollado procedimientos detallados para garantizar que las fuentes controlen y notifiquen las emisiones con un alto grado de precisión, exactitud, confiabilidad y consistencia. La mayoría de las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en los Estados Unidos también se miden con CEMS, que monitorean información importante como la cantidad de contaminación emitida por una chimenea (contaminante y concentración) y qué tan rápido ocurren las emisiones. En 2018, los CEMS monitorearon el 100% de emisiones en unidades con uso carbón.

Otras grandes fuentes de emisión que están equipadas con dispositivos de control de la contaminación están reguladas por la Regla de Supervisión de Garantía de Cumplimiento (CAM por sus siglas en inglés), esta incluye criterios que definen el monitoreo, reporte y el mantenimiento de registros que debe llevar a cabo una fuente para proporcionar una garantía razonable de cumplimiento con limitaciones y estándares de emisión. La EPA verifica rigurosamente la integridad y calidad del monitoreo y de los datos obtenidos y también realiza auditorías de campo específicas en fuentes que reportan datos sospechosos (IJC, 2019).

Actualmente las políticas y medidas aplicables al mejoramiento de la calidad del aire en Norteamérica particularmente por la presencia de contaminantes precursores de lluvia ácida se encuentran en constante actualización, pues el problema sigue latente, sobre todo en las grandes metrópolis de la región en donde la contaminación atmosférica representa un gran problema para la población.

### 3.2.4 Área Metropolitana de Denver, Colorado

El Área Metropolitana de Denver se encuentra en el estado de Colorado, en la región oeste de los Estados Unidos, está conformada por los condados de Adams, Arapahoe, Boulder, Broomfield, Denver City, Douglas y Jefferson (Figura 9), cuenta con aproximadamente 3.2 millones de habitantes, de los cuales 715,522 habitan en Denver City (U.S. Census Bureau, 2022b).



*Figura 9. Área Metropolitana de Denver, Colorado*

El área urbana de Denver abarca aproximadamente 1,760 km<sup>2</sup> (Poessel et al., 2016), esta zona está situada en valles a lo largo de la cuenca del río South Platte. El lado oeste de la subcuenca incluye el condado urbanizado de Boulder y el Rocky Mountain National Park, el cual abarca una variedad de ambientes montañosos, desde los prados que se encuentran en la zona de vida montañosa hasta los lagos alpinos y los imponentes picos de las montañas. Áreas urbanas más pequeñas como Longmont, Loveland y Greely se encuentran en el este de la subcuenca en conjunto con una intensa producción agrícola, así como de petróleo y gas, lo que se combina con un creciente desarrollo residencial (Wetherbee et al., 2022; Wetherbee et al., 2019).

Los vientos predominantes varían notablemente en la zona, se han encontrado fuertes vientos del noreste dominando el centro de Denver y fuertes vientos del suroeste en Boulder, mientras que las áreas montañosas son dominadas por vientos del oeste (Wetherbee et al., 2019). El Área Metropolitana de Denver es única porque la ubicación geográfica de la ciudad al pie de las Montañas Rocosas crea una inversión de

temperatura, esto atrapa los contaminantes cerca del suelo, lo que conduce a una mala calidad del aire.

La combinación de la geografía del área Metropolitana de Denver, con una altitud promedio de aproximadamente 2,072 msnm y llegando entre los 3,352 y 4,267 msnm en la región de las montañas, da como resultado un clima que se caracteriza por presentar veranos calurosos y secos con tormentas convectivas dispersas e inviernos fríos además de eventos de precipitación frontal típicamente moderados.

La temperatura media mensual oscila entre los 0°C en invierno y 21°C en verano, durante esta estación hay días calurosos en las llanuras, pero estos suelen ser aliviados por las tormentas de la tarde. Las regiones montañosas son casi siempre frescas. La humedad es generalmente bastante baja; esto favorece una evaporación rápida y una sensación relativamente cómoda incluso en los días calurosos. La fina atmósfera permite una mayor penetración de la radiación solar y da como resultado unas condiciones diurnas agradables incluso durante el invierno. La precipitación promedio que se presenta en la zona es de 420 mm al año (Doesken et al., 2003; Wetherbee et al., 2019).

### **3.2.4.1 Emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida en el Área Metropolitana de Denver, Colorado**

La Zona Metropolitana de Denver ha tenido problemas con la calidad del aire desde la década de 1960. En los años 70 y principios de los 80, esta región rompía los estándares de calidad del aire durante 200 días al año. Sin embargo, en 1970 se aprobó la Ley de Aire Limpio que requería regulaciones de todas las fuentes de emisiones al aire, lo que mejoró enormemente la calidad del aire en Denver. La ciudad mejoró los estándares de calidad del aire principalmente de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>, excepto el de O<sub>3</sub>. Esto ha causado que Denver sea reclasificado recientemente de "Moderado" a "Incumplimiento grave" debido a los altos niveles de O<sub>3</sub> (Doherty et al., 2021).

Con respecto a las emisiones de los contaminantes precursores de lluvia ácida que siguen siendo un tema de estudio en esta área metropolitana, las principales fuentes son en carretera (tráfico), consumo de petróleo y gas, y la emisión de fuentes puntuales (Eltarkawe et al., 2022).

Tomando en cuenta que los condados de Adams, Arapahoe, Boulder, Broomfield, Denver City, Douglas y Jefferson, conforman el Área Metropolitana de Denver, se estima que en 2017 se emitieron 50,768.34 ton de NO<sub>x</sub> (Tabla 5) en la región del Área Metropolitana de Denver (US EPA, 2020), de esta cantidad el 70.47% equivalente a 35,777.08 ton fueron emitidas a partir de fuentes móviles, principalmente por vehículos carreteros ligeros de no diésel (16,937.31 ton), por debajo de estos se encuentran los vehículos carreteros ligeros y pesados de diésel (8,645.31 ton), fuentes no carreteras con funcionamiento a base de gasolina y diésel (5,331.48 ton), aeronaves (2,176.72 ton) y otras como las locomotoras.

Las fuentes estacionarias produjeron un 25.18% de emisiones de NO<sub>x</sub>, esto es igual a 12,784.29 ton/año, la combustión residencial fue el tipo de fuente estacionaria que emitió más NO<sub>x</sub> por la quema de gas natural y madera con 3,766.66 ton. Las calderas industriales operadas con gas natural emitieron alrededor de 3,137.98 ton en el Área Metropolitana de Denver, por otro lado, la generación de energía produjo 2,474.28 ton de NO<sub>x</sub> y los procesos industriales 2,371.17 ton.

Una cantidad de 56 ton de NO<sub>x</sub> fueron emitidas por parte de fuentes de incendio, lo que es igual a sólo el 0.11% de las emisiones totales de este contaminante debido a incendios forestales, en el caso de las fuentes biogénicas estas representaron un mayor porcentaje (4.24%) que es lo mismo que 2,150.97 ton/año proveniente principalmente de la vegetación y usos de suelo.

En el caso de las emisiones de SO<sub>2</sub> en el Área Metropolitana de Denver (Tabla 5), en el año 2017 se emitieron 3,288.41 ton de este contaminante (US EPA, 2020), la mayor contribución con un 82.92% fue por parte de las fuentes estacionarias, la generación de energía como parte de las fuentes estacionarias, emitió 1,397.23 ton de SO<sub>2</sub>, en segundo lugar están los procesos industriales que tuvieron emisiones de 521.56 ton,

principalmente aquellos dedicados a la producción de gas (84.13 ton/año), refinerías de petróleo (76.14 ton/año), manufactura de productos químicos (43.34 ton/año) y cemento (12.87 ton/año). En tercer lugar, se encuentran las calderas industriales principalmente aquellas que funcionan con gas natural y petróleo crudo.

*Tabla 5. Emisiones anuales de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, Área Metropolitana de Denver, 2017 (US EPA, 2020)*

Tipo de fuente	NO <sub>x</sub>		SO <sub>2</sub>	
	Emisión (ton/año)	Porcentaje de emisión (%)	Emisión (ton/año)	Porcentaje de emisión (%)
Fuentes estacionarias	12,784.29	25.18	2,726.76	82.92
Fuentes móviles	35,777.08	70.47	530.33	16.13
Fuentes de incendio	56.00	0.11	31.32	0.95
Fuentes biogénicas	2,150.97	4.24	N/A	N/A
<b>TOTAL</b>	<b>50,768.34</b>	<b>100.00</b>	<b>3,288.41</b>	<b>100.00</b>

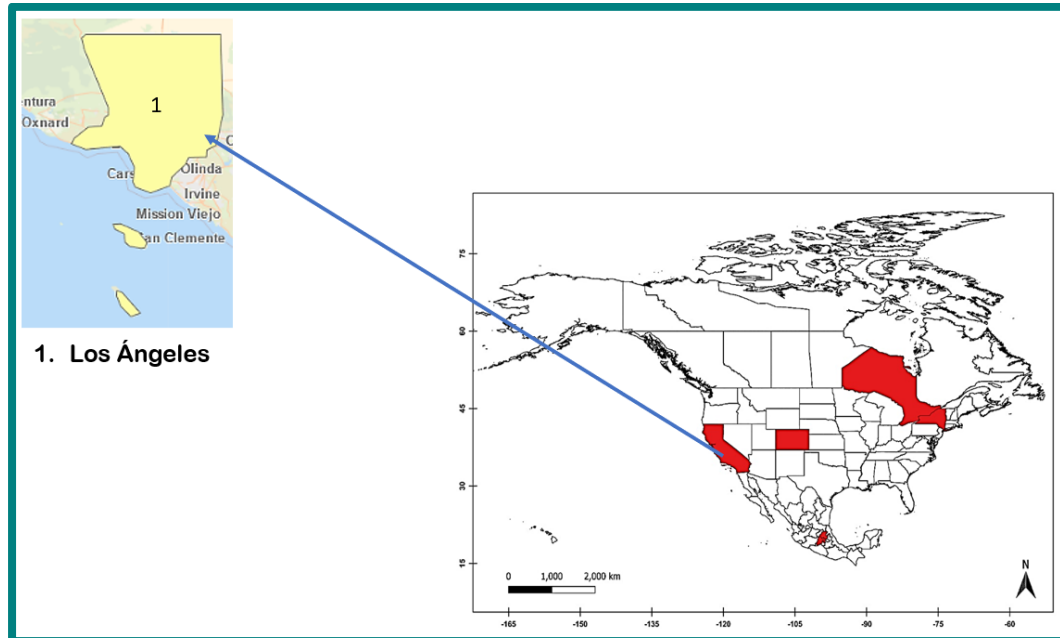
N/A: no aplica; la categoría no emite el contaminante referido.

Las fuentes móviles emitieron el 16.13% (530.33 ton), en este caso las aeronaves aportaron en mayor cantidad a la emisión de SO<sub>2</sub> (315.16 ton/año), en orden descendente se encuentran los vehículos carreteros ligeros de no diésel (154.61 ton), los vehículos carreteros pesados de diésel (19.02 ton) y otros en menor proporción como locomotoras, vehículos carreteros pesados de diésel y no carreteros de gasolina.

### 3.2.5 Los Ángeles, California

Los Ángeles California, es una de áreas metropolitanas más grandes del mundo (Figura 10), con una población de 10,014,009 habitantes (U.S. Census Bureau, 2022c), altitud de 98 msnm y 10,575 km<sup>2</sup> de extensión (LA County Government, 2022), esta importante ciudad es parte de la Cuenca Aérea de la Costa Sur, que es rodeada por terreno montañoso y el Océano Pacífico. Las áreas urbanas cubren principalmente las llanuras costeras y se encuentran dentro de los valles. Las montañas adyacentes (montañas de San Gabriel) son generalmente demasiado escarpadas para un gran desarrollo urbano.

Esto se debe en gran parte a que son consideradas como "jóvenes", lo que significa que todavía se están construyendo y erosionando en esta región sísmicamente activa (NASA, 2023).



*Figura 10. Ciudad de los Ángeles, California*

El clima de Los Ángeles se destaca por ser moderado o bien mediterráneo con cambios estacionales pronunciados en las precipitaciones, un verano seco y un invierno lluvioso, pero transiciones relativamente modestas en temperatura. Las precipitaciones significativas entre mayo y octubre son raras, cualquier lluvia que ocurra en esta época es generalmente resultado de tormentas eléctricas aisladas asociadas con la humedad subtropical. Durante el resto del año, de noviembre a abril, las tormentas del Pacífico a veces alimentadas con humedad subtropical, empujan frentes fríos a través de California de noroeste a sureste. Estas tormentas y sistemas frontales representan la mayor parte de la precipitación anual del área (Bruno et al., 2000). El promedio de precipitación anual en Los Ángeles es de 369 mm, además presenta un intervalo de temperaturas de 8 a 30 °C (NOAA, 2023).

Las características geográficas antes mencionadas y el factor del paisaje densamente urbanizado, conlleva a generar altas emisiones por parte del transporte, haciendo que

la contaminación se acumule en la cuenca de los Ángeles, lo que lleva a causar afectaciones negativas a los seres humanos y ecosistemas. Los contaminantes emitidos cerca de la costa quedan atrapados en una capa límite atmosférica poco profunda formada por el aire cálido que se hunde de la celda de alta presión subtropical del Pacífico que recubre las temperaturas frías de la superficie del mar del afloramiento oceánico y la dispersión débil de contaminantes está relacionada con la desaceleración de los vientos predominantes del norte por las montañas de San Rafael (Jury, 2020; Muñiz et al., 2018).

La alta contaminación del aire en la Ciudad de Los Ángeles es producida por el clima anticiclónico caracterizado por vientos ligeros bajo una inversión de temperatura lo que inhibe la difusión. Los vientos provenientes del noroeste de Point Conception rara vez penetran en la costa debido a un arrastre superficial del entorno urbano, por lo que las emisiones de contaminantes en el aire tienden a recircular sobre Los Ángeles (Jury, 2020).

### **3.2.5.1 Emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida en Los Ángeles, California**

Aunque los niveles de contaminantes del aire han disminuido drásticamente en California durante los últimos 30 años, muchas partes del estado todavía están plagadas de problemas de calidad del aire. De hecho, el condado de Los Ángeles sigue siendo una de las regiones más contaminadas del país (County of Los Angeles Public Health, 2022).

Según el último inventario de la EPA, publicado en el 2020, en el año 2017 se emitieron un total de 79,832.82 ton de NO<sub>x</sub> en la Ciudad de los Ángeles (US EPA, 2020) (Tabla 6), de las cuales el 18.14% fue proveniente de fuentes estacionarias, el 35% de la emisiones de estas fuentes estacionarias fue por parte de calderas industriales operadas con gas natural, 25% por procesos industriales con 3,690.79 ton, de estos procesos destaca en primer lugar por su cantidad de emisiones de NO<sub>x</sub> las refinerías de petróleo, la industria de metales no ferrosos y la producción de gas.



Las fuentes móviles emitieron en total 64,597.77 ton de NO<sub>x</sub>, de esta cantidad total el 26.5 % fue proveniente de vehículos pesados carreteros de diésel con 17,139.49 ton, en segundo lugar se encuentran los vehículos ligeros de no diésel que aportan 16,063.24 ton de este contaminante al año, los buques marinos comerciales se encuentran en el tercer lugar con una emisión total de 9,435.84 ton, además existen otras fuentes que aportan emisiones en menor proporción como las aeronaves con 4,118.19 ton, el uso de diésel y gasolina para transporte no carretero con 7,225.53 y 3,645.93 ton al año respectivamente.

En el caso de emisiones de NO<sub>x</sub> por fuentes de incendio representaron el 0.94% de las emisiones totales, 638.02 ton procedieron de incendios forestales, 91.38 ton de la quema de campos agrícolas y 20.90 ton de incendios prescritos.

**Tabla 6. Emisiones anuales de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, Los Ángeles, 2017** (US EPA, 2020)

Tipo de fuente	NO <sub>x</sub>		SO <sub>2</sub>	
	Emisión (ton/año)	Porcentaje de emisión (%)	Emisión (ton/año)	Porcentaje de emisión (%)
Fuentes estacionarias	14,484.74	18.14	2,897.03	64.69
Fuentes móviles	64,597.77	80.92	1,283.04	28.65
Fuentes de incendio	750.32	0.94	298.488	6.66
Fuentes biogénicas	N/A	N/A	N/A	N/A
<b>TOTAL</b>	<b>79,832.82</b>	<b>100.00</b>	<b>4,478.55</b>	<b>100.00</b>

N/A: no aplica; la categoría no emite el contaminante referido.

Con respecto a las emisiones de SO<sub>2</sub>, estas fueron de 4,478.55 ton en el año 2017 (US EPA, 2020) (Tabla 6), de este total el 66.69% proviene de fuentes estacionarias, dentro de las cuáles las de mayor emisión son aquellas provenientes de procesos industriales con un total de 1,830.42 ton al año de SO<sub>2</sub>, seguidas de las emisiones por calderas industriales con 571.08 ton, mientras que la generación de energía eléctrica emite 57,864 ton de SO<sub>2</sub>, fuentes estacionarias con emisiones en menor porcentaje según el inventario, son la combustión residencial, fuentes misceláneas y solventes.

Las fuentes móviles emiten el 28.65% equivalente a 1,283.04 ton de SO<sub>2</sub> al año, de esta cantidad 575.98 ton corresponden a las aeronaves, siendo estas la fuente de mayor emisión, en segundo lugar, se encuentran los buques marinos comerciales que emiten 306.84 ton de SO<sub>2</sub> al año, seguido de los vehículos ligeros de no diésel y los vehículos pesados de diésel con 302.73 y 40.00 ton de SO<sub>2</sub> respectivamente. Otras fuentes con emisiones más bajas son los vehículos pesados de no diésel, vehículos ligeros de diésel, transporte no carretero a gasolina y locomotoras.

Por último, las fuentes de incendio que contribuyeron mayormente a las emisiones de SO<sub>2</sub> en la Ciudad de los Ángeles son los incendios forestales con una cantidad de 276.47 ton al año, mientras que la quema de campos agrícolas emitió 11.68 ton y los incendios prescritos sólo 10.32 ton.

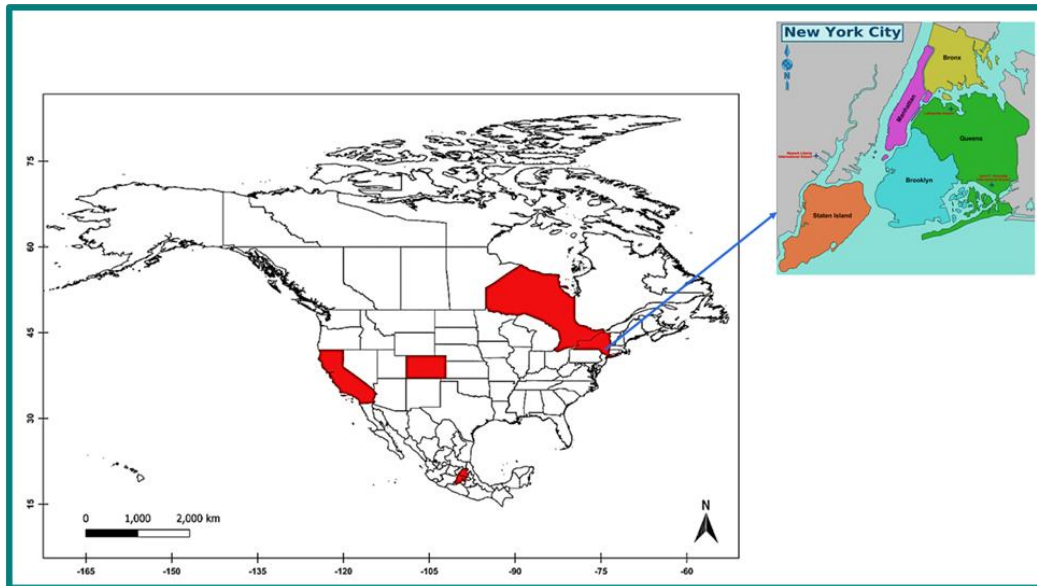
### 3.2.6 Nueva York, Estados Unidos

La Ciudad de Nueva York, está considerada como una de las ciudades más influyentes del mundo, además de ser la ciudad con mayor densidad de población en los Estados Unidos, con más de 11,000 personas por km<sup>2</sup> y con un total de 20,201,249 habitantes (U.S. Census Bureau, 2022a).

Nueva York, está ubicado en la desembocadura del río Hudson, además cuenta con largas costas en el Océano Atlántico, la Bahía de Nueva York, Long Island Sound e East River. Las tres islas, Manhattan, Staten Island y Long Island, están separadas principalmente por estrechos de marea. La fusión de Brooklyn, Manhattan, Queens, Staten Island y Bronx se consideran como la región de mayor asentamiento en la ciudad de Nueva York (Figura 11).

La mayor parte del relieve natural en la ciudad de Nueva York ha sido suavizado a través de los procesos de urbanización, la zona metropolitana tiene un promedio de elevación de 10 msnm y una superficie de 789 km<sup>2</sup>. El uso de la tierra en la Ciudad de Nueva York es una mezcla heterogénea de distritos comerciales con imponentes estructuras nuevas y antiguas que han aumentado el uso de energía durante el día,

lugares residenciales densamente poblados con mayor uso de energía por la noche, ubicaciones residenciales menos densas con viviendas unifamiliares y bifamiliares y muchas áreas mixtas residenciales y comerciales, parques y espacios verdes (Shaker et al., 2019).



*Figura 11. Ciudad de Nueva York, Nueva York*

Debido a su ubicación costera en el extremo sureste, la Ciudad de Nueva York se caracteriza por tener una atmósfera costera marina y un clima templado con veranos cálidos y húmedos, lluvias en todo el año, y un presupuesto hídrico positivo, los inviernos son fríos y ventosos. En el transcurso del año, las temperaturas suelen variar desde los 2°C en enero a 29°C en julio y según datos climáticos, la ciudad de Nueva York tiene una precipitación media anual de 1269 mm, la cual es relativamente uniforme durante todo el año, a menudo en forma de nieve en enero y febrero (Meir et al., 2013; Shaker et al., 2019).

El verano y el invierno de Nueva York presentan tradicionalmente más contaminación del aire que la primavera y el otoño. Esta tendencia se atribuye al clima invernal, que incluye inversiones de aire fresco, y al clima de verano, que incluye abundante radiación solar que crea ozono atmosférico a partir de gases precursores.

### 3.2.6.1 Emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida en Nueva York.

La calidad del aire de la Ciudad de Nueva York ha mejorado en las últimas décadas, ya que la Ciudad y el Estado han trabajado para reducir las emisiones de fuentes regionales y locales. A pesar de este progreso, la contaminación del aire sigue siendo una de las principales amenazas para la salud ambiental de todos los neoyorquinos. Los que corren mayor riesgo son los adultos mayores, los niños y las personas con problemas de salud preexistentes (NYC Health Program, 2022).

Durante el 2017 se emitieron 44,068.20 ton de NO<sub>x</sub> en la Ciudad de Nueva York (Tabla 7) (US EPA, 2020), un 58.74% o 25,884.07 ton provenientes de fuentes móviles como vehículos ligeros de no diésel, vehículos pesados de diésel y buques marinos comerciales. En el inventario publicado por la EPA, también se consideraron aeronaves, locomotoras y transporte no carretero de diésel y gasolina, como fuentes móviles de NO<sub>x</sub>, pero con un menor porcentaje de emisión anual.

Las fuentes estacionarias son el segundo tipo de fuente con más emisiones de NO<sub>x</sub> en Nueva York, con un total de 18,151.12 ton en 2017, la combustión residencial con gas natural es el tipo de fuente con mayor cantidad de emisiones de NO<sub>x</sub> (7,231.76 ton/año). La generación de energía produce 2,563.32 ton de NO<sub>x</sub>, la mayor parte viene de instalaciones dónde se utiliza gas natural, seguido de carbón, petróleo y biomasa.

Otro tipo de fuentes estacionarias como las calderas industriales producen 1,849.52 ton de NO<sub>x</sub> al año, mientras que procesos industriales son generadores de 1.31 ton, de este tipo de procesos el que mayor contaminación por NO<sub>x</sub> produce es la refinación de petróleo, en orden descendente se encuentran la producción de gas, manufactura de cemento, producción de papel, procesos de metales ferrosos y no ferrosos. Las emisiones de NO<sub>x</sub> por fuentes biogénicas representan el 0.07% del total en la Ciudad de Nueva York, todo este porcentaje proviene de la vegetación y el suelo.

**Tabla 7. Emisiones anuales de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> Nueva York, 2017** (US EPA, 2020)

Tipo de fuente	NO <sub>x</sub>		SO <sub>2</sub>	
	Emisión (ton/año)	Porcentaje de emisión (%)	Emisión (ton/año)	Porcentaje de emisión (%)
Fuentes estacionarias	18,151.12	41.19	1,447.79	64.45
Fuentes móviles	25,884.07	58.74	798.10	35.53
Fuentes de incendio	0.69	0.00	0.39	0.02
Fuentes biogénicas	32.32	0.07	N/A	N/A
<b>TOTAL</b>	<b>44,068.20</b>	<b>100.00</b>	<b>2,246.28</b>	<b>100.00</b>

N/A: no aplica; la categoría no emite el contaminante referido.

En relación con las emisiones de SO<sub>2</sub> en la Ciudad de Nueva York, estas fueron de 2,246.28 ton según el inventario 2017 de la EPA. Las fuentes estacionarias con 1,447.79 ton de SO<sub>2</sub> al año, tienen el mayor porcentaje de contribución (64.45%) al total de emisiones. Las calderas industriales son el tipo de fuente estacionaria que más contribuye a emisiones de SO<sub>2</sub> pues genera 488.82 ton/año, en segundo lugar, se encuentran los procesos industriales, como los correspondientes a la fabricación de metales no ferrosos, ferrosos, la producción de papel y por último la manufactura de productos químicos. Por otro lado, la generación de electricidad a partir de la quema de carbón genera 235.14 ton de SO<sub>2</sub> al año.

Lo que se refiere a las emisiones de SO<sub>2</sub>, desde fuentes móviles en la Ciudad de Nueva York se emitieron 798.10 ton/año, el mayor porcentaje fue por parte de vehículos carreteros ligeros de no diésel (149.07 ton), se añaden emisiones de aeronaves (537.67 ton), buques marinos comerciales (47.12 ton) y en menor proporción emisiones provenientes de vehículos carreteros pesados de diésel y no diésel.

Finalmente, las fuentes de incendios produjeron 0.39 ton de SO<sub>2</sub>, de este total los incendios forestales emitieron el 100% de este contaminante.

### 3.2.7 Toronto, Canadá

Toronto es la ciudad más grande de Canadá y líder mundial en áreas como negocios, finanzas, tecnología, entretenimiento y cultura, cuenta con 6,202,225 habitantes de los cuales 2,794,356 pertenecen al área metropolitana (Statistics Canada, 2022)

La región de Toronto (Figura 12) está ubicada en una amplia meseta inclinada cortada por numerosos valles fluviales, tiene un área de 5,903 km<sup>2</sup>, pero sólo 630 km<sup>2</sup> corresponden a la parte metropolitana. El paseo marítimo se encuentra a 76.5 msnm, el punto más alto es la intersección de Steeles Avenue West y Keele Street con 209 msnm, cuenta con 207 km de ríos y arroyos que atraviesan la ciudad y que desembocan en el lago Ontario y tiene más de 8,000 hectáreas de tierra destinadas a barrancos, valles, arboledas, parques, playas y campos (Ontario Government, 2022).

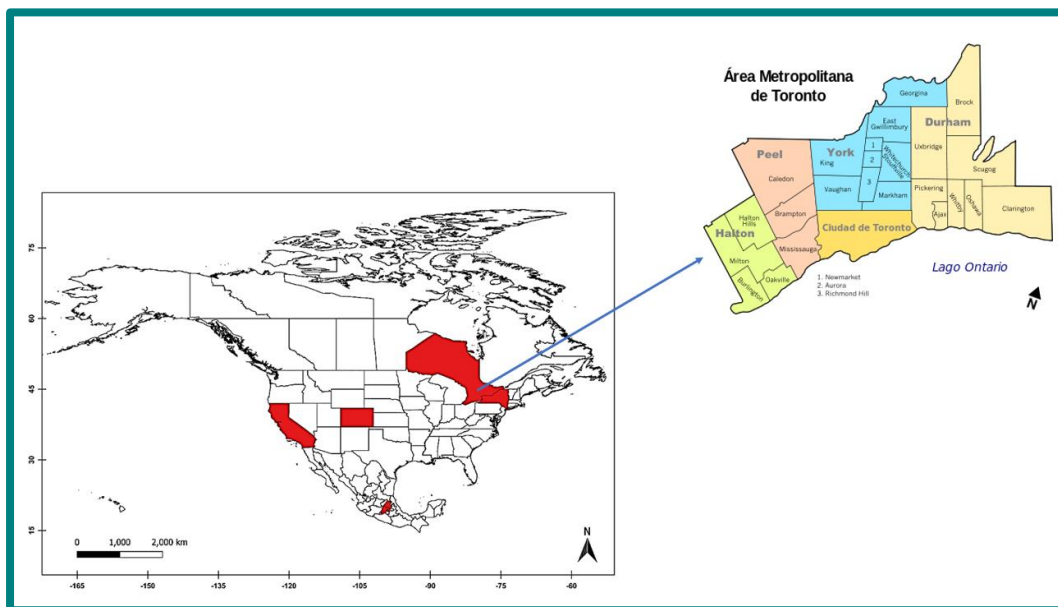


Figura 12. Ciudad de Toronto, Canadá

Toronto se ubica en las latitudes medias y al sur de Ontario, Canadá, la cual es una zona de transición entre las masas de aire polares y tropicales, lo que genera ciclones en latitudes medias y variaciones climáticas considerables. El clima de Toronto se

clasifica como templado, caracterizado por veranos húmedos, inviernos fríos con nieve, sin estaciones secas con un promedio anual de precipitaciones (nieve y lluvia) de 834 mm y una amplia variación de temperaturas anuales, mitigadas por la presencia del lago Ontario. La temperatura promedio de diciembre a febrero está por debajo de 0°C, mientras que de mayo a octubre se superan los 10°C, julio se clasifica como el mes más caluroso con una temperatura media de 22.1°C (Gough, 2008; Gough et al., 2014).

Al igual que en cualquier otra área, la meteorología juega un papel importante en la calidad del aire de Toronto. La velocidad y dirección del viento, la radiación solar, la temperatura del aire y el vapor de agua atmosférico tienen gran influencia en la formación de contaminantes secundarios en la atmósfera.

La temperatura es de particular interés en el caso de la ciudad de Toronto pues esta es considerada como una isla de calor urbana, preocupando mayormente a las autoridades por la formación excesiva de ozono en la región. También se ha encontrado que cerca de los lagos, la dirección y velocidad del viento se han convertido en factores importantes en la temperatura, así como en el transporte de contaminantes, sin embargo, también se considera que los vientos provenientes de Estados Unidos pueden transportar contaminantes en el aire provenientes de la actividad industrial hacia Toronto, esto ocurre particularmente en verano cuando la dirección de los vientos en Toronto es del suroeste (Taha et al., 2002).

### **3.2.7.1 Emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida en Toronto, Canadá.**

Las tendencias recientes en los niveles de los cinco contaminantes atmosféricos más comunes entre los que se encuentran los NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, sugieren que la calidad del aire en Toronto está mejorando. Sin embargo, aún queda mucho por hacer para reducir las emisiones en esta área (Toronto Government, 2022).

El Inventario de Emisiones de Contaminantes del Aire (APEI por sus siglas en inglés) es un informe anual de emisiones de contaminantes del aire en todo Canadá publicado

por el Environment and Climate Change Canada. El informe detalla la liberación de contaminantes del aire de todas las fuentes conocidas desde 1990. El APEI cumple muchos propósitos, entre ellos: apoyar el desarrollo y el seguimiento del progreso en estrategias, políticas y regulaciones de gestión de la calidad del aire (ECCC, 2023b). En el caso de la Ciudad de Toronto no hay una base de datos específica para consultar las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en la región, sin embargo, está disponible la consulta para la provincia de Ontario, lugar dónde pertenece la región de Toronto.

De acuerdo con el último inventario de emisiones del año 2021, publicado por la ECCC dónde se clasifican las emisiones en 11 tipos de fuentes (Tabla 8), en la provincia de Ontario se emitieron 188,637 ton de NO<sub>x</sub>, (ECCC, 2023a) de las cuales 104,970 fueron provenientes de transporte y equipo móvil, de estas 1,741 ton fueron por parte de la operación de transporte aéreo, 6,300 ton de la navegación nacional marítima, pesquera y militar, 31,861 ton de vehículos pesados de diésel, 3,220 de vehículos ligeros de gasolina, 10,969 ton por parte de equipos y vehículos de diésel todoterreno, 18,073 ton del transporte ferroviario y en menor proporción emisiones por parte de motocicletas, vehículos diésel ligeros, entre otros.

**Tabla 8. Emisiones anuales de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, Toronto, Canadá, 2021** (ECCC, 2023a)

Tipo de fuente	NO <sub>x</sub>		SO <sub>2</sub>	
	Emisión (ton/año)	Porcentaje de emisión (%)	Emisión (ton/año)	Porcentaje de emisión (%)
Industrias minerales	23,075	12.23	56,694	59.00
Industria de gas y petróleo	8,133	4.31	22,046	22.94
Generación de energía eléctrica	5,042	2.67	322	0.34
Manufactura	15,114	8.01	15,436	16.06
Transporte y equipo móvil	104,970	55.65	462	0.48
Agricultura	1,260	0.67	8	0.01
Comercial/Residencial/Institucional	28,306	15.01	520	0.54
Incineración y residuos	2,687	1.42	601	0.63
Pinturas y solventes	25	0.01	N/A	N/A
Polvos	N/A	N/A	N/A	N/A
Incendios	24	0.01	0.35	0.0004
<b>TOTAL</b>	<b>188,637</b>	<b>100</b>	<b>96,089</b>	<b>100</b>

N/A: no aplica; la categoría no emite el contaminante referido.



En cuanto a las emisiones de  $\text{NO}_x$  por fuentes comerciales/residenciales/institucionales, estas representaron un 15.01% del total de  $\text{NO}_x$  en Ontario, la industria mineral aportó el 12.23% de emisiones, específicamente debido a la industria del cemento, concreto y asfalto. El tipo de fuente referente a la manufactura emitió 15,114 ton/año de  $\text{NO}_x$ , principalmente por manufactura química como la producción de fertilizantes, la industria petroquímica y la fabricación de papel. Abordando las fuentes de emisión correspondientes a la categoría de industrias de gas y petróleo se menciona que generaron 8,133 ton de  $\text{NO}_x$ , la refinación de petróleo fue la subcategoría de este tipo de fuentes que más emitió  $\text{NO}_x$  con un total de 4,740 ton/año.

Existen otro tipo de fuentes con un grado menor de emisiones de  $\text{NO}_x$ , como lo son la generación de energía eléctrica a partir de gas natural y productos refinados de petróleo, la agricultura y la incineración de residuos.

La cantidad de  $\text{SO}_2$  generada en el 2021 en la provincia de Ontario sumó 96,089 ton (ECCC, 2023a), en el caso de este contaminante, el 59% fue emitido por las industrias minerales o minero metalúrgicas, prioritariamente por la manufactura de cemento y asfalto. El tipo de fuente correspondiente a la industria del gas y petróleo generó un 22.94% de  $\text{SO}_2$  lo que es equivalente a 22,046 ton/año, parte de estas emisiones fueron producidas por el proceso de refinación de petróleo (21,344 ton).

Por parte de las fuentes pertenecientes a la categoría de manufactura se aportó el 16.06% o bien 15,436 ton de  $\text{SO}_2$ , en su mayoría por la manufactura química y la industria petroquímica. Fuentes como la generación de energía sólo emitieron 322 ton de  $\text{SO}_2$  al año principalmente por el uso de gas natural, referente al transporte y equipo móvil, la navegación marítima, pesquera y militar causó la emisión de 146 ton de  $\text{SO}_2$ , por su parte el uso de camiones y automóviles de gasolina de servicio ligero ocasionaron emisiones de 130 ton de  $\text{SO}_2$ . Por último, se consideraron otras fuentes de menor emisión de este contaminante como la incineración de residuos y la agricultura.

## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Para la realización de este proyecto se siguió la metodología descrita en la figura 13, comenzando con la revisión minuciosa de los métodos para el muestreo y análisis del depósito atmosférico húmedo en la ZMCM, que se ha realizado desde el año 2003 en colaboración con la SEDEMA y la SCA del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM.

Paralelo a la revisión anterior y la validación de los resultados obtenidos, se realizó la caracterización y recopilación de información acerca del depósito atmosférico húmedo en los sitios de estudio de Norteamérica elegidos, realizando un estudio que englobó la revisión de sitios de monitoreo disponibles y activos, ubicación, clasificación urbana y disponibilidad de datos para el periodo de estudio establecido.

Una vez obtenidos los datos necesarios correspondientes a los diferentes sitios de estudio, estos fueron analizados por separado para cada ciudad, para lo cual se calcularon los promedios ponderados anuales de cada parámetro analizado en las muestras de depósito atmosférico húmedo, para posteriormente ser comparados entre sitios, dicha actividad se realizó para obtener resultados que permitieran ser discutidos con el fin de proponer estrategias de prevención, minimización y control de contaminantes precursores de lluvia ácida en la ZMCM.

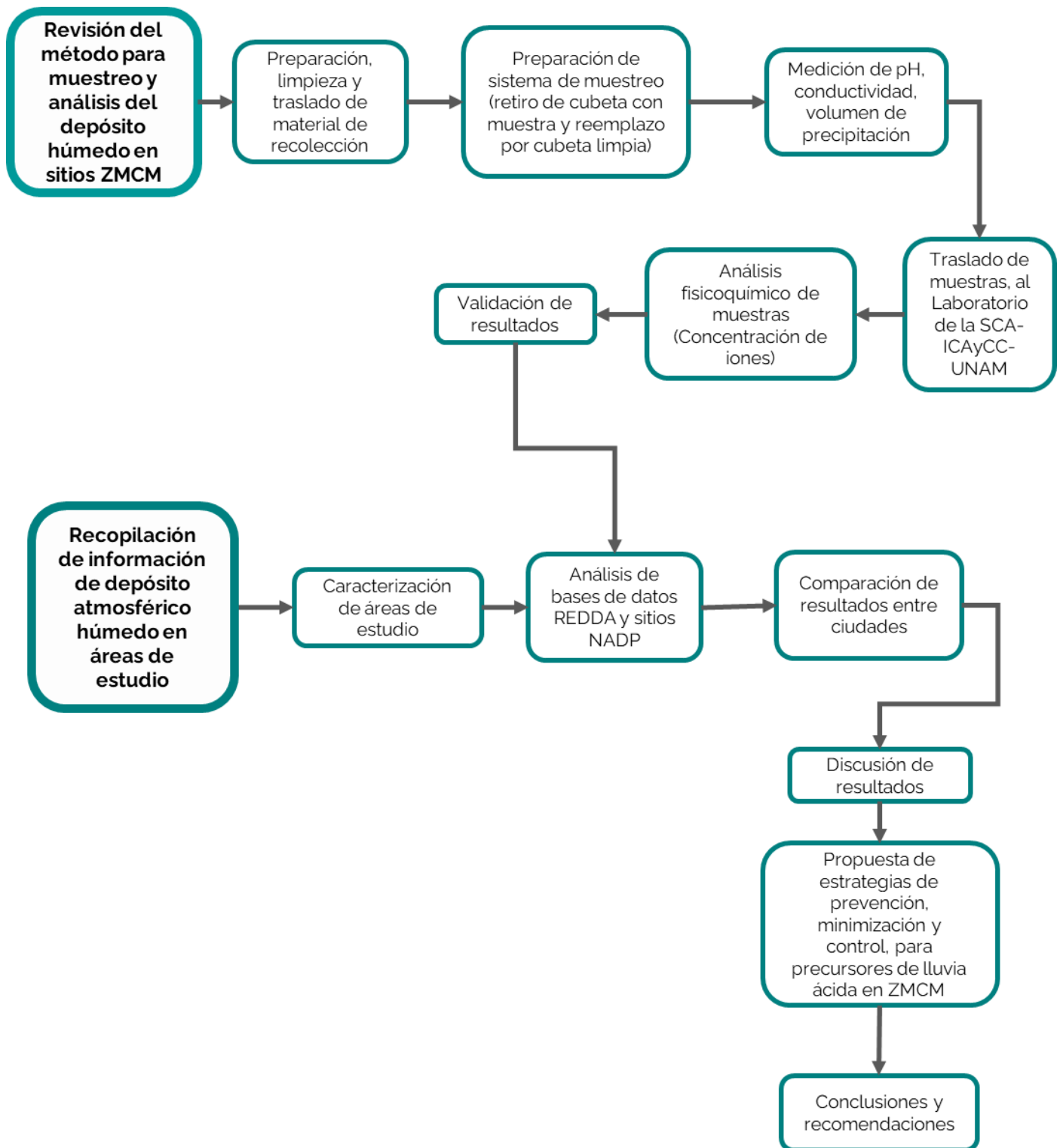


Figura 13. Metodología para la evaluación de lluvia ácida en zonas urbanas de Norteamérica

## 4.1 Muestreo y análisis del depósito atmosférico húmedo

El muestreo del depósito atmosférico húmedo se hace semanalmente tanto en la REDDA de la ZMCM como en la NTN del NADP, mientras que en el sitio ICAYCC de la UNAM el muestreo se hace diariamente. En todos los casos se realiza siguiendo los protocolos del NADP, bajo el cumplimiento de un programa de Aseguramiento y Control de Calidad (QA/QC, por sus siglas en inglés) el cual es un procedimiento que involucra la colección de muestras y su traslado a laboratorio mediante una cadena de custodia para su análisis fisicoquímico, así como el análisis y validación de datos (Alarcón, 2012).

### 4.1.1 Muestreo de depósito atmosférico húmedo

El colector automático de depósito atmosférico húmedo tanto de la REDDA como del NADP, cuenta con un balde de polietileno de alta densidad (HDPE) etiquetado como “húmedo o wet” (Figura 14), este cuenta con una tapa accionada por un motor que tiene una almohadilla comprimible que sella el balde para que no quede expuesto a la atmósfera, cuando hay presencia de eventos de precipitación, un sensor detecta las gotas de lluvia y activa el motor que mueve la tapa del balde colectando así la precipitación (NADP, 2022a).



Figura 14. Sistema automático de muestreo de depósito atmosférico REDDA

El sensor se calienta y ayuda a evaporar las gotas de lluvia enviando una señal al sistema para que la tapa se mueva nuevamente y cierre el balde que recolectó la precipitación, tan pronto esta termine.



*Figura 15. Sistema automático de muestreo de depósito atmosférico húmedo NADP*

#### **4.1.2 Obtención y preservación de muestras**

Los recipientes de recolección de la precipitación, tanto baldes y botellas de polipropileno de alta densidad (Nalgene), fueron lavados y enjuagados con agua desionizada en el laboratorio de la SCA-ICAYCC, el indicador principal de una buena limpieza es la conductividad, si la conductividad del agua de enjuague de las botellas es menor a  $1 \mu\text{S}$ , entonces se puede asegurar que el material de recolección está limpio y listo para usarse.

Al realizado el muestreo en el sistema automático, se debe retirar el balde etiquetado con la muestra correspondiente y sustituirlo por uno limpio en el sistema de muestreo. Parte de la muestra del depósito atmosférico húmedo se trasvasa en campo a una probeta para medir los parámetros de pH y conductividad, el volumen de la precipitación se mediante la lectura del pluviómetro. El resto de la muestra obtenida se almacena en

una botella Nalgene de 500 mL, previamente etiquetada para su identificación (Figura 16).

CDMX	RED DE DEPÓSITO ATMOSFÉRICO
	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
Sitio de muestreo:	_____ Técnica <u>DH</u>
Período de muestreo:	_____ al _____
Hora de muestreo:	_____ h.
pH:	_____
Temperatura:	_____ °C
Precipitación pluvial:	_____ ml
Conductividad:	_____ $\mu\text{S}/\text{cm}$

*Figura 16. Etiqueta de identificación para muestras de depósito atmosférico húmedo de la REDDA*

Las muestras se almacenan y transportan bajo una rigurosa cadena de custodia (Anexo 1-REDDA), en un plazo no mayor a una semana hacia laboratorio, a una temperatura de 4°C. En el caso del muestreo correspondiente al NADP, se debe llenar un formato nombrado Field Observer Report Form (FORF) (Anexo 2).

#### 4.1.3 Análisis fisicoquímico de las muestras

Las muestras de la REDDA recibidas en el laboratorio de la SCA-ICAYCC de la UNAM, son analizadas fisicoquímicamente en laboratorio determinando pH, conductividad, la concentración de los iones sodio  $[\text{Na}^+]$ , amonio  $[\text{NH}_4^+]$ , potasio  $[\text{K}^+]$ , magnesio  $[\text{Mg}^{2+}]$ , calcio  $[\text{Ca}^{2+}]$ , sulfato  $[\text{SO}_4^{2-}]$ , cloruro  $[\text{Cl}^-]$ , y nitrato  $[\text{NO}_3^-]$ .

Para poder realizar el análisis antes descrito, las muestras deben someterse previamente a un proceso de acondicionamiento, para lo cual la muestra debe ser filtrada al vacío utilizando un filtro Millipore de 0.22  $\mu\text{m}$  (Figura 18)



*Figura 17. Sistema de filtración de las muestras de depósito atmosférico húmedo SCA-ICAYCC*

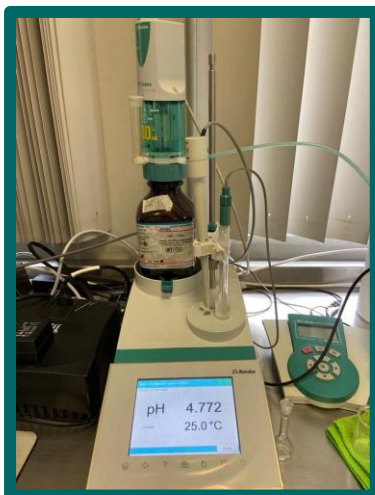


*Figura 18. Sistema de filtración de las muestras de depósito atmosférico húmedo, NADP*

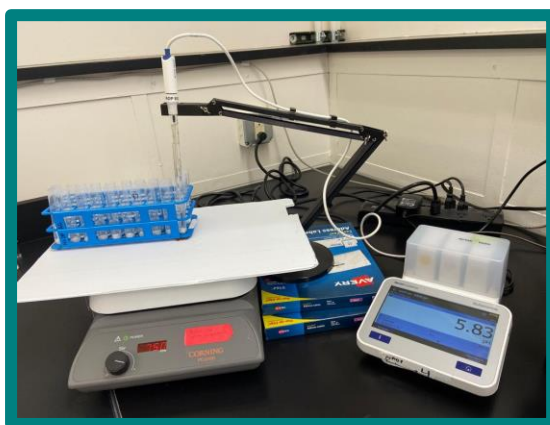
#### 4.1.3.1 Medición de pH

La determinación en laboratorio del parámetro de pH de las muestras obtenidas de la REDDA y del sitio del ICAYCC fue realizada con un potenciómetro Metrohm 916 Ti-Touch (Figura 19), el electrodo de este equipo es sumergido en un volumen de la muestra de aproximadamente 50 mL con agitación y temperatura constante (25°C). El procedimiento para la medición del pH en muestras del NADP, es el mismo, pero en este caso el equipo utilizado es un potenciómetro Mettler S700 (Figura 20)





*Figura 19. Potenciómetro pH, SCA-ICAyCC Metrohm 916 Ti-Touch*



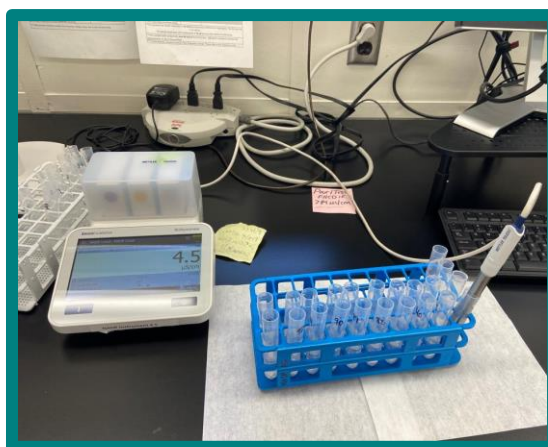
*Figura 20. Potenciómetro de pH, NADP, Mettler S700*

#### 4.1.3.2 Medición de conductividad

La conductividad como indicador de la capacidad de conducir corriente eléctrica en la muestra a través de los iones disueltos en ella, fue determinada con un conductímetro de la marca HORIBA D-24 (Figura 21). Para la medición de la conductividad, debe introducirse el electrodo del conductímetro en aproximadamente 25 mL de la muestra, cuidando que la temperatura sea constante (25°C) al realizar la lectura en la pantalla del instrumento. El equipo utilizado en el laboratorio NADP, corresponde al conductímetro marca Mettler, modelo S700 (Figura 22).



*Figura 21. Potenciómetro de conductividad SCA-ICAYCC HORIBA D-24*



*Figura 22. Potenciómetro de conductividad, NADP, Mettler S700 HORIBA*

#### **4.1.3.3 Determinación de la concentración de iones, mediante Cromatografía de intercambio Iónico (CI)**

En el caso de la determinación de las concentraciones de los iones presentes en las muestras de lluvia de la ZMCM, el análisis se realizó conforme al Método de la EPA 300.1, utilizando un cromatógrafo de líquidos marca Metrohm 850 Professional IC con detector de conductividad (Figura 23), este equipo cuenta con un sistema capaz de identificar aniones y cationes a la vez. Para el análisis se requiere de las muestras previamente acondicionadas mediante la filtración que ya se describió anteriormente, posterior a ello la muestra a analizar es inyectada en un loop de 20  $\mu\text{L}$  a un flujo de 0.7 mL/min, con un tiempo de análisis de 20 min, previo a ello el equipo debe ser calibrado

con disoluciones estándar certificado por NIST a diferentes concentraciones, en el caso de los aniones de 0.05 a 10 ppm y en el de los cationes de 0.025 a 4 ppm, esto se debe a que se ha encontrado que la concentración de aniones y cationes de la lluvia en la ZMCM, se encuentra dentro de esos intervalos.

Las condiciones cromatográficas para la fase móvil y la columna bajo las que se realizó el análisis se describen a continuación. (Tabla 9)



Figura 23. Cromatógrafo de líquidos SCA-ICAYCC, Metrohm 850 Professional IC

Tabla 9. Condiciones cromatográficas experimentales para la determinación de aniones y cationes

	Fase móvil	Columna
Aniones	6 mM NaCO <sub>3</sub>	Metrosep A Supp 7 marca Metrohm, 25 cm de longitud. Empaque de alcohol polivinílico con grupos de amonio cuaternario, tamaño de partícula 4 µm
Cationes	1 mM edta/1 mM HNO <sub>3</sub>	Metrosep C4 marca Metrohm, 10 cm de longitud. Empaque de silica gel con grupos carboxilo, tamaño de partícula de 4 µm

A diferencia del análisis que se realiza en la SCA-ICAyCC, donde se determinan tanto aniones como cationes de las muestras de lluvia por cromatografía de intercambio iónico, en el CAL correspondiente al NADP, que se encuentra en las instalaciones del WSLH, el análisis por cromatografía de intercambio iónico es aplicado sólo para la determinación de los aniones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), con el equipo 3 Dionex Integrion. (Figura 24)

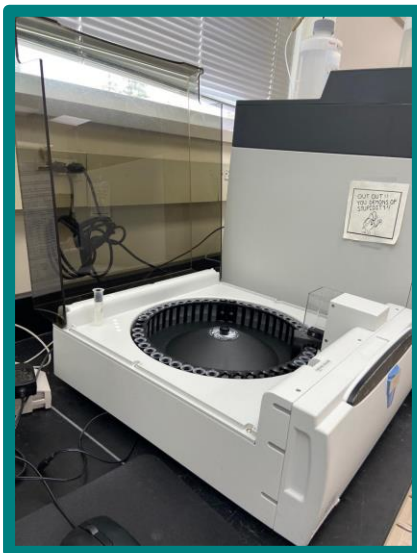


Figura 24. Equipo cromatografía de intercambio iónico NADP, 3 Dionex Integrion

#### 4.1.3.4 Determinación de la concentración de cationes, mediante Espectroscopía de Plasma (ICP-OES), NADP.

La espectrometría de emisión óptica de plasma acoplada por inducción (ICP-OES, por sus siglas en inglés), es utilizada para el análisis de metales en muestras de depósito atmosférico húmedo, colectadas por la NTN del NADP. Este método fue desarrollado siguiendo el MÉTODO EPA 200.7 para la detección de los cationes calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y sodio ( $\text{Na}^+$ ).

Una vez filtradas las muestras de precipitación de la NTN se introducen en el ICP-OES (Figura 25) a través del muestreador automático SPS4. las muestras se bombean desde el muestreador automático a través de una bomba peristáltica y luego se mezclan con una solución que contiene itrio a 2 mg/L y cesio a 500 mg/L. La muestra combinada

pasa a un nebulizador donde se mezcla con argón gaseoso para formar un aerosol. La mezcla de aerosol se mueve hacia la cámara de pulverización y, finalmente, a través de un plasma que se encuentra a aproximadamente 10,000 K a esta temperatura, los átomos en estado fundamental en el plasma se excitan fácilmente a niveles de energía más altos. Los fotones resultantes de la excitación de los átomos en estado fundamental se miden a través de un detector, reflejando en el software correspondiente las concentraciones de los cationes analizados en la muestra.



*Figura 25. Equipo ICP, Agilent 5100/5110 ICP-OES, NADP*

#### **4.1.3.5 Determinación de la concentración de amonio y ortofosfato, mediante un analizador de inyección de flujo (FIA).**

La determinación del ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), en las muestras de lluvia analizadas por el NADP, se realiza mediante el método colorimétrico automatizado de inyección de flujo, este está basado en el método EPA 350. El análisis de estos dos iones se realiza simultáneamente en un analizador de inyección de flujo (FIA, por sus siglas en inglés) (Figura 26).

Para el caso del ion amonio el método se basa en la reacción de Berthelot, donde este ion reacciona con fenol alcalino e hipoclorito de sodio, produciendo un compuesto de indofenol de color azul, la concentración de amonio en la muestra es proporcional a la absorbancia del producto de reacción (Ley de Beer-Lamber), el producto de reacción se mide a 630 nm. Por otro lado, el método para la medición del ortofosfato se realiza mediante la reacción de este con molibdato de amonio y tartrato de antimonio y potasio

para formar un complejo. Este complejo se reduce con ácido ascórbico para formar un complejo azul que absorbe luz a 880 nm. Finalmente, la absorbancia es proporcional a la concentración de ortofosfato en la muestra de lluvia analizada.



*Figura 26. Equipo para determinación de amonio y ortofosfato. FIA (Flow Injection Analyzer) Lachat Instruments (Hach) QuickChem 8500 Series . NADP*

#### 4.1.4 Validación de datos

Los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico de las muestras deben someterse a un proceso de validación, para lo cual debe realizarse un balance iónico, este debe ser de  $1 \pm 0.05$ , al obtener ese valor se asegura la cuantificación mayoritaria de los iones presentes en la muestra. El balance iónico se realiza a partir de la suma de la concentración de todos los aniones presentes en la muestra, dividido entre el resultado de la suma de las concentraciones de los cationes (Ec 24).

$$\text{Balance iónico} = \frac{\Sigma \text{Concentración de aniones} \left[ \frac{\mu\text{eq}}{\text{L}} \right]}{\Sigma \text{Concentración de cationes} \left[ \frac{\mu\text{eq}}{\text{L}} \right]}$$

*Ec. 24*

Otro punto importante para la validación de los resultados obtenidos es la comparación de conductividades medidas en las muestras contra las conductividades obtenidas de forma teórica (Ec.25) para ello se debe contar con la concentración del ion en ppm, la conductividad equivalente (obtenida de tablas, anexo 3) y el peso molecular del ion. El criterio que se debe cumplir para que los datos sean validos es que la conductividad teórica debe ser menor a la medida con el conductímetro.

$$\text{Conductividad teórica} = \sum \frac{(\text{Conductividad equivalente})(\text{Concentración ion ppm})}{\text{Peso molecular del ion}}$$

Ec. 25

#### 4.1.5 Ponderado de datos

Se calcularon los promedios ponderados anuales de cada parámetro (pH, conductividad y concentración de iones presentes), para este cálculo se consideró el volumen de precipitación de cada muestra y se relacionó con el volumen total anual de cada sitio de estudio (Ec. 26).

$$\text{Promedio ponderado} = \frac{\sum(X_i * V_i)}{V_t}$$

Ec. 26

Dónde  $V_i$  es el volumen de lluvia colectado en la muestra,  $V_t$  el volumen total de lluvia en el año para cada sitio de muestreo y  $X_i$  el parámetro que se requiere ponderar.

## 4.2 Selección de sitios urbanos

Para la selección y análisis de sitios de la REDDA en la ZMCM, se realizó una búsqueda de información relacionada con la ubicación y características de cada sitio de muestreo. Para el análisis en conjunto de la lluvia de la ZMCM, se tomaron en cuenta las 16 estaciones de la REDDA, sin importar su clasificación, urbana, rural o semi-rural.

En cuanto a la elección de sitios de muestreo de la ZMCM para su comparación con otros sitios clasificados como urbanos en Norteamérica, se eligieron, Museo de la Ciudad de México (MCM), Nezahualcóyotl (NEZ), Cerro del Tepeyac (TEC), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Xalostoc (XAL), Tlalnepantla (TLA), Diconsa (DIC), IBM de México (IBM) y Lomas (LOM), debido a sus características que las clasifican como urbanas (Tabla 10).



**Tabla 10. Descripción de la localización de sitios de muestreo de la REDDA** (Sosa et al., 2023)

Nombre del sitio	ID	Descripción de su localización	Clase del sitio
Museo de la Ciudad de México	MCM	En el centro urbano de la ZMCM. En la zona predominan las actividades comerciales, empresariales y de servicios.	Urbano
Comisión de Recursos Naturales	COR	En una región semi-rural en la periferia sureste del casco urbano.	Semirural
Nezahualcóyotl	NEZ	Zona urbana con alta densidad vehicular y poblacional además de edificaciones bajas.	Urbano
Cerro del Tepeyac	TEC	En el núcleo urbano rodeado de áreas comerciales y residenciales.	Urbano
Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	En el núcleo urbano, alta densidad vehicular y poblacional.	Urbano
Montecillo	MON	En el límite este del casco urbano. Región Semi-rural.	Semirural
Xalostoc	XAL	Región urbana de alta densidad vehicular y poblacional así como actividad industrial.	Urbano
Tlalnepantla	TLA	Región urbana de alta densidad vehicular y poblacional así como actividad industrial.	Urbano
DICONSA	DIC	En el núcleo urbano, de alta densidad edificatoria, rodeado de áreas de servicios, comerciales y residenciales.	Urbano
IBM de México	IBM	En el núcleo urbano, alta densidad vehicular y poblacional.	Urbano
Lomas	LOM	En el núcleo urbano, densidad media, el sitio está ubicado en una zona comercial y de servicios.	Urbano
Ecoguardas Ajusco	EAJ	En el límite urbano en el suroeste de la ciudad dentro de las instalaciones de un centro ecológico	Suburbano
Milpa Alta	MPA	En la periferia al sur del casco urbano. Región rural, rodeada de zonas de cultivo.	Rural
Ajusco	AJU	En el límite sur de la ZMCM, con áreas semi-rurales, de cultivo y pastoreo.	Semirural
San Nicolás Totolapan	SNT	En el límite sur de la ZMCM, área semi-rural con construcciones escasas.	Semirural
Exconvento Desierto de los Leones	EDL	Ubicado en un área forestal en las afueras de la ciudad, el sitio está rodeado de altos árboles de hoja perenne.	Semirural

Por otra parte, para seleccionar los sitios urbanos de muestreo ubicados en las regiones de Los Ángeles, Nueva York y el Área Metropolitana de Denver, se aplicó un filtro para identificar todos aquellos que operan bajo la clasificación de urbanos, según los criterios

del NADP, con excepción de los sitios CA42 y NY99, clasificados como suburbanos pero elegidos para este estudio por la disponibilidad de datos del 2003 al 2019.

*Tabla 11. Sitios urbanos de muestreo NADP (NADP, 2022c)*

Estado	Nombre del sitio	ID	Condado	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)	Clasificación
California	Tanbark Flat	CA42	Los Angeles	34.2071	-117.7618	853	Suburbano
Nueva York	Bronx	NY06	Bronx	40.868	-73.8782	68	Urbano
	Rochester	NY43	Monroe	43.1463	-77.5482	136	Urbano
	Amherst	NY92	Erie	42.9931	-78.7717	183	Urbano
	West Point	NY99	Orange	41.3511	-74.0484	211	Suburbano

Con respecto al Área Metropolitana de Denver, Colorado, el NADP, reporta que todos los sitios de muestreo de la precipitación actuales y activos en esa región están clasificados como sitios rurales o de investigación (NADP, 2022c), por esta razón para la comparación de los resultados de esta área con las otras zonas urbanas elegidas, se utilizaron los valores de las medias para los distintos parámetros obtenidos en el trabajo titulado “Inorganic nitrogen wet deposition gradients in the Denver-Boulder metropolitan area and Colorado Front Range – Preliminary implications for Rocky Mountain National Park and interpolated deposition maps”, debido a que para la realización de este estudio el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) estableció seis sitios de monitoreo de depósito húmedo en zonas urbanas en 2016-2017 como parte de NADP/NTN con el apoyo de varios colaboradores, estos sitios fueron identificados como CO87, CO06, CO11, CO86, CO85 y CO84, los cuales se eligieron para este proyecto (Wetherbee et al., 2019).

Con relación a los sitios urbanos de estudio en Canadá, el NADP no cuenta con sitios en el área de Toronto, Canadá, y según los datos de la Canadian Air and Precipitation Monitoring Network, los sitios de muestreo activos localizados en Ontario, se encuentran en sitios rurales (Tabla 12), por esta razón se justificó la exclusión de la región de Toronto, en el análisis de comparación entre sitios urbanos (ECCC, 2017).

Tabla 12. Sitios de muestreo de depósito atmosférico húmedo en Ontario, Canadá (ECCC, 2017)

Nombre del sitio	ID	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)	Clasificación
Algoma	ALG	47.03367	-84.37897	411	Rural
Bonner Lake	BON	49.38639	-82.12139	245	Rural
Chalk River	CHA	46.06278	-77.40472	184	Rural
Egbert	EGB	44.23106	-79.78308	253	Rural
Experimental Lakes Area	ELA	49.66389	-93.72111	369	Rural
Longwoods	LON	42.88472	-81.48056	239	Rural
Marten River	MTR	46.67111	-79.91917	300	Rural
Pickle Lake	PKL	51.44814	-90.21786	391	Rural
Sprucedale	SPR	45.42361	-79.48667	348	Rural
Warsaw Caves	WAR	44.46389	-78.13056	230	Rural
Westport	WPT	44.63861	-76.37	133	Rural

#### 4.2.1 Comparación de sitios urbanos

Para la comparación de las características y resultados de la lluvia en los sitios urbanos de estudio seleccionados, se utilizó el valor promedio ponderado anual (Ec.26) de cada parámetro (pH, conductividad y concentración de iones presentes), así como de las relaciones  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ . Posterior a ello con ayuda del software Origin Pro, se realizó un análisis gráfico, de los promedios ponderados obtenidos, utilizando un diagrama de cajas y bigotes con el fin de observar la variación de cada uno de los parámetros para el periodo 2003-2019, así como la diferencia entre las medias de todo el periodo para cada estación de muestreo tanto en la ZMCM como en los sitios correspondientes a Los Ángeles, Nueva York y Denver.

Además, utilizando el mismo software antes mencionado, se realizó un estudio con análisis gráfico de dispersión para los sitios urbanos seleccionados, con el objetivo de observar si existía alguna tendencia en el comportamiento de las concentraciones a través de los años del periodo de estudio, de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y la relaciones  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  en las distintas zonas urbanas de Norteamérica seleccionadas.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS

El objetivo principal de este proyecto fue evaluar los parámetros fisicoquímicos del depósito atmosférico húmedo de la ZMCM, es decir, la presencia de los iones sodio  $[Na^+]$ , amonio  $[NH_4^+]$ , potasio  $[K^+]$ , magnesio  $[Mg^{2+}]$ , calcio  $[Ca^{2+}]$ , sulfato  $[SO_4^{2-}]$ , cloruro  $[Cl^-]$ , y nitrato  $[NO_3^-]$ , así como el pH y conductividad y las relaciones  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  y  $NH_4^+/NO_3^-$ , para posteriormente comparar estos resultados con los de las zonas urbanas de Los Ángeles, Nueva York y el Área Metropolitana de Denver, Colorado, excluyendo a la ciudad de Toronto, Canadá en el análisis debido a la falta de sitios de muestreo en zonas urbanas.

A continuación, se muestran y analizan los resultados obtenidos de este estudio, con el fin de identificar las características del depósito atmosférico húmedo en las distintas zonas urbanas elegidas, para proponer estrategias de prevención, minimización y control de contaminantes precursores de la lluvia ácida en la ZMCM.

## 5.1 Zona Metropolitana de la Ciudad de México

### 5.1.1 Variación temporal y espacial del depósito atmosférico húmedo

Los resultados de la evaluación de la lluvia ácida correspondientes a la ZMCM que se presentan a continuación son correspondientes al periodo 2003-2019, por la limitación derivada de la pandemia de COVID-19, pues las condiciones sanitarias en la ZMCM a partir del año 2020 llevaron a poner en pausa la operación y muestreo de las distintas estaciones de la REDDA.

En la figura 27 se observa que los acumulados más altos de la precipitación durante el periodo 2003-2019 se presentan en la región suroeste de la ZMCM, este fenómeno se explica por el efecto orográfico que es causado por la presencia de las montañas pertenecientes a la Sierras de Chichinautzin y las Cruces (Ávila, 2018), dónde a medida que el aire cálido y húmedo asciende sobre las montañas, el vapor de agua presente

se comienza a enfriar y eventualmente se condensa formando grandes nubes, propiciando así la presencia de lluvia.

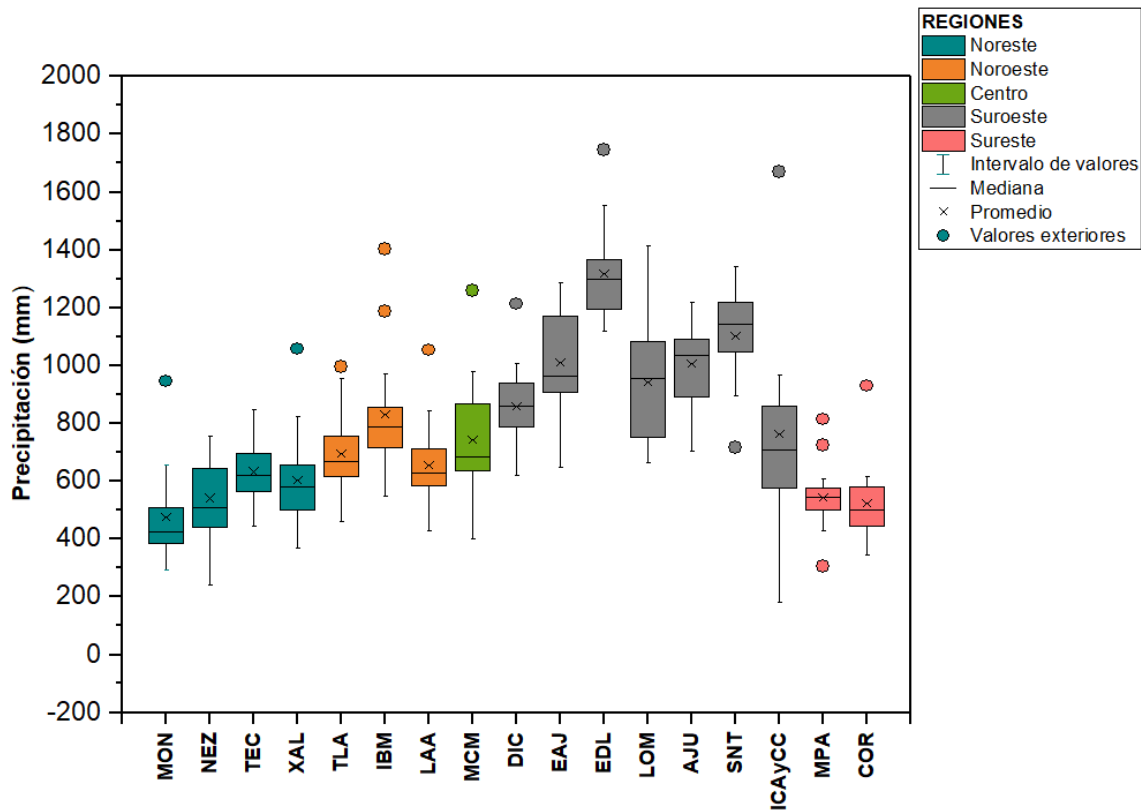


Figura 27. Variación de la precipitación por estaciones de muestreo ZMCM 2003-2019

El valor máximo de precipitación durante el periodo de estudio fue de 1,746.70 mm, que se presentó en el 2014 en la estación EDL ubicada en la región suroeste, mismo año dónde se presentó el volumen total más alto de precipitación en la ZMCM, así mismo la estación EDL presenta los mayores acumulados de precipitación durante el intervalo de los años 2003-2019. Sin embargo, el valor mínimo de precipitación se presentó en la estación ICAYCC que no corresponde a la red de monitoreo de la REDDA, el valor mínimo obtenido en este sitio fue de 281.81 mm.

### 5.1.2 Variación temporal y espacial del pH

Las muestras de lluvia recolectadas por la REDDA en su muestreo semanal fueron analizadas en el laboratorio de la SCA, del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, gracias al acuerdo de colaboración UNAM-SEDEMA. Los datos validados obtenidos de la consulta de bases electrónicas disponibles de la REDDA fueron analizados para la obtención de promedios ponderados de cada uno de los parámetros de estudio considerados, para lo cual se tomó en cuenta el volumen total de lluvia anual en cada estación.

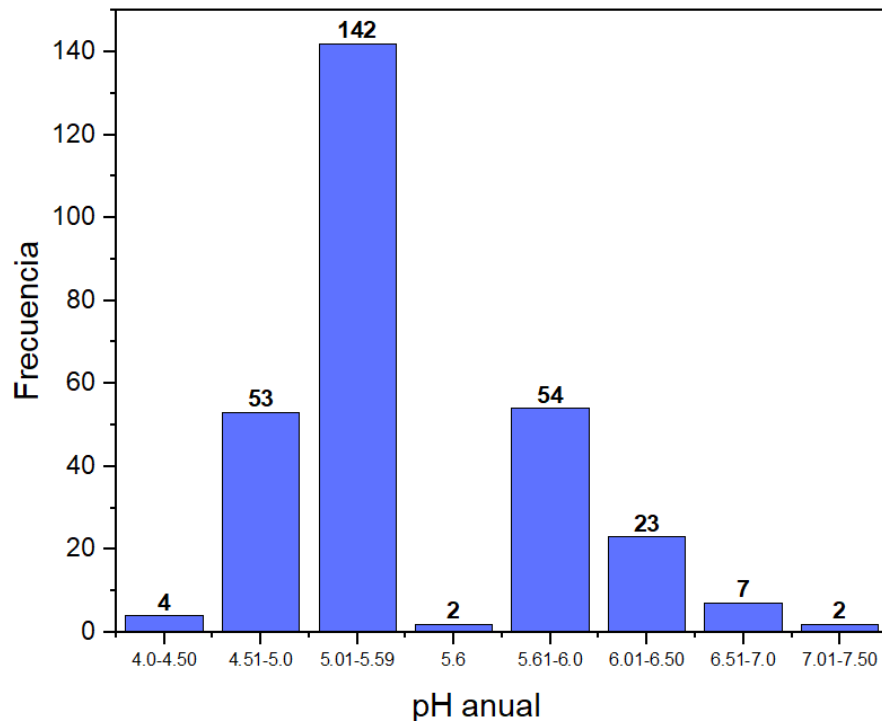
En la tabla 13 se muestran los promedios ponderados anuales de pH para el periodo del 2003-2019 de las 16 estaciones de la REDDA incluyendo la estación ICAYCC en Ciudad Universitaria, los datos de esta última estación se obtuvieron a partir de datos diarios pues el muestreo en ese sitio se realiza diariamente, por lo que se calcularon los promedios ponderados semanales y posteriormente los anuales.

*Tabla 13. Promedios ponderados anuales de pH 2003-2019 por estación*

Región	Clave	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Noreste	MON	7.48	7.25	6.97	6.09	6.19	6.08	5.87	6.19	5.59	5.30	5.12	5.03	4.69	5.82	5.93	5.45	5.33
	NEZ	6.58	6.14	6.27	5.39	5.28	5.21	5.42	6.17	6.07	5.43	5.47	5.80	5.21	5.69	5.98	5.58	6.03
	TEC	6.76	5.69	5.63	4.88	5.13	5.53	5.35	6.30	5.92	5.27	5.04	5.60	5.17	5.55	5.41	5.63	5.85
	XAL	6.77	6.22	5.98	5.56	5.45	5.90	5.81	6.18	5.89	5.40	5.40	6.07	4.89	5.79	5.89	6.37	6.23
Noroeste	TLA	6.72	5.47	5.69	5.13	5.14	5.24	5.42	5.52	5.61	4.84	5.15	5.35	4.86	5.39	5.78	5.82	5.96
	IBM	5.85	5.61	5.55	5.36	5.22	5.28	5.15	5.68	5.66	5.09	5.28	5.14	4.78	5.54	5.61	5.72	5.77
	LAA	6.10	5.65	5.75	5.07	5.33	5.20	5.26	5.85	5.67	5.27	5.13	5.16	5.06	5.73	5.63	5.85	5.33
Centro	MCM	5.93	5.71	6.28	5.33	5.18	5.49	4.37	5.79	6.13	5.53	5.15	5.41	5.06	5.71	6.22	6.00	5.87
Suroeste	DIC	6.11	5.46	5.72	5.29	5.17	5.12	5.10	5.55	5.32	5.26	4.91	5.24	4.92	4.99	5.51	6.11	5.66
	EAJ	5.57	5.07	5.67	5.22	5.01	4.98	4.97	5.40	5.00	4.90	4.76	4.95	4.82	5.01	5.38	5.25	5.61
	EDL	5.72	5.20	5.22	4.74	4.91	5.14	5.40	5.18	5.04	4.83	4.80	4.95	4.76	5.16	5.34	5.23	5.20
	LOM	5.60	5.20	5.46	4.16	5.18	5.63	5.31	5.51	5.58	4.89	5.01	4.97	4.73	5.25	5.46	5.91	5.43
	AJU	5.66	5.12	5.18	4.27	4.67	4.88	5.09	5.11	4.90	4.61	4.43	4.56	4.85	5.10	5.14	5.09	4.95
	SNT	5.41	5.02	5.52	4.95	5.15	4.93	5.06	5.19	4.77	4.58	4.77	4.98	5.31	5.22	5.57	5.49	5.45
	ICAYCC	5.37	5.26	5.22	5.42	4.93	5.17	4.86	5.56	No disponible	No disponible	4.90	4.93	4.74	5.20	5.18	5.40	5.32
Sureste	MPA	6.63	5.70	5.23	5.10	5.11	5.05	5.37	5.32	4.89	4.90	4.62	4.73	4.66	4.88	4.83	5.01	5.10
	COR	6.57	6.30	5.59	5.36	5.16	5.03	5.57	5.71	5.07	4.86	4.94	5.06	4.68	5.23	6.04	5.86	5.75

El valor más alto de pH obtenido (señalado con color amarillo en la tabla) fue de 7.48 correspondiente a la estación MON durante el año 2003, mientras que, el valor mínimo fue de 4.16 (identificado con color rojo en la tabla), es decir, la mayor acidez, se obtuvo en el 2008 en la estación LOM ubicada en el suroeste de la región de la ZMCM.

Se realizó un histograma de frecuencias (Figura 28) para poder observar que de los 287 promedios de pH anuales obtenidos en total durante el 2003-2019, la mayoría son considerados como ácidos con 199 promedios por debajo de un pH de 5.6, lo que es igual al 69.33% del total de datos obtenidos, sólo 2 promedios ponderados se encontraron en el pH de 5.6, mientras que los 89 datos restantes o bien el 31.01%, no fueron considerados como lluvia ácida, debido a que se encontraron por arriba de un pH de 5.6.



*Figura 28. Frecuencia pH ponderado anual ZMCM 2003-2019*



Con respecto a la variación del pH en la ZMCM (Figura 29), se observa que en las 16 estaciones de la REDDA y en la correspondiente al ICAyCC, hubo presencia de eventos de precipitación considerados como lluvia ácida ( $\text{pH} < 5.6$ ) del 2003 al 2019. La región de la ZMCM con mayor acidez de la lluvia fue la región sur, particularmente el suroeste comprendido por las estaciones DIC, EAJ, EDL, LOM, AJU, SNT e ICAyCC, mientras que la región con menor acidez en la lluvia fue la zona noreste integrada por las estaciones MON, NEZ, TEC y XAL.

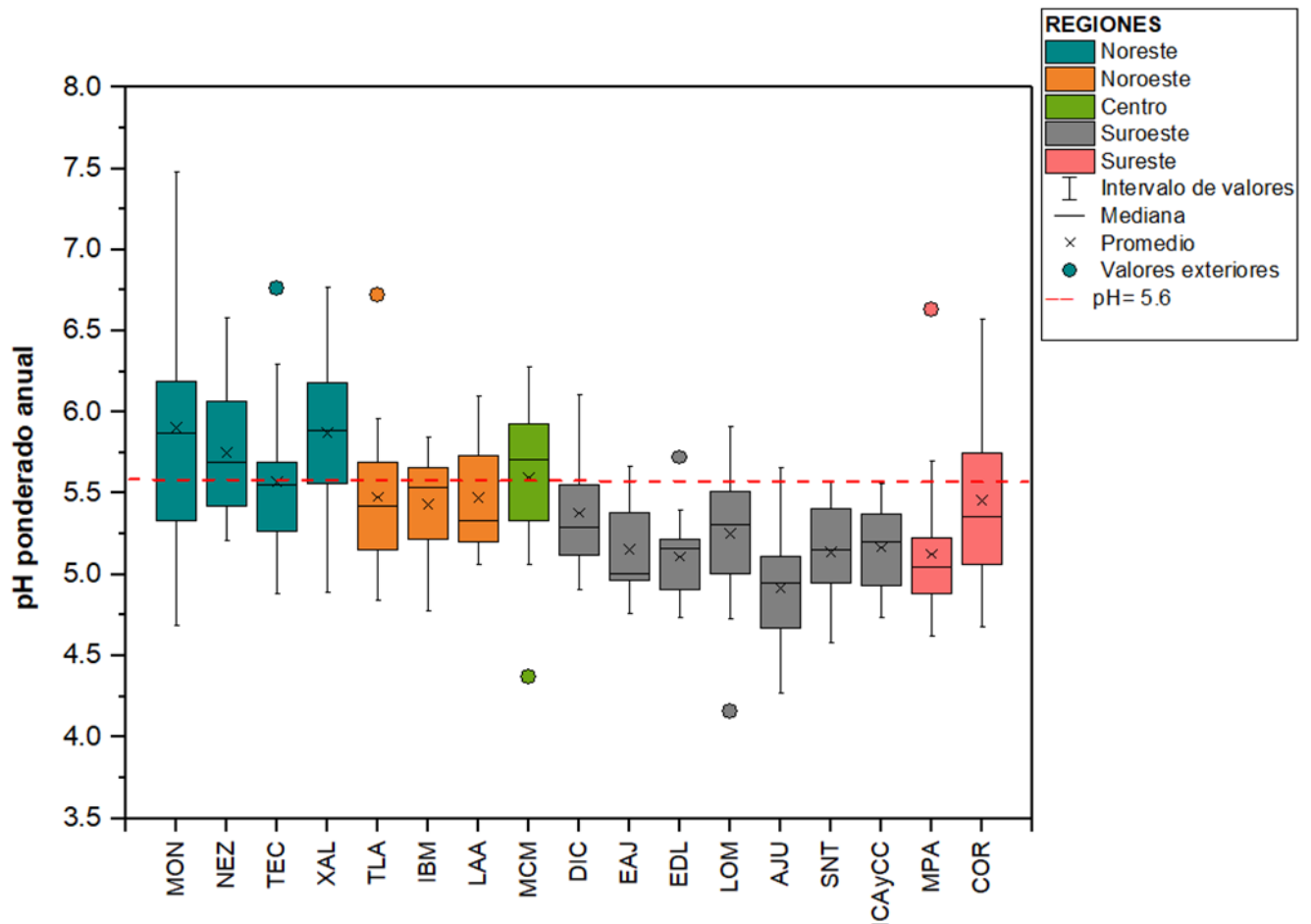


Figura 29. Variación del pH ponderado anual ZMCM 2003-2019

Para mayor claridad a continuación, se ilustra con ayuda de mapas (Figura 30,31, 32 y 33) la variación espacial del pH de la lluvia en las 16 estaciones de la REDDA y la estación del ICAyCC, excepto en los años 2011 y 2012 para los cuáles no hay registros

del muestreo de depósito atmosférico húmedo en esta estación, debido a cambios en la logística del sitio durante ese periodo.

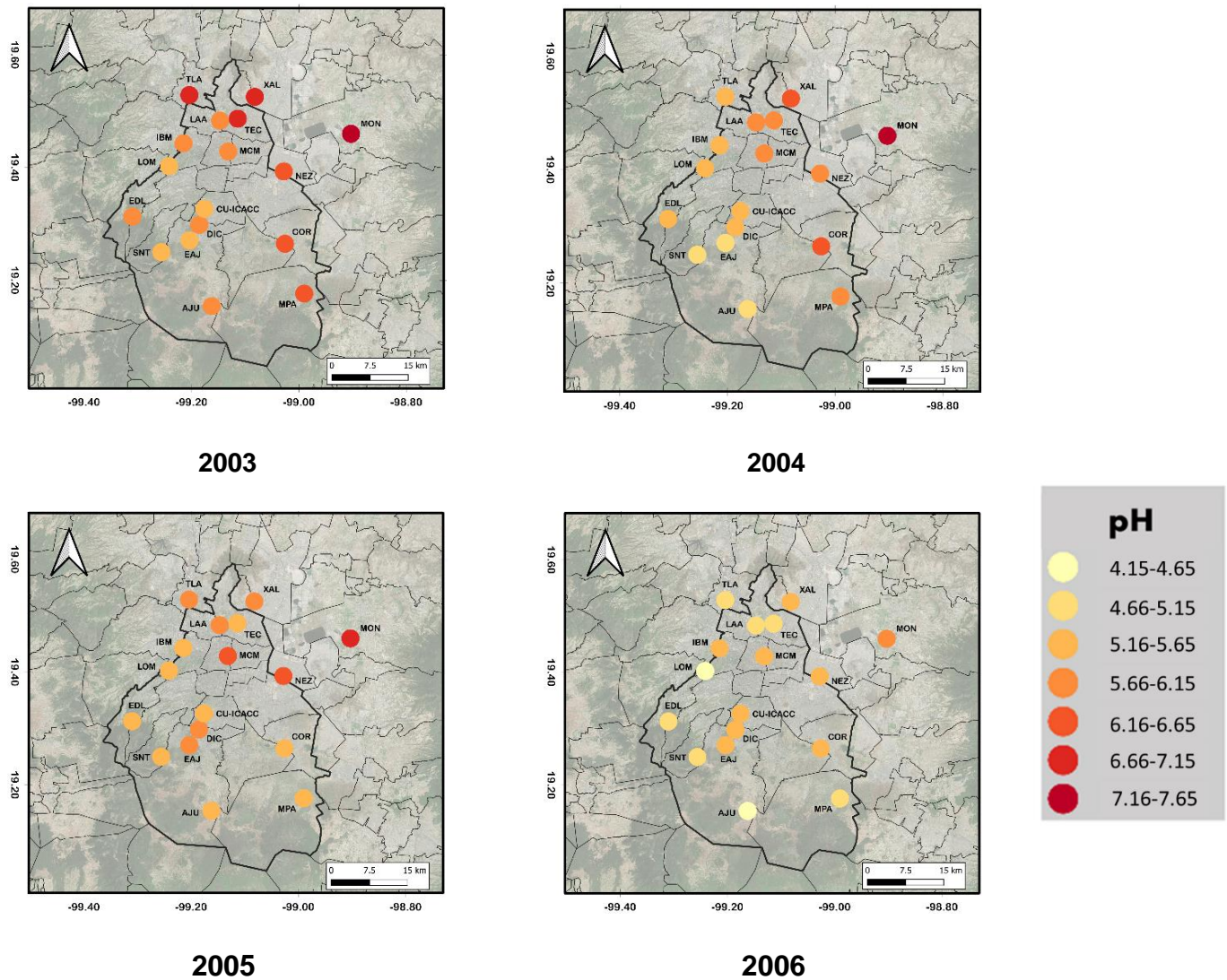
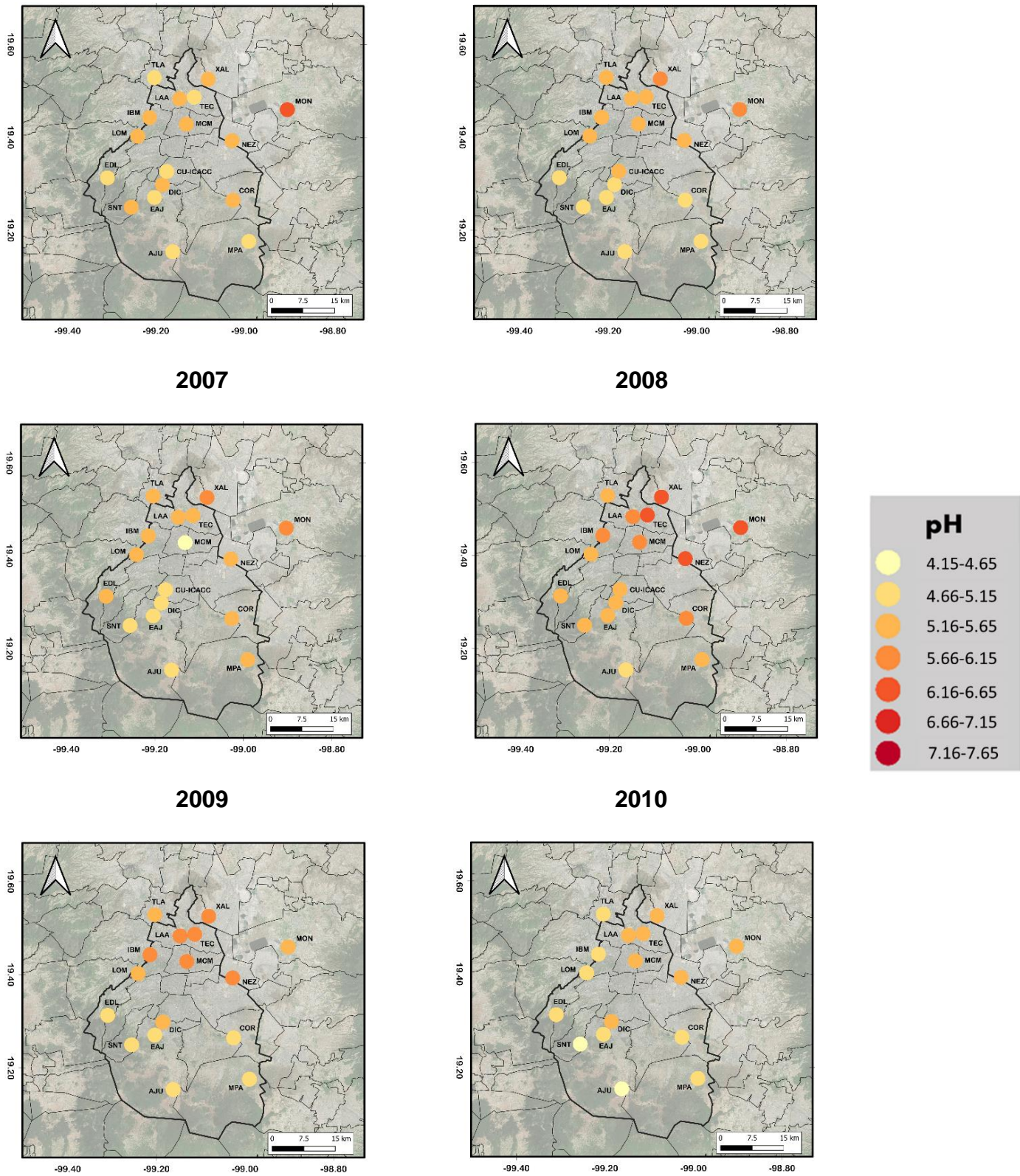


Figura 30. Variación espacial del pH en la ZMCM 2003-2006

# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA



2011 *Figura 31. Variación espacial del pH en la ZMCM 2007-2012* 2012

# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA

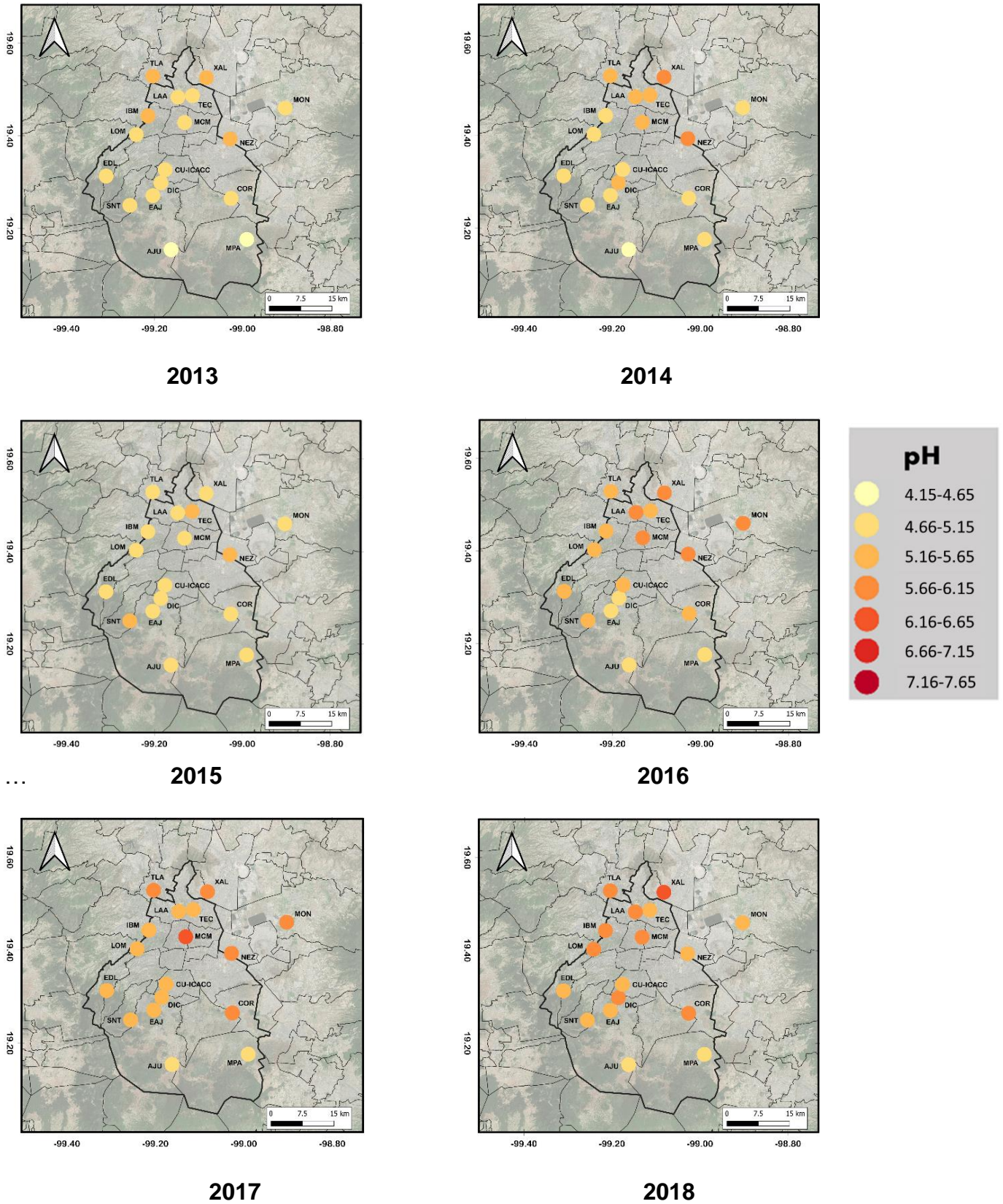
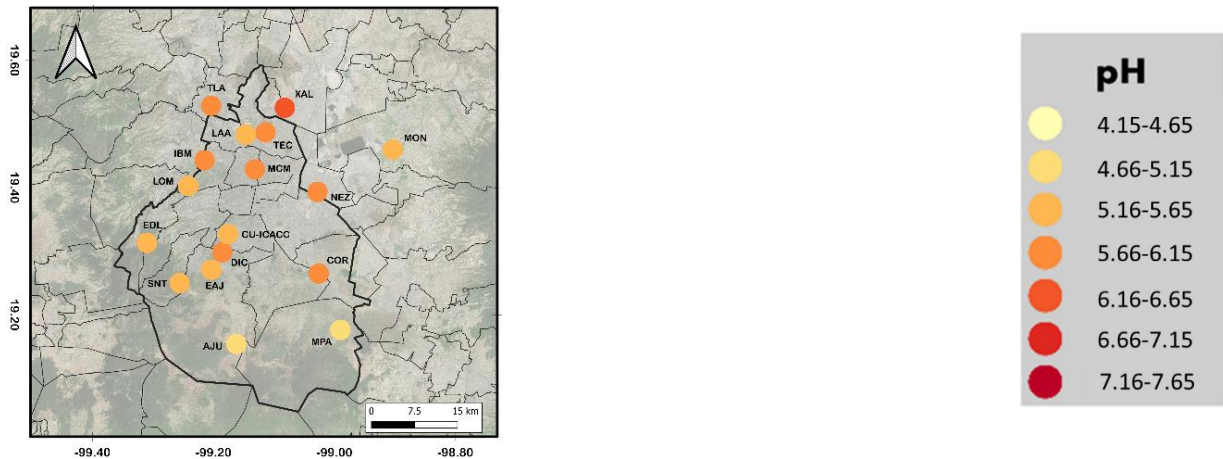


Figura 32. Variación espacial del pH en la ZMCM 2013-2018



2019

*Figura 33. Variación espacial del pH en la ZMCM 2019*

De acuerdo con los mapas presentados y los valores de pH ponderado anual obtenidos, hay mayor acidez en las estaciones ubicadas al sur con respecto a las del norte de la ZMCM, esto es resultado principalmente de las condiciones meteorológicas del sitio de estudio en combinación con factores como la dirección de los vientos característica de la zona la cuál es de norte a sur, lo que provoca que los contaminantes precursores de lluvia ácida provenientes de fuentes importantes internas y externas a la ZMCM ubicadas al norte, sean desplazados hacia el sur de la región provocando precipitaciones más ácidas en esta zona.

Lo anterior se sustenta bajo la evidencia publicada por Ávila en 2018, dónde se explica la relación directa entre la dirección del viento y el pH de la lluvia en la ZMCM, pues como se observa en la figura 34 a) la dirección del viento en eventos de precipitaciones menores a 5.6 es de norte a sur, mientras en eventos con pH mayor a 5.6 el viento predomina desde el sur.

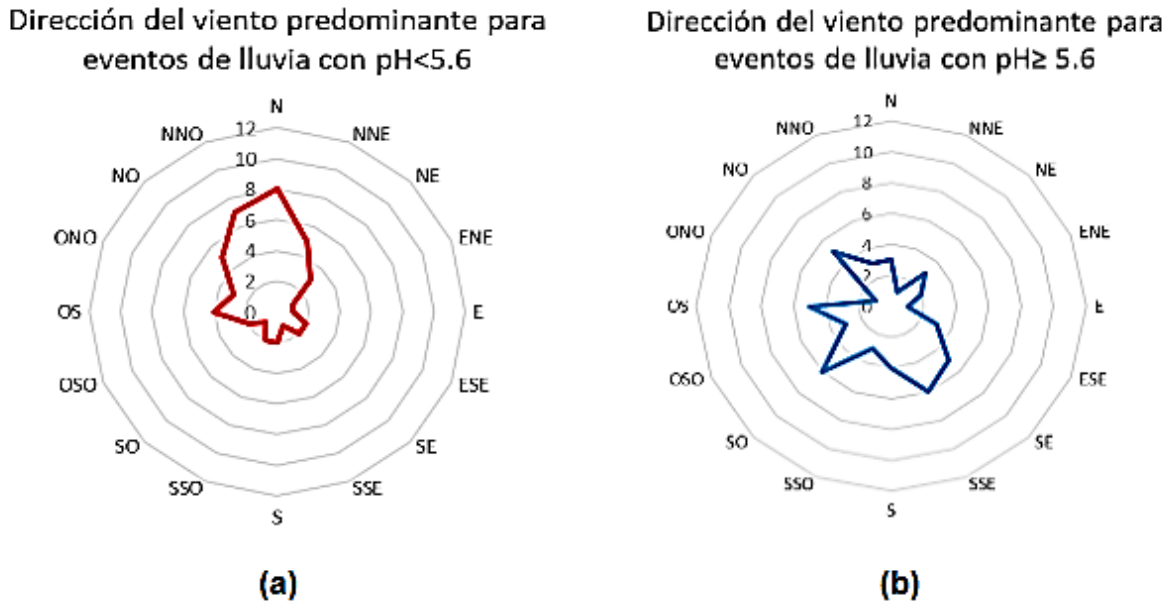


Figura 34. Relación de la dirección del viento con el pH de la lluvia en la ZMCM (Ávila, 2018)

Otro factor importante es la existencia de evidencia que muestra que, en la región norte hay alta contaminación, pero también existe una alta neutralización, lo que resulta en pH más altos, mientras que en el sur que igual presenta altos índices de contaminación, hay menor neutralización, obteniéndose valores de pH más bajos, es decir más ácidos (Ávila, 2018; Sosa et al., 2023).

### 5.1.3 Variación temporal y espacial de la conductividad

Se evaluó la conductividad de las muestras como una medida indirecta de la cantidad de iones en disolución; entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor resulta su conductividad.

De la figura 35 se observa que los valores más altos de conductividades durante los años del periodo de estudio están en la zona norte de la ZMCM, especialmente en las estaciones IBM y NEZ, mientras que los valores más bajos se encuentran ubicados en las estaciones del sur de la región, entre las que destacan la estación EDL y SNT.

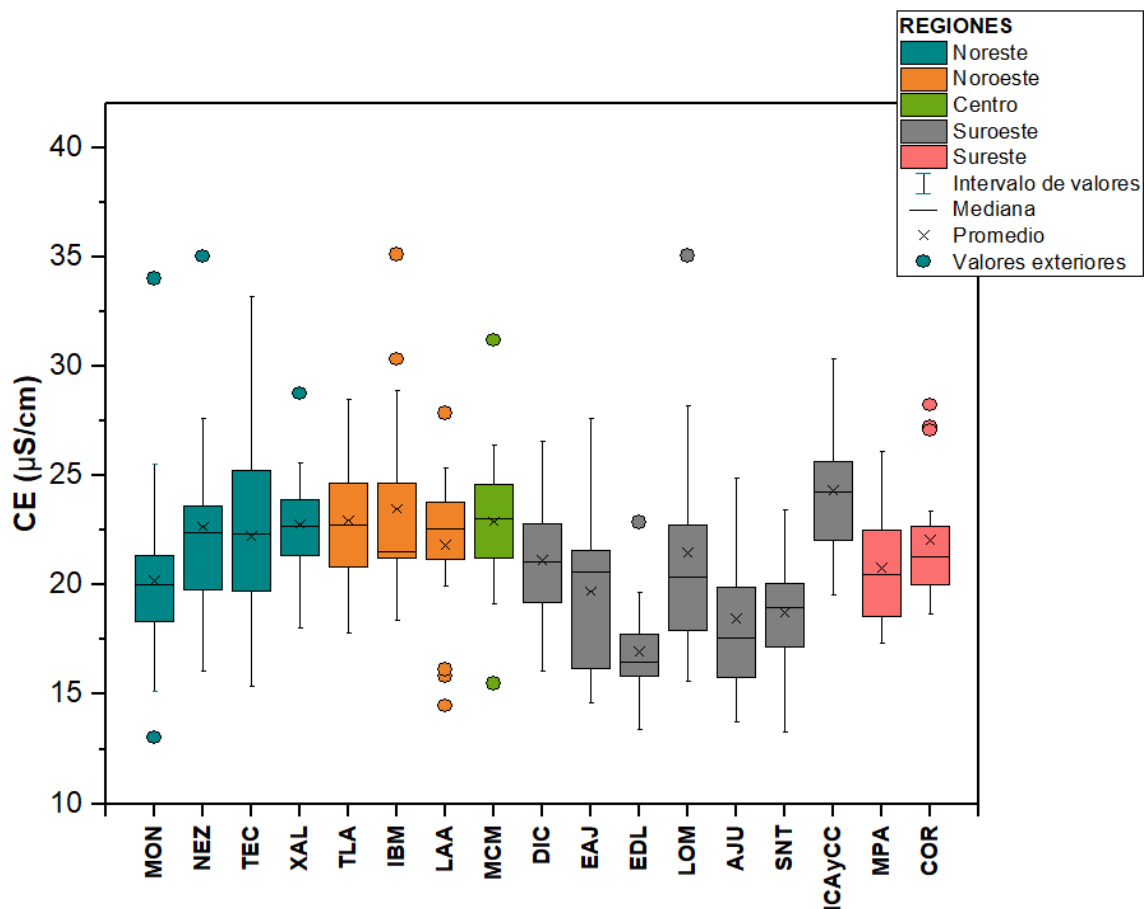
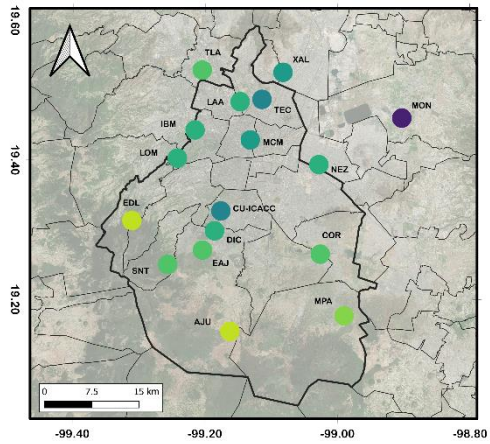


Figura 35. Variación de la conductividad ZMCM 2003-2019

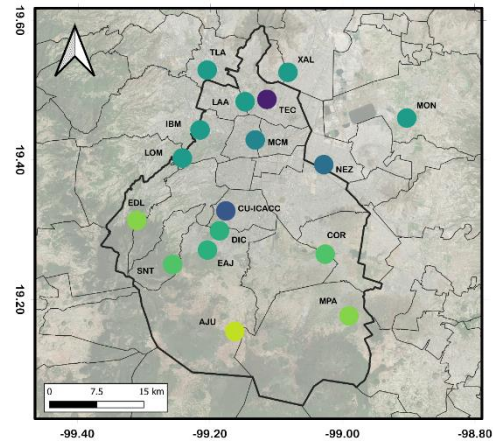
Durante el periodo 2003-2019 el valor máximo de la conductividad registrado en la ZMCM fue de 35.11  $\mu\text{S}/\text{cm}$  correspondiente a la estación IBM en el año 2015, mientras que el mínimo fue de 13.02  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en la estación MON, valor obtenido para el 2010.

Lo anterior también se ilustra en los mapas de distribución espacial de la conductividad de la ZMCM por año, presentados a continuación (Figura 36, 37 y 38). Otro punto importante de mencionar es que el volumen de lluvia correspondiente a cada año es fundamental, pues los años con la conductividad más alta se deben a pequeños volúmenes de lluvia, mientras que los años con volúmenes altos de precipitación tienen valores más bajos de la conductividad debido a que hay mayor dilución de los iones en las muestras.

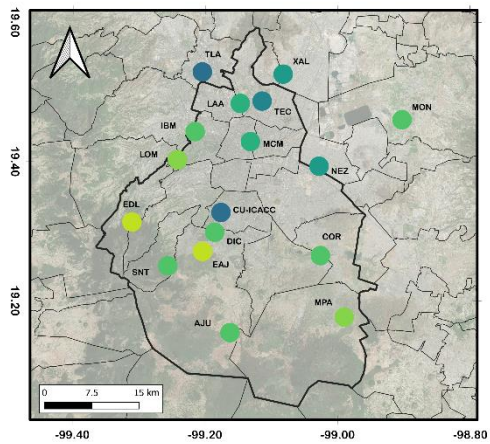
# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA



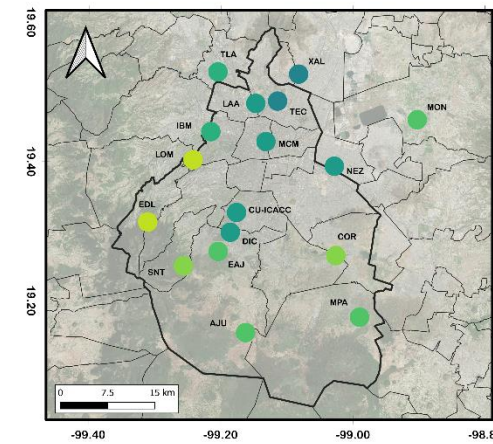
**2003**



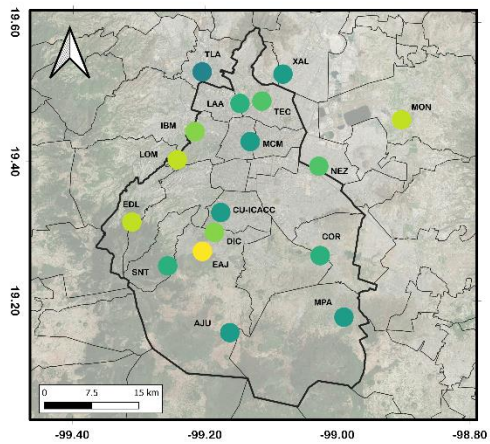
**2004**



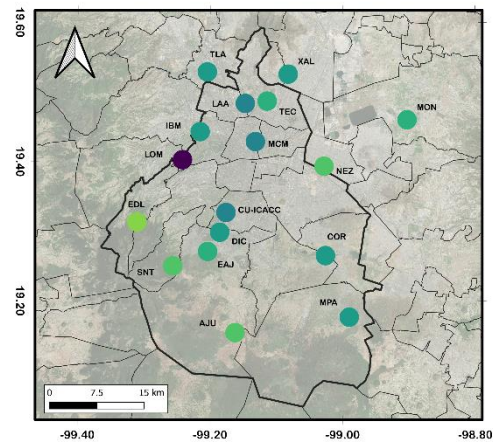
**2005**



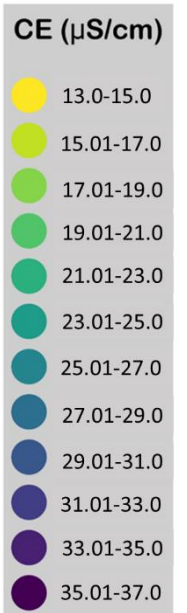
**2006**



**2007**



**2008**



*Figura 36..Variación espacial de la conductividad en la ZMCM 2003-2008*



# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA

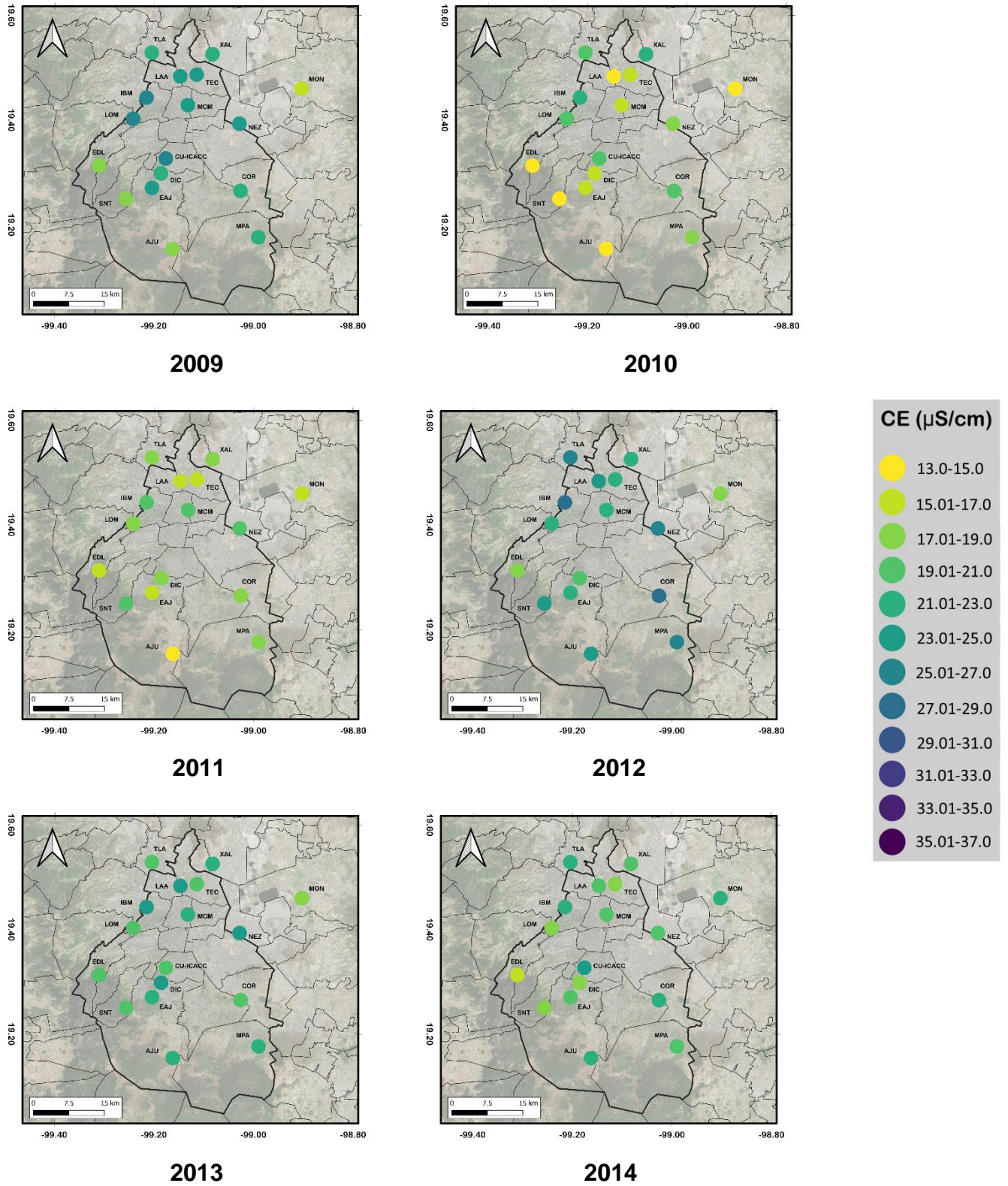


Figura 37. Variación espacial de la conductividad en la ZMCM 2009-2014

# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA

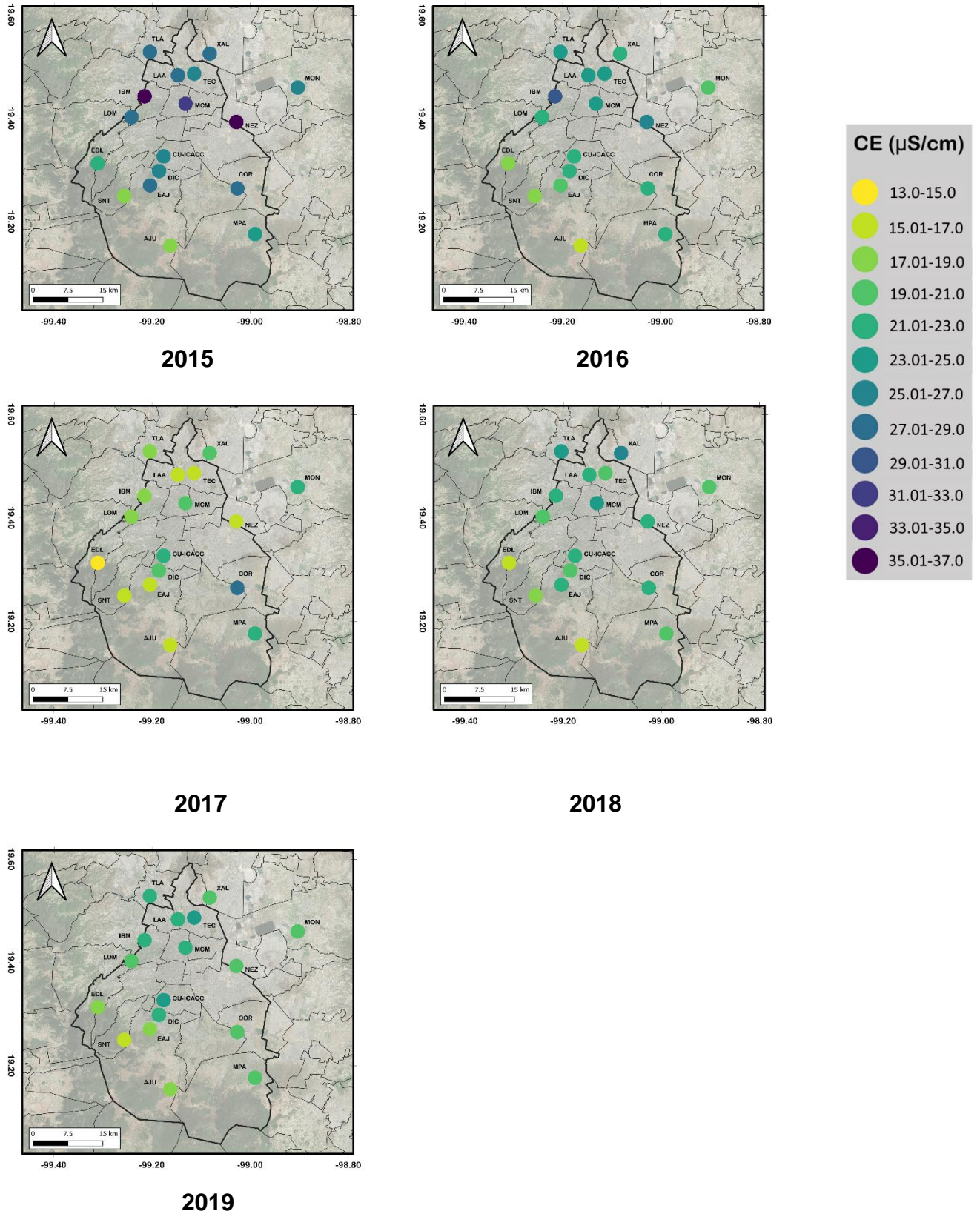


Figura 38. Variación espacial de la conductividad en la ZMCM 2015-2019

### 5.1.4 Composición iónica del depósito atmosférico húmedo en la ZMCM

Se realizó un análisis de la composición iónica del depósito atmosférico húmedo de las estaciones de muestreo de la REDDA e ICAYCC, así como el cálculo del porcentaje de contribución por ion en cada estación para el periodo del 2003-2019 (Figura 39).

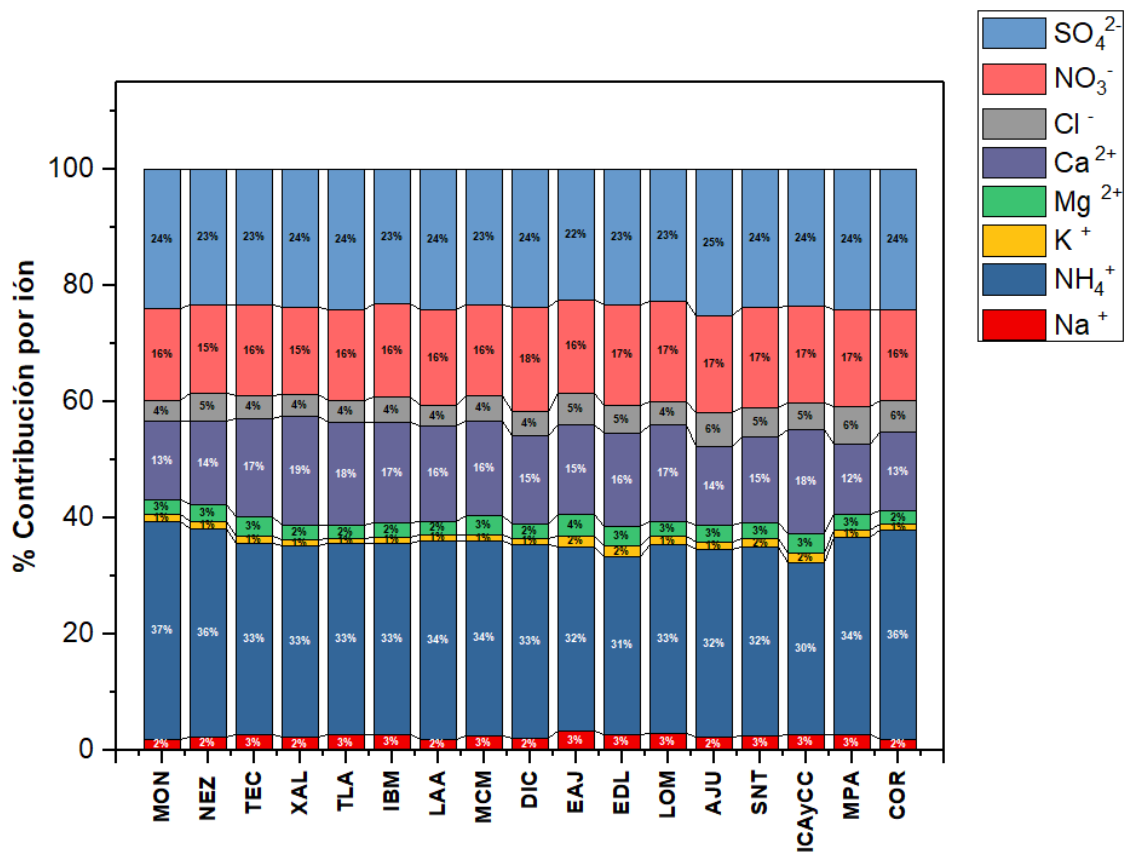


Figura 39. Composición iónica del depósito atmosférico húmedo en la ZMCM 2003-2019

Los iones analizados durante el periodo de estudio fueron, sodio (Na<sup>+</sup>), amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), potasio (K<sup>+</sup>), magnesio (Mg<sup>2+</sup>), calcio (Ca<sup>2+</sup>), sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), cloruro (Cl<sup>-</sup>), y nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). De este análisis se obtuvo que el catión con mayor presencia en el depósito atmosférico de la ZMCM fue el ion NH<sub>4</sub><sup>+</sup> con un porcentaje de contribución máximo de 37% en la estación MON, los promedios ponderados de las concentraciones de este catión van de los 64.37 a 104.14 µeq/L. En segundo lugar, se encuentra el catión Ca<sup>2+</sup>,

con un porcentaje máximo del 19% en la estación XAL, y sus promedios ponderados de las concentraciones se encuentran en el rango de 27.49 a 54.55  $\mu\text{Eq/L}$ , en menor proporción se encuentran los cationes  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ . Es importante considerar que, de acuerdo con los factores de neutralización, las especies que más aportes tienen a la neutralización del pH del depósito atmosférico húmedo son  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , mencionados en orden decreciente (Sosa et al., 2023).

En el caso de los aniones, el que tuvo mayor presencia durante el periodo de estudio fue el sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$  presentando como porcentaje máximo el 25% en la estación AJU, en este caso los valores ponderados para las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron desde 49.00 a 73.17  $\mu\text{Eq/L}$ , mientras que el  $\text{NO}_3^-$  fue el segundo anión más abundante teniendo un valor máximo del 17% en las estaciones EDL, LOM, AJU, SNT, ICAyCC y MPA, todas ubicadas al sur de la ZMCM, también se encontró la presencia de  $\text{Cl}^-$ , aunque en menor proporción que los dos aniones antes mencionados. En el anexo 4 se encuentran desglosados el promedio ponderado de cada ion, así como el pH, por año para cada estación.

### 5.1.5 Variación temporal y espacial del ión nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )

Considerando al ion  $\text{NO}_3^-$  como precursor de la lluvia ácida en la ZMCM, se realizó el diagrama de cajas y bigotes para las concentraciones de este ion durante el periodo del 2003-2019 (Figura 40).

En el diagrama se observa que el valor máximo obtenido fue en la estación del suroeste LOM, el cual fue de 113.87  $\mu\text{Eq/L}$  durante el periodo 2003-2019, esto se debe a que esa región es considerada como zona de conservación, esto hace que tenga una alta carga de materia orgánica propiciando que ocurran reacciones de nitrificación y el aumento de las concentraciones de nitrato (Alarcón, 2012). Mientras tanto, el valor mínimo se dio en la estación MON con 14.04  $\mu\text{Eq/L}$  durante el año 2004.

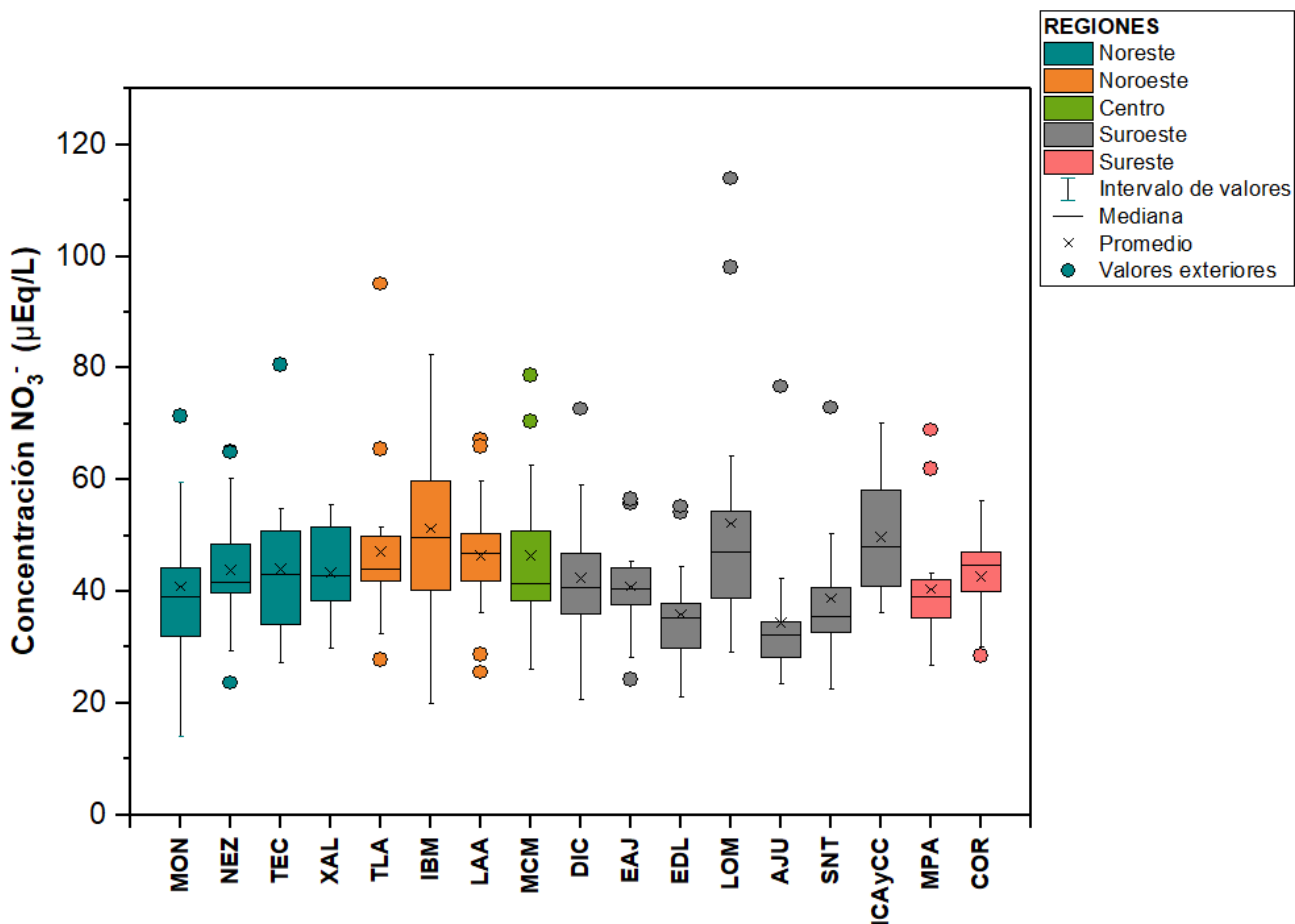


Figura 40. Variación de la concentración de  $\text{NO}_3^-$  en el depósito atmosférico húmedo de la ZMCM 2003-2019

También es importante considerar a la zona centro de la ZMCM representada por la estación MCM, que en el año 2007 tuvo su máximo en la concentración de  $\text{NO}_3^-$  la cual fue de 78.70  $\mu\text{Eq/L}$ , debido a la alta afluencia de vehículos diarios en esa zona, pues en la ZMCM son precisamente los vehículos la principal fuente de emisión de  $\text{NO}_x$ , contaminante responsable de la formación del  $\text{NO}_3^-$ .

En el caso de las estaciones del norte y de acuerdo con la distribución espacial por años presentada en los siguientes mapas (Figura 41, 42, 43 y 44), se observa que las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  más altas se dieron en los años 2003 (64.22  $\mu\text{Eq/L}$ ), 2005 (71.34  $\mu\text{Eq/L}$ ), 2007 (113.87  $\mu\text{Eq/L}$ ), 2008 (98.00  $\mu\text{Eq/L}$ ) y 2015 (71.31  $\mu\text{Eq/L}$ ),

principalmente en la zona noroeste, esto debido a la presencia de la alta actividad industrial interna y externa a la ZMCM, desde dónde se emiten grandes cantidades de  $\text{NO}_x$ .

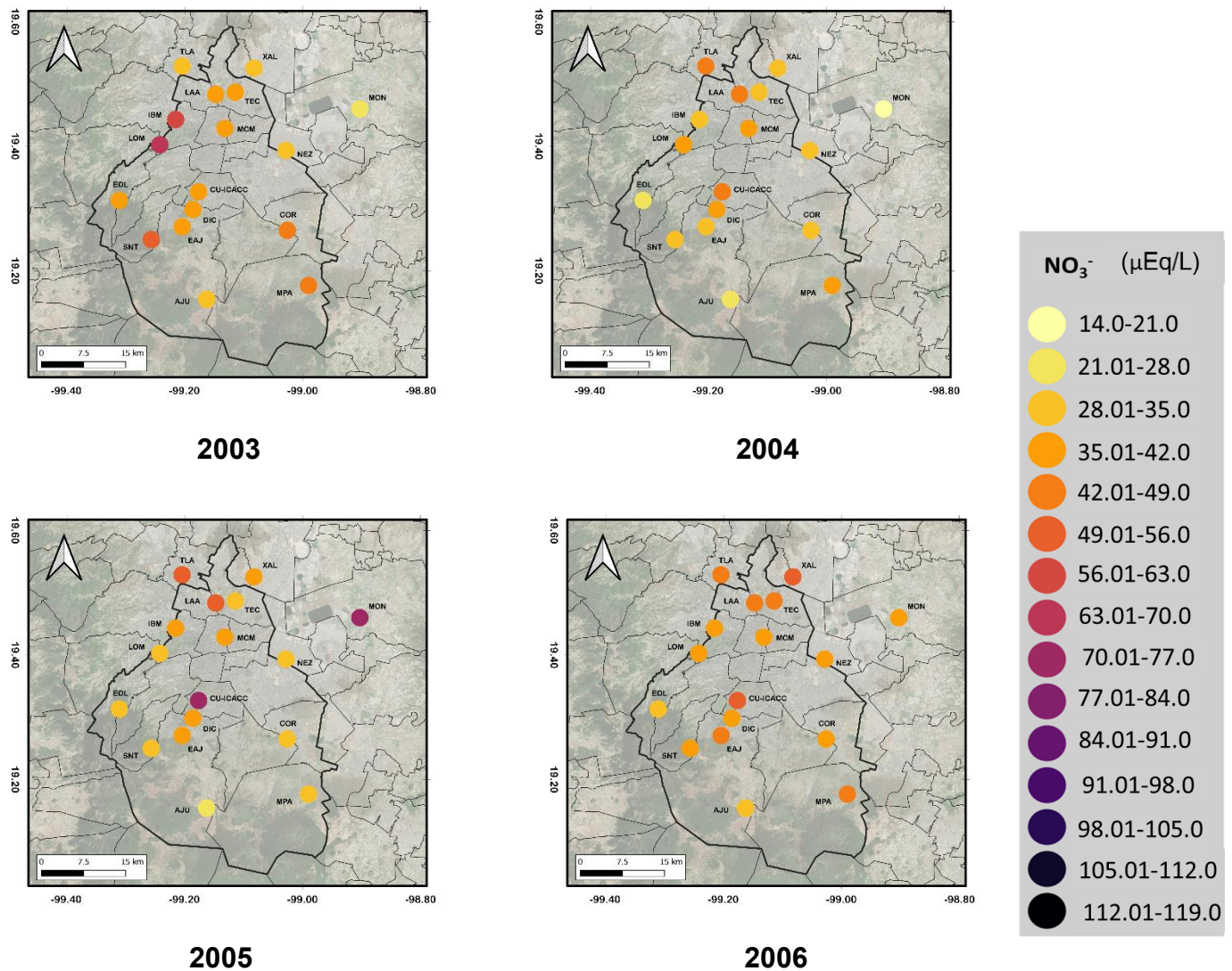


Figura 41. Variación espacial del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en la ZMCM 2003-2006.

# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA

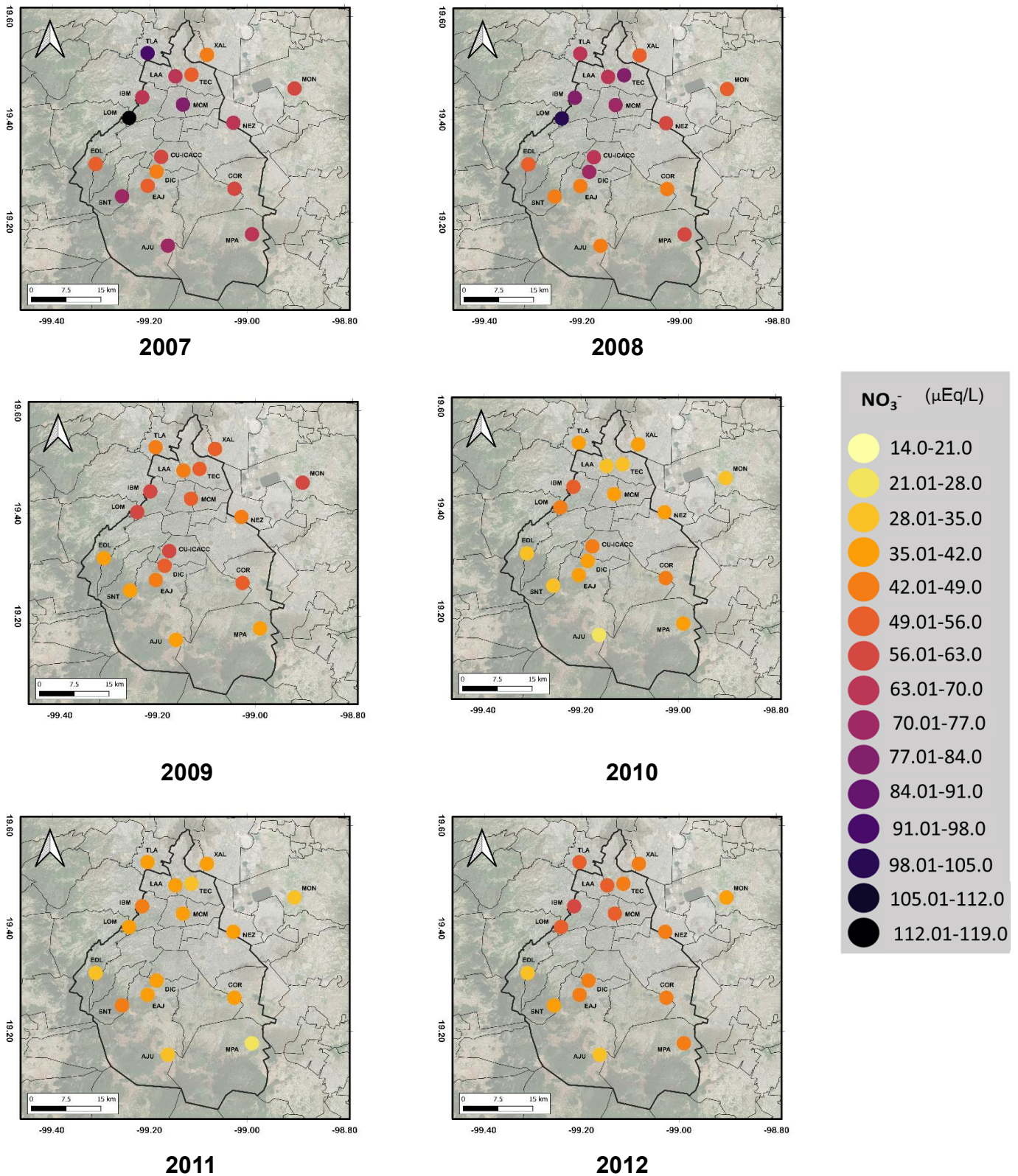


Figura 42. Variación espacial del nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en la ZMCM 2007-2012

# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA

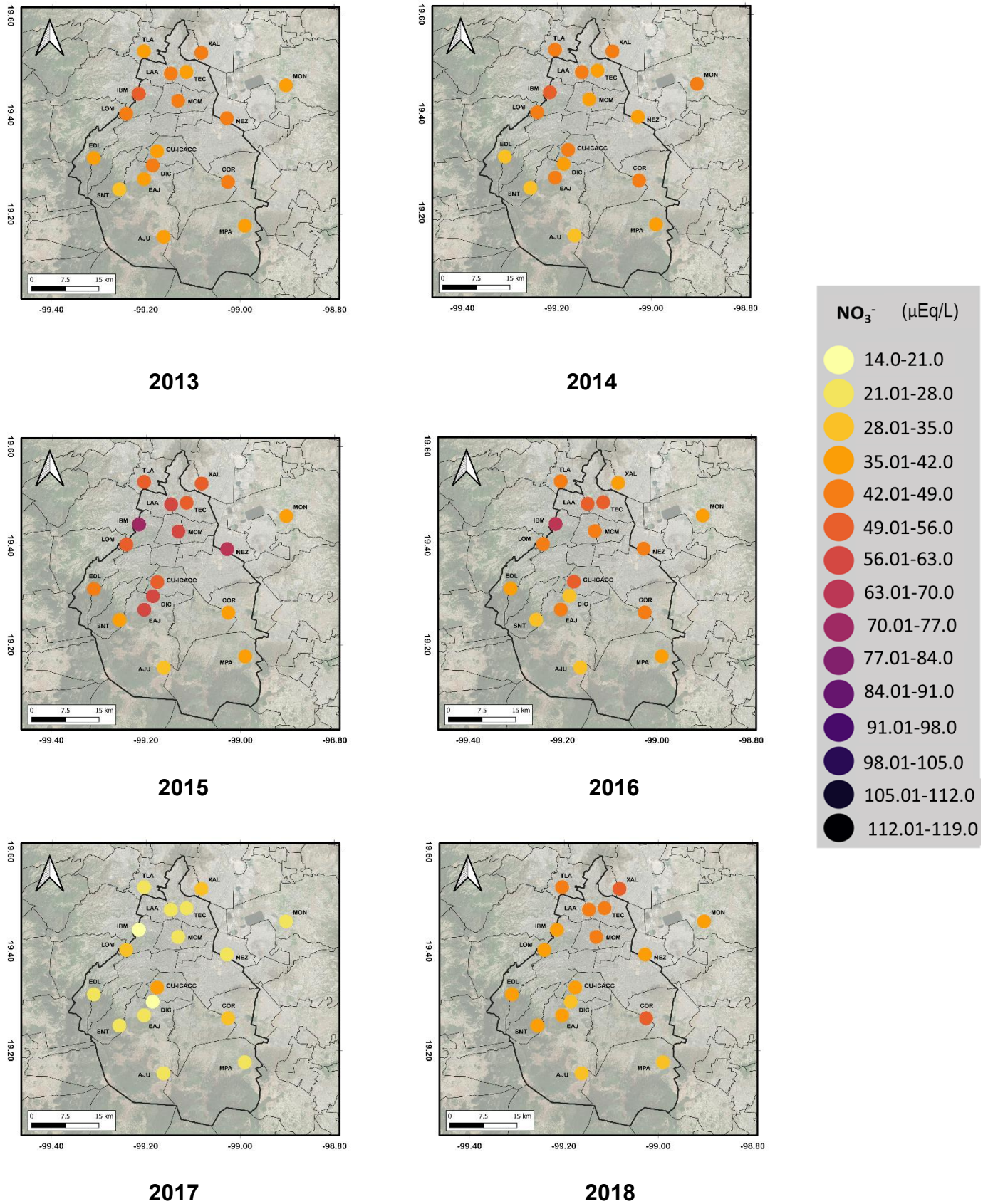
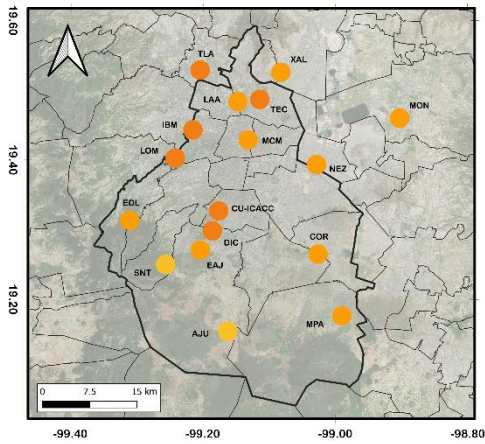


Figura 43. Variación espacial del nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en la ZMCM 2013-2018.





2019

Figura 44. Variación espacial del nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en la ZMCM 2019.

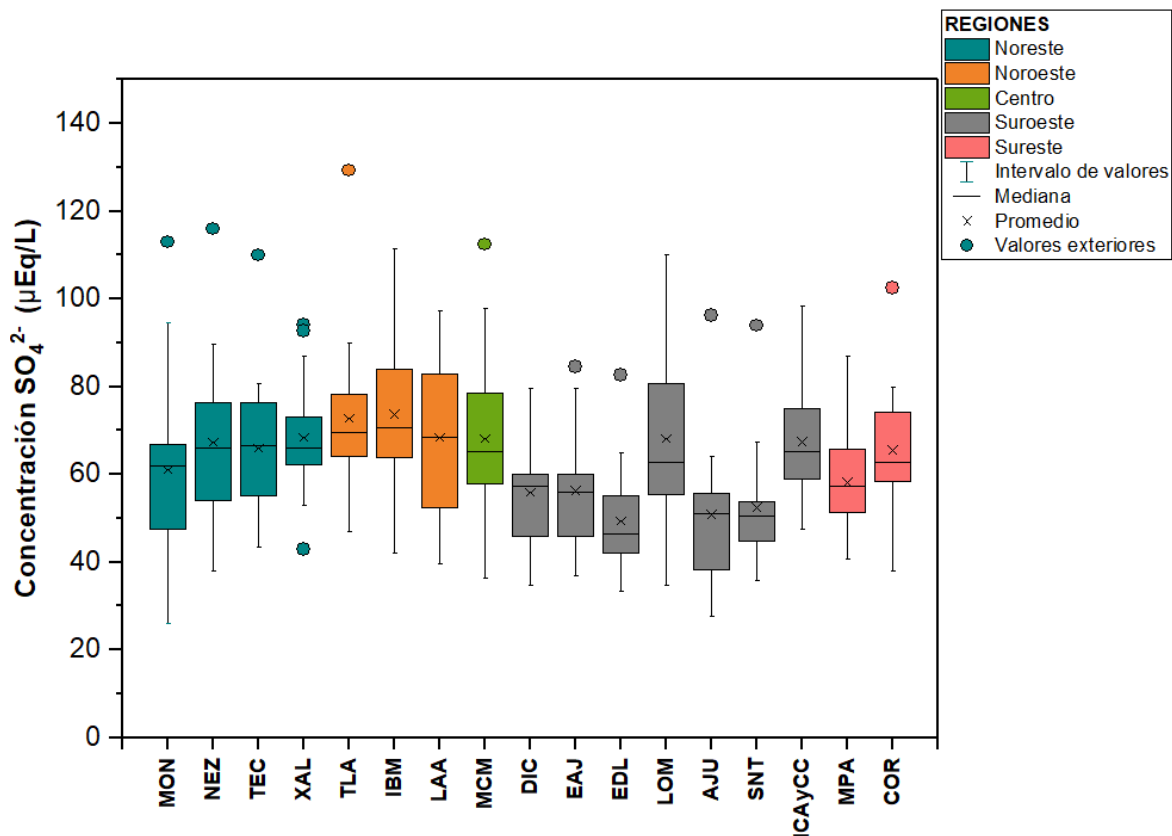
### 5.1.6 Variación temporal y espacial del ion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

Tomando en cuenta que el  $\text{SO}_4^{2-}$  es el segundo ion con mayor presencia en el depósito atmosférico húmedo de la ZMCM sólo después del ion  $\text{NH}_4^+$  de acuerdo con el análisis presentado anteriormente, se realizó el estudio de la variación de la concentración del sulfato para el periodo 2003- 2019, con el fin de indicar aquellas regiones con mayor y menor concentración de este.

En la figura 45, se ilustra que las concentraciones más altas de  $\text{SO}_4^{2-}$  se encuentran en la zona norte y centro de la ZMCM, esto se atribuye principalmente a la presencia del corredor Tula-Vito-Aspasco el cuál es una fuente externa al norte de la ZMCM, dónde se ubican entre otras industrias la refinería de PEMEX “Miguel Hidalgo” y la planta termoeléctrica de CFE “Francisco Pérez Ríos” dónde se sigue consumiendo combustible fósil con alto contenido de azufre (4% peso) (Sosa et al., 2013), y desde dónde se emiten 139,166 ton/año de  $\text{SO}_2$  (SEDEMA, 2021), lo que aumenta considerablemente las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  al norte de la ZMCM.

Otra fuente externa importante de  $\text{SO}_2$  precursor del ion  $\text{SO}_4^{2-}$ , pero de carácter antropogénico es el volcán Popocatepetl, que ha tenido una actividad muy relevante, sobre todo en los años 2012 y 2013 dónde el flujo medio anual de  $\text{SO}_2$  emitido por este volcán fue de 3.5 kton/día, mientras que para el 2015 se presentó una disminución a 2.85 kton/día (Carn et al., 2017), siendo aun así una cifra de importante consideración.

La estación con la mayor concentración durante el periodo de estudio fue TLA en el año 2007, con un máximo de 129.22  $\mu\text{Eq/L}$ , mientras que la estación con el valor mínimo fue MON con 26.06  $\mu\text{Eq/L}$  durante el 2004.



*Figura 45. Variación de la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el depósito atmosférico húmedo de la ZMCM 2003-2019*

De acuerdo con la distribución espacial a lo largo de los años 2003-2019 (Figura 46, 47 y 48), se observa que, durante los años 2005, 2007, 2008, 2015 y 2016 se obtuvieron las mayores concentraciones del  $\text{SO}_4^{2-}$ , con valores por arriba de los 100.00  $\mu\text{Eq/L}$ , en las estaciones MON con 112.93  $\mu\text{Eq/L}$ , TLA 129.22  $\mu\text{Eq/L}$ , TEC 109.88  $\mu\text{Eq/L}$ , NEZ 115.91  $\mu\text{Eq/L}$  e IBM 103.16  $\mu\text{Eq/L}$ , todas estas estaciones ubicadas al norte de la ZMCM.

Los valores más bajos de los promedios ponderados para la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  se encontraron distribuidos en las estaciones ubicadas al sureste de la ZMCM como lo fueron AJU en 2003 con 35.37  $\mu\text{Eq/L}$  y en 2011 con 38.39  $\mu\text{Eq/L}$ , así como la estación EDL con 33.24  $\mu\text{Eq/L}$  en 2017, exceptuando a la estación MON ubicada al noreste de la ZMCM, dónde se obtuvo el valor mínimo del periodo general 2003-2019.

# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA

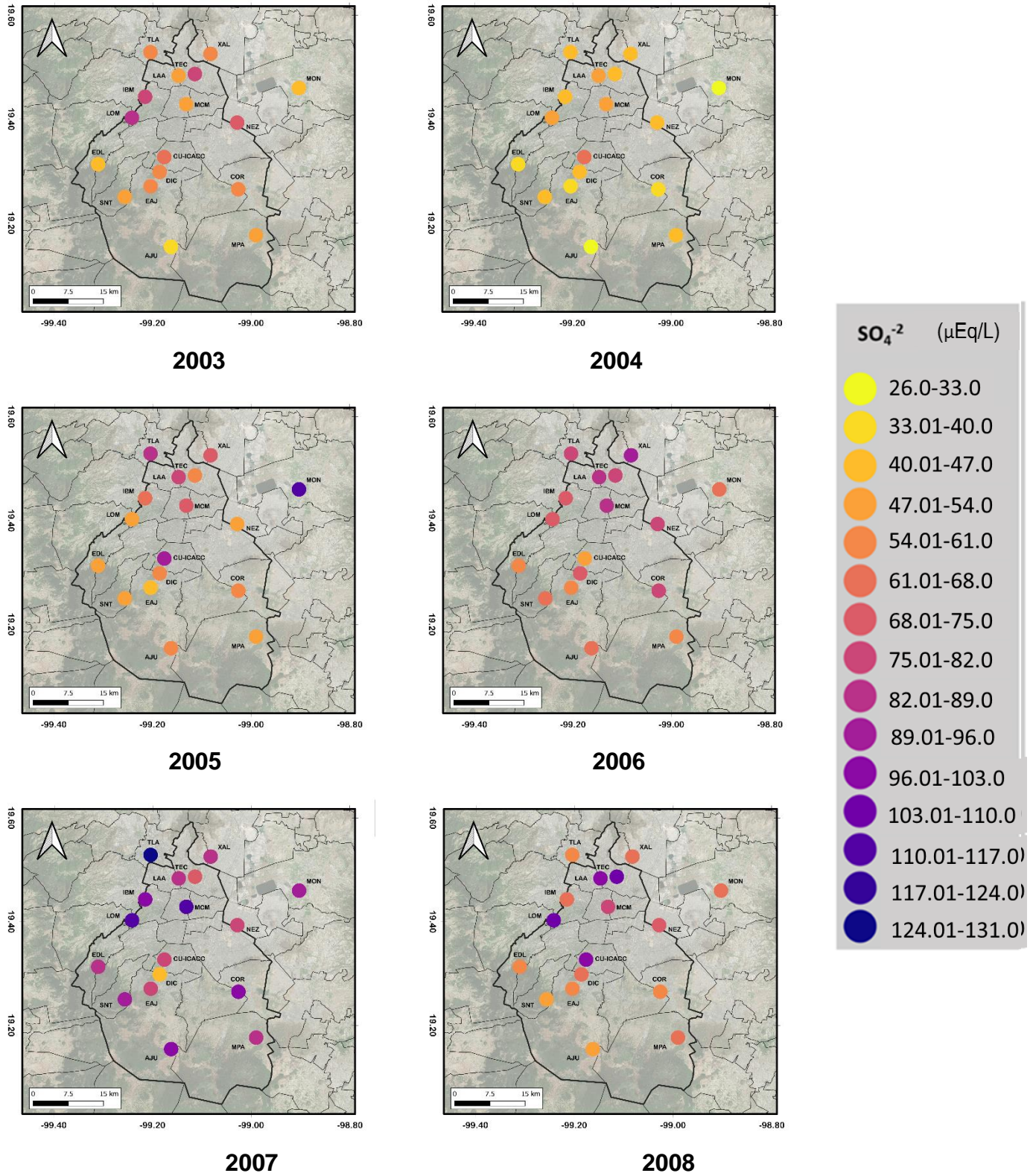


Figura 46. Variación espacial del sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) en la ZMCM 2003-2008

# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA

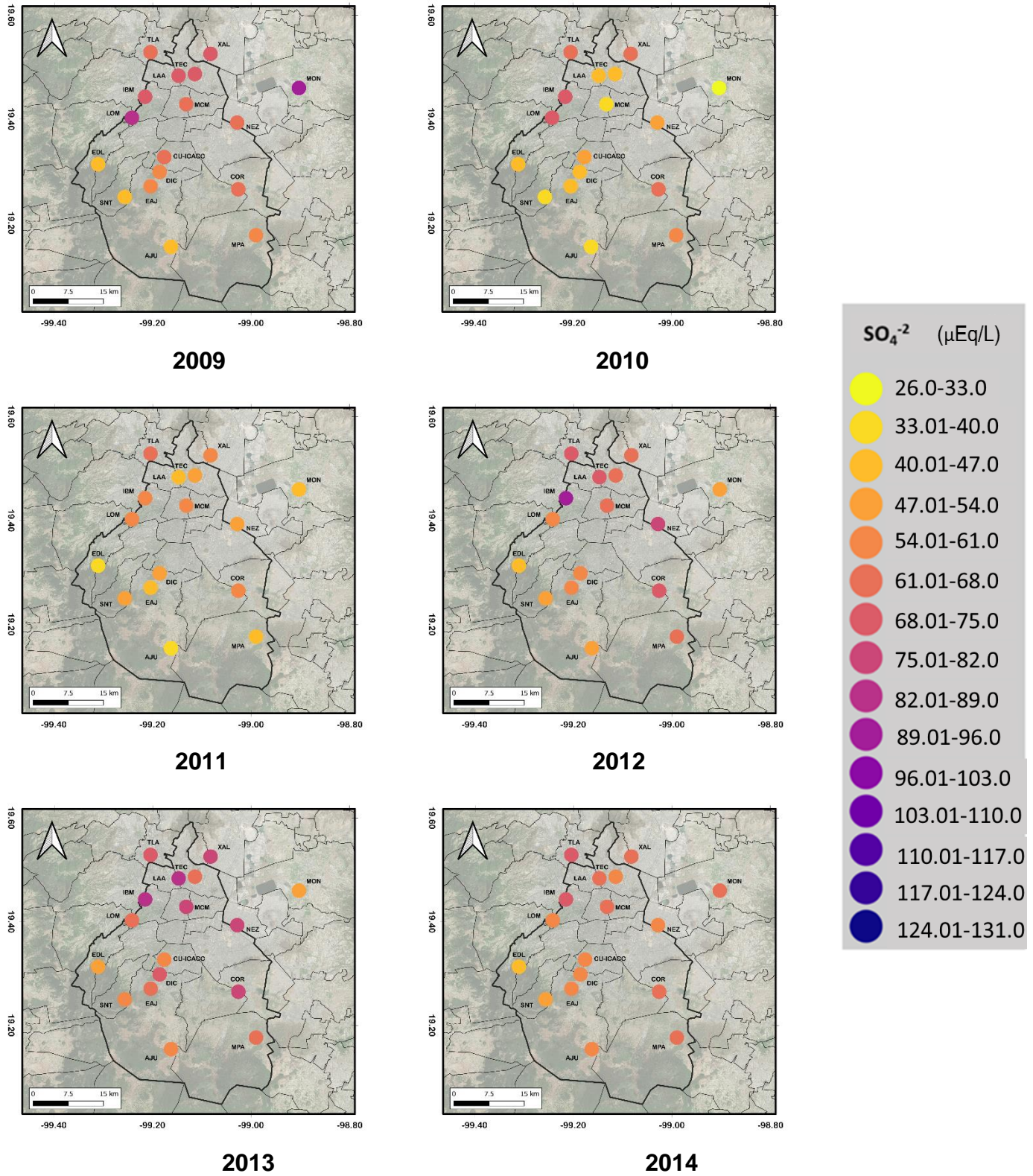


Figura 47. Variación espacial del sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) en la ZMCM 2009-2014

# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA

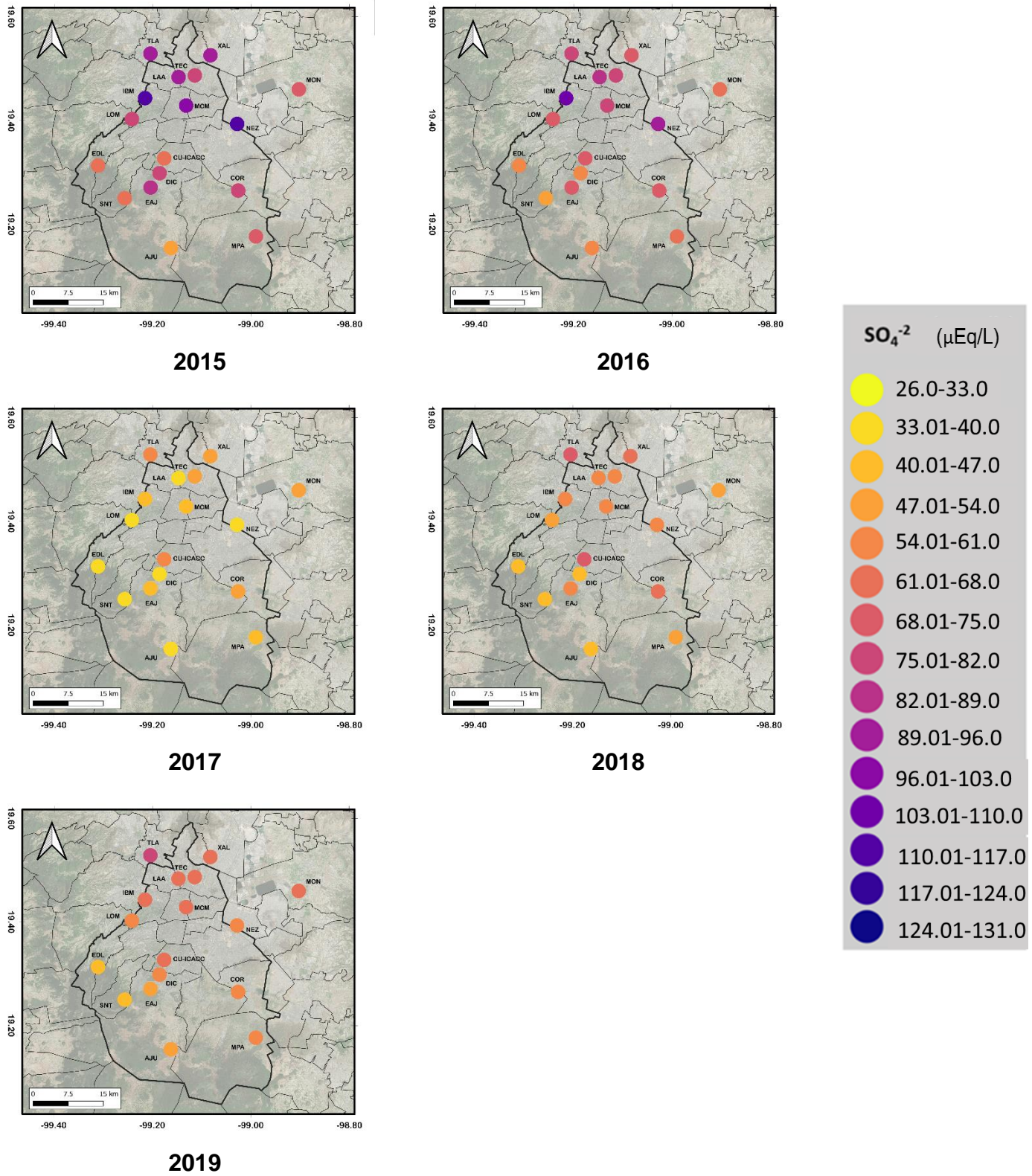


Figura 48. Variación espacial del sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) en la ZMCM 2015-2019

### 5.1.7 Variación temporal y espacial de la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$

La relación entre los iones sulfato/nitrato ( $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ ), es un claro indicador para poder percatarnos de cuál de ambos iones es el que contribuye mayormente a la acidez del depósito atmosférico húmedo. En el caso de la ZMCM de la evaluación de esta relación, se obtuvo que la media del periodo 2003-2019 para todas las estaciones fue mayor a 1 (Figura 49), esto significa que hay mayor presencia de  $\text{SO}_4^{2-}$  con respecto al  $\text{NO}_3^-$  en el depósito atmosférico húmedo de la ZMCM durante el periodo de estudio.

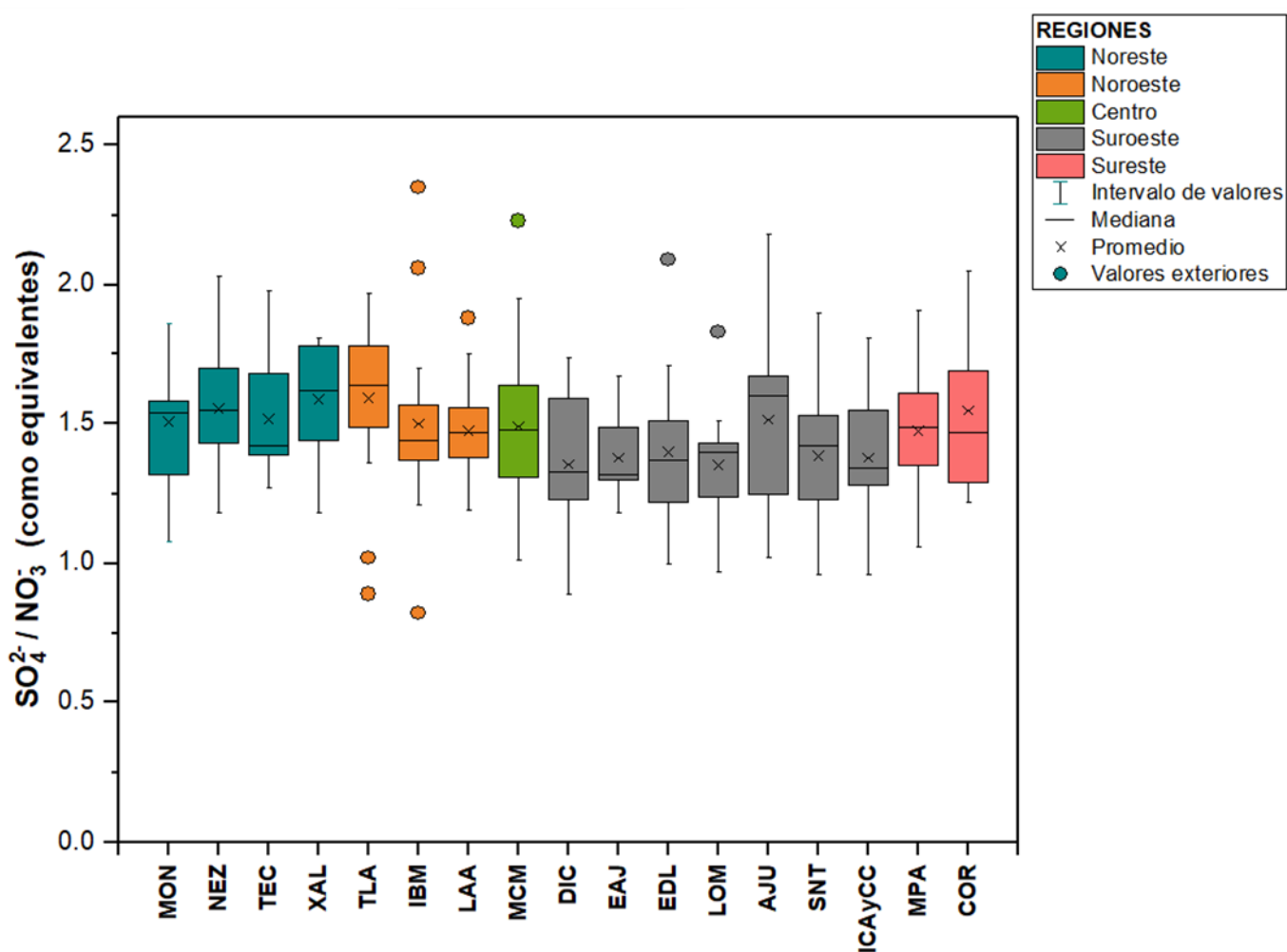


Figura 49. Variación de la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  del depósito atmosférico húmedo de la ZMCM 2003-2019

De acuerdo con la distribución espacial por años (Tabla 14) se observa que la zona noroeste y centro presentan las relaciones  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  más altas. El valor más alto se obtuvo en la estación del noroeste IBM, cuyo valor de la relación fue de 2.35 en el año 2017, mientras que el valor mínimo del periodo se presentó en la misma estación durante el 2008, este valor fue de 0.82  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ , este resultado obtenido por debajo de 1.0 indica que la presencia de  $\text{NO}_3^-$  contribuyó mayormente a la acidez de la lluvia. En el caso de la estación ICAYCC, no se cuenta con datos disponibles para los años 2011 y 2012, debido a cambios en la logística del sitio durante ese periodo, como se comentó anteriormente.

*Tabla 14. Promedio ponderado anual de la relación sulfato/nitrato por estación de la ZMCM, 2003-2019*

Región	Clave	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Noreste	MON	1.54	1.86	1.58	1.84	1.58	1.19	1.58	1.08	1.27	1.32	1.34	1.51	1.75	1.48	1.82	1.32	1.58
	NEZ	2.03	1.58	1.70	1.89	1.18	1.19	1.46	1.35	1.28	1.60	1.55	1.51	1.79	1.83	1.61	1.43	1.46
	TEC	1.98	1.27	1.87	1.68	1.37	1.36	1.39	1.41	1.41	1.48	1.78	1.40	1.42	1.51	1.74	1.28	1.43
	XAL	1.73	1.44	1.78	1.74	1.81	1.18	1.32	1.57	1.54	1.42	1.81	1.49	1.78	1.78	1.62	1.28	1.68
Noroeste	TLA	1.76	1.02	1.68	1.78	1.36	0.89	1.49	1.61	1.64	1.45	1.89	1.55	1.74	1.85	1.97	1.58	1.79
	IBM	1.37	1.23	1.70	2.06	1.48	0.82	1.25	1.41	1.21	1.54	1.69	1.43	1.56	1.57	2.35	1.38	1.44
	LAA	1.41	1.23	1.52	1.88	1.27	1.48	1.43	1.47	1.27	1.38	1.75	1.43	1.56	1.66	1.56	1.19	1.58
Centro	MCM	1.36	1.31	1.95	2.23	1.43	1.14	1.22	1.01	1.48	1.32	1.64	1.51	1.56	1.69	1.67	1.26	1.57
Suroeste	DIC	1.33	1.23	1.67	1.74	0.95	0.89	1.17	1.22	1.23	1.31	1.59	1.43	1.35	1.62	1.67	1.35	1.25
	EAJ	1.52	1.30	1.18	1.30	1.43	1.20	1.23	1.24	1.30	1.32	1.62	1.36	1.49	1.55	1.67	1.39	1.32
	EDL	1.14	1.32	1.71	2.09	1.53	1.00	1.22	1.37	1.17	1.46	1.50	1.29	1.46	1.51	1.58	1.17	1.25
	LOM	1.30	1.24	1.51	1.83	0.97	1.10	1.41	1.43	1.40	1.21	1.41	1.41	1.48	1.44	1.19	1.34	1.29
	AJU	1.02	1.15	1.99	2.18	1.25	1.21	1.12	1.46	1.37	1.60	1.61	1.70	1.67	1.78	1.62	1.38	1.62
	SNT	0.96	1.42	1.49	1.90	1.29	1.08	1.08	1.23	1.22	1.38	1.71	1.45	1.53	1.53	1.59	1.24	1.43
Sureste	ICAYCC	1.58	1.44	1.28	0.96	1.30	1.41	1.06	1.21	No disponible	No disponible	1.55	1.34	1.33	1.45	1.63	1.81	1.30
	MPA	1.22	1.11	1.47	1.36	1.26	1.06	1.36	1.35	1.67	1.52	1.74	1.54	1.91	1.80	1.49	1.60	1.61
	COR	1.27	1.22	2.05	1.94	1.82	1.29	1.28	1.38	1.47	1.57	1.69	1.47	1.90	1.65	1.64	1.26	1.42

También se observó que particularmente durante el 2006, los valores de las relaciones en la mayoría de las estaciones tuvieron un incremento, lo cual puede apreciarse mejor en el mapa correspondiente (Figura 51), este comportamiento sucedió porque durante ese tiempo el incremento de la presencia de  $\text{SO}_4^{2-}$  fue en muchos casos el doble que la presencia de  $\text{NO}_3^-$ .



Al existir una media de la relación  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  de 1.47 para todo el periodo de estudio, se indica entonces que la acidez del depósito atmosférico húmedo de la ZMCM en general se ve mayormente influenciada por la presencia del  $SO_4^{2-}$  en comparación con el  $NO_3^-$ , y aunque existe evidencia de la reducción en la emisiones de  $SO_2$  debido a la estrategias implementadas, la relación  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  sigue indicando mayor presencia del  $SO_4^{2-}$  debido a lo argumentado con anterioridad, que existen fuentes externas emisoras de  $SO_2$  ubicadas principalmente al norte de la región, desde dónde partículas ácidas se pueden transportar desde largas distancias hasta la ZMCM, principalmente debido a la dirección del viento en la zona que es de norte a sur.

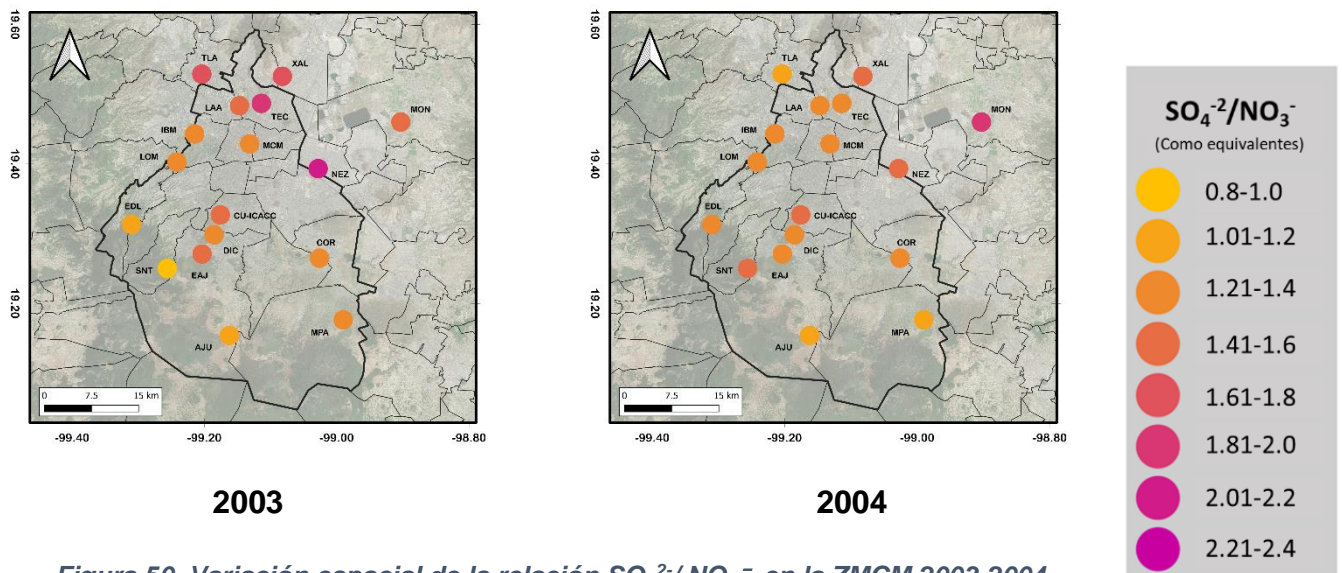
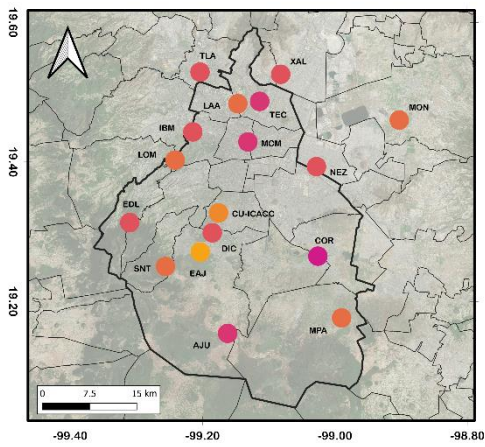
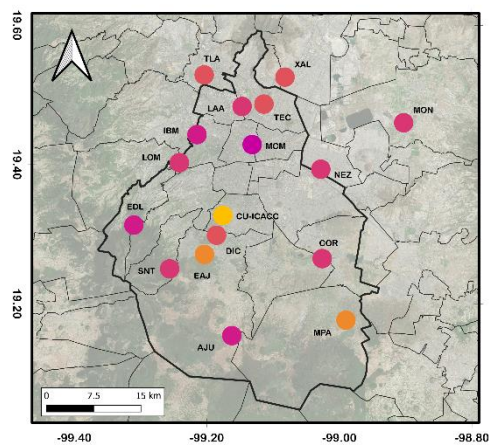


Figura 50. Variación espacial de la relación  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  en la ZMCM 2003-2004

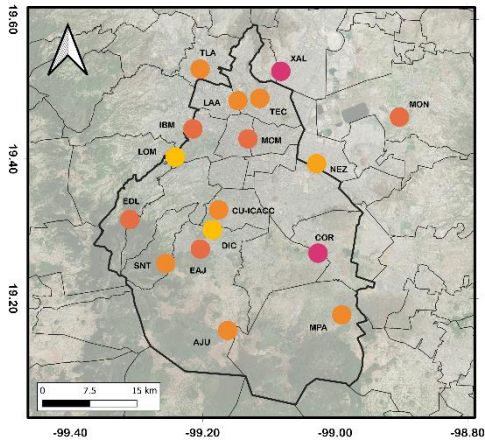
# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA



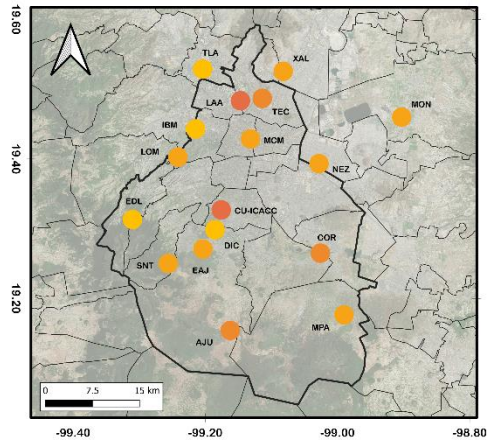
2005



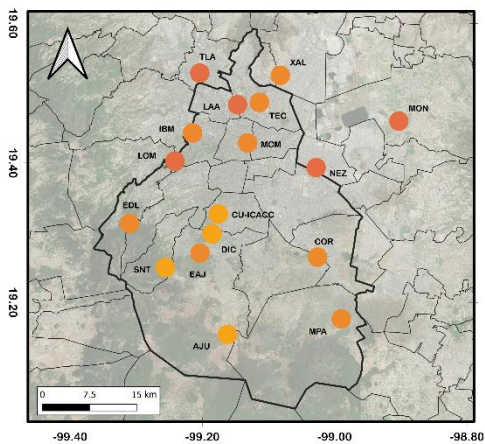
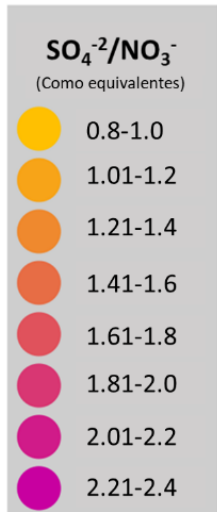
2006



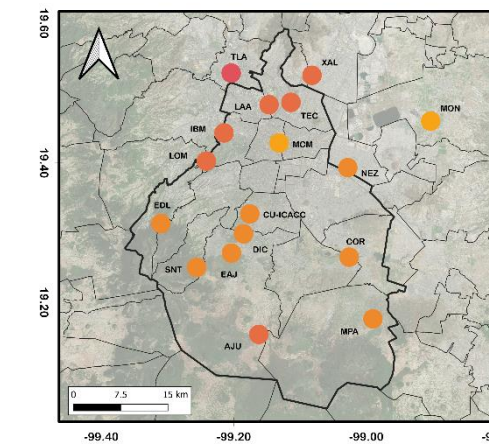
2007



2008



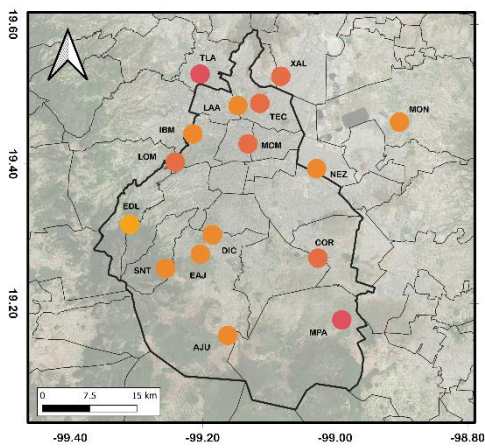
2009



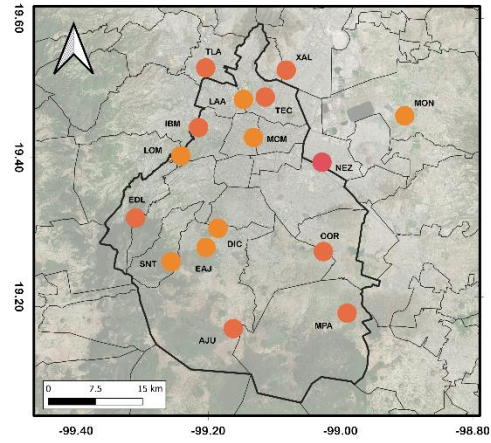
2010

Figura 51. Variación espacial de la relación SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la ZMCM 2005-2010

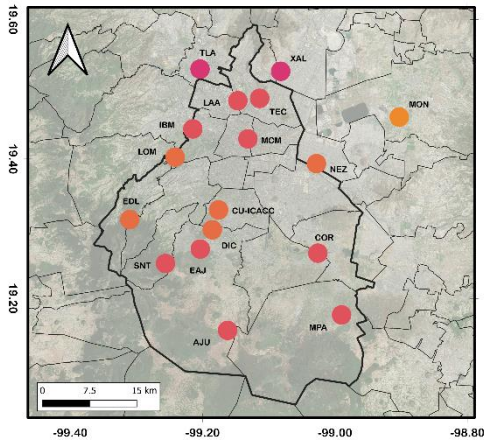
# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA



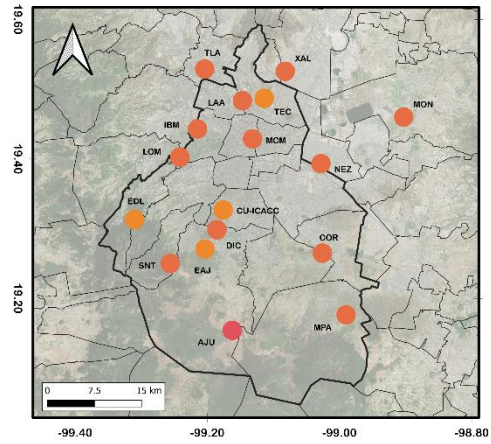
2011



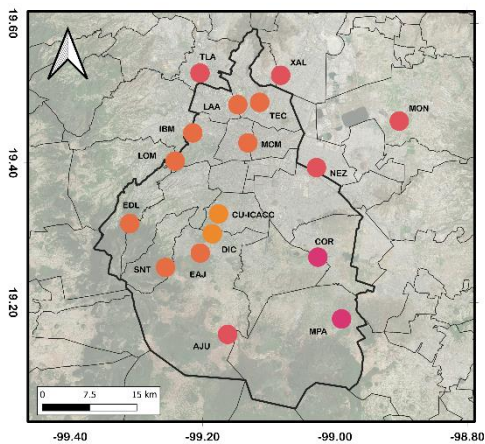
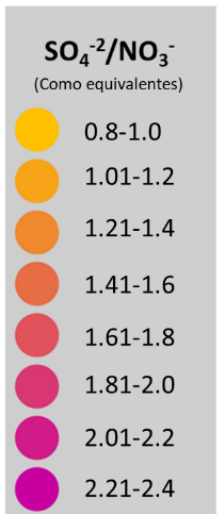
2012



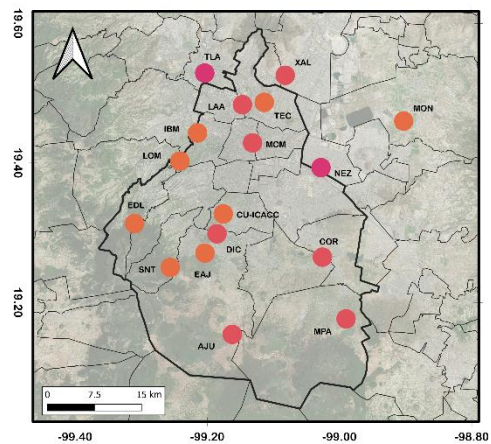
2013



2014



2015



2016

Figura 52. Variación espacial de la relación SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la ZMCM 2011-2016

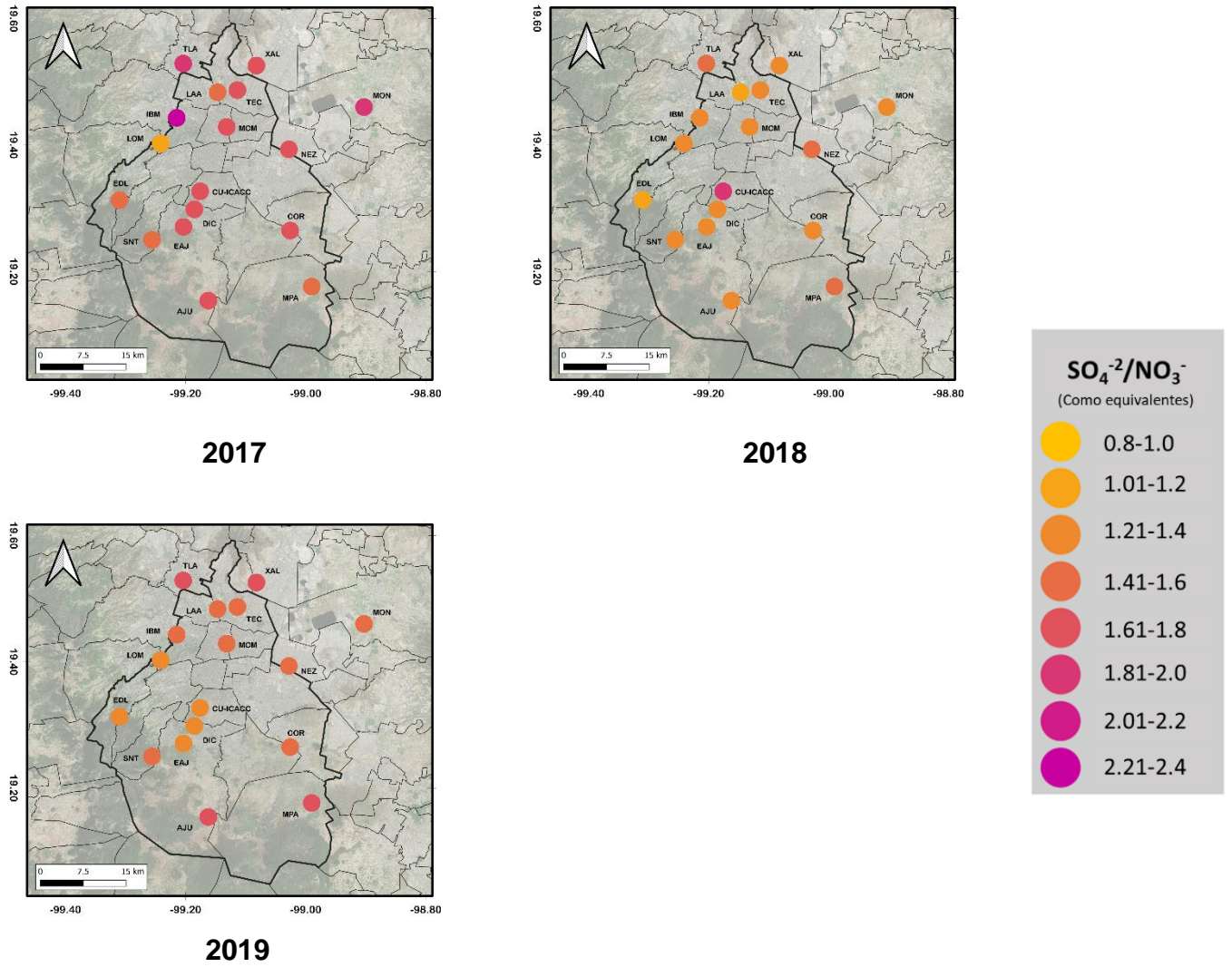


Figura 53. Variación espacial de la relación  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  en la ZMCM 2017-2019

### 5.1.8 Variación temporal y espacial del amonio ( $\text{NH}_4^+$ )

Como se mencionó en el capítulo 5.1.4 correspondiente al análisis de la composición química (iones) de la lluvia en la ZMCM para el 2003-2019, el  $\text{NH}_4^+$  es el ion que tiene mayor presencia en el depósito atmosférico de esta zona, con promedios ponderados de su concentración que van desde los 27.36  $\mu\text{Eq/L}$  valor obtenido en la estación DIC en el año 2007, hasta 233.07  $\mu\text{Eq/L}$  en la estación MON durante el 2005.

De acuerdo con la variación temporal (Figura 54) y espacial (Figura 55, 56 y 57), se observa que a lo largo de los años 2003 al 2019, ha existido mayor concentración del ion  $\text{NH}_4^+$  en las estaciones ubicadas al norte y centro de la ZMCM, mientras que las estaciones del sur presentan valores más bajos, especialmente aquellas ubicadas en el suroeste de la región.

Lo anterior puede explicarse debido a que en la zona norte y centro se concentra una mayor afluencia de vehículos diariamente y es necesario considerar la reacción química del  $\text{NH}_3$  emitido por fuentes móviles para la formación del ion  $\text{NH}_4^+$ , además de que se suman la emisiones provenientes de la presencia de áreas dónde se practican actividades agrícolas que incorporan fertilizantes al suelo, industrias de elaboración de alimentos y la descomposición de materia orgánica proveniente de la ganadería (Ávila, 2018).

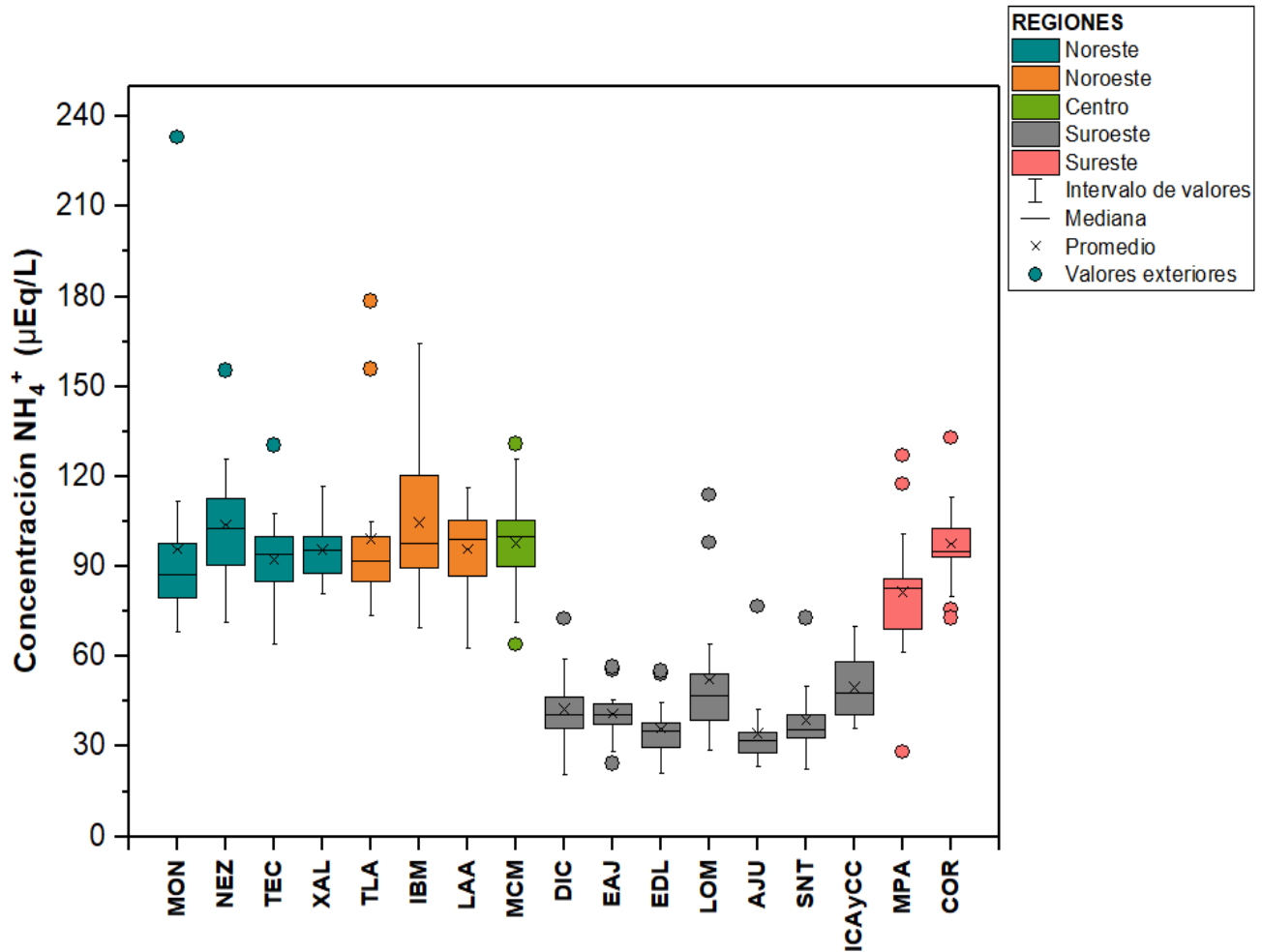
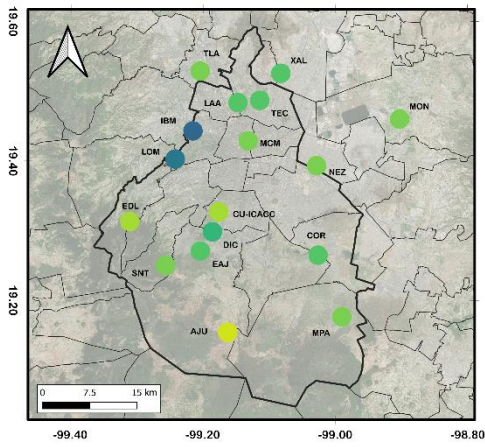


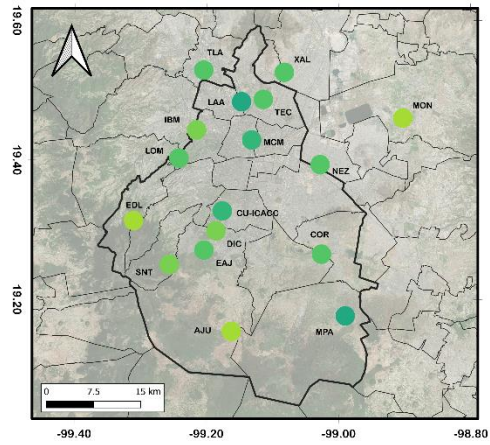
Figura 54. Variación de la concentración de  $NH_4^+$  del depósito atmosférico húmedo de la ZMCM 2003-2019

Por la razón anterior y debido al efecto neutralizante que tiene el  $NH_4^+$  en el depósito atmosférico húmedo, se explica que el pH de este sea menos ácido al norte de la ZMCM, pues es la región donde se encuentran las concentraciones más altas de  $NH_4^+$ , mientras que al sur donde se encontraron promedios más altos hay menor concentración de este ion.

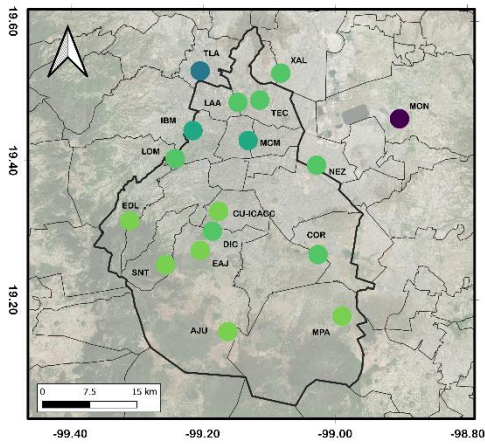
# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA



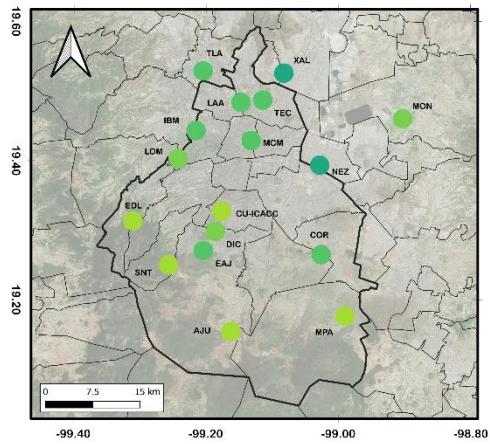
2003



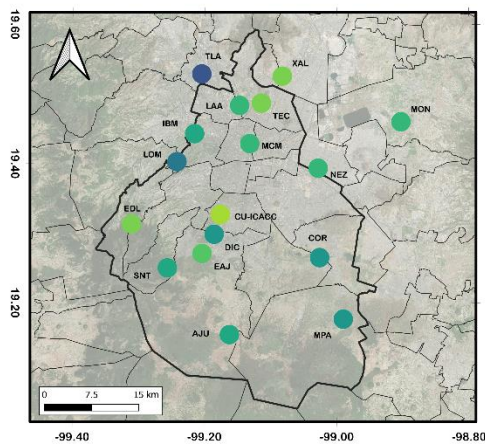
2004



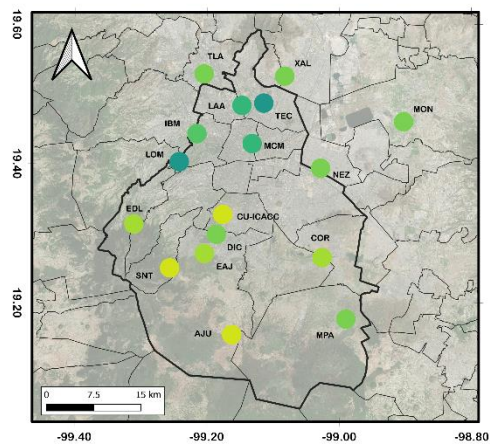
2005



2006



2007



2008

**NH<sub>4</sub><sup>+</sup>** (μEq/L)

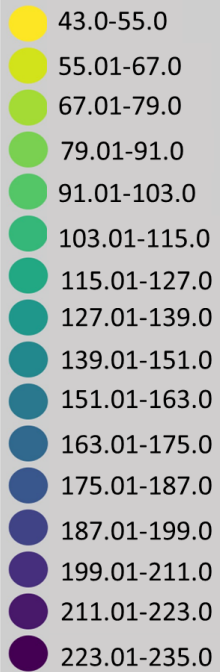


Figura 55. Variación espacial del amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) en la ZMCM 2003-2008

# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA

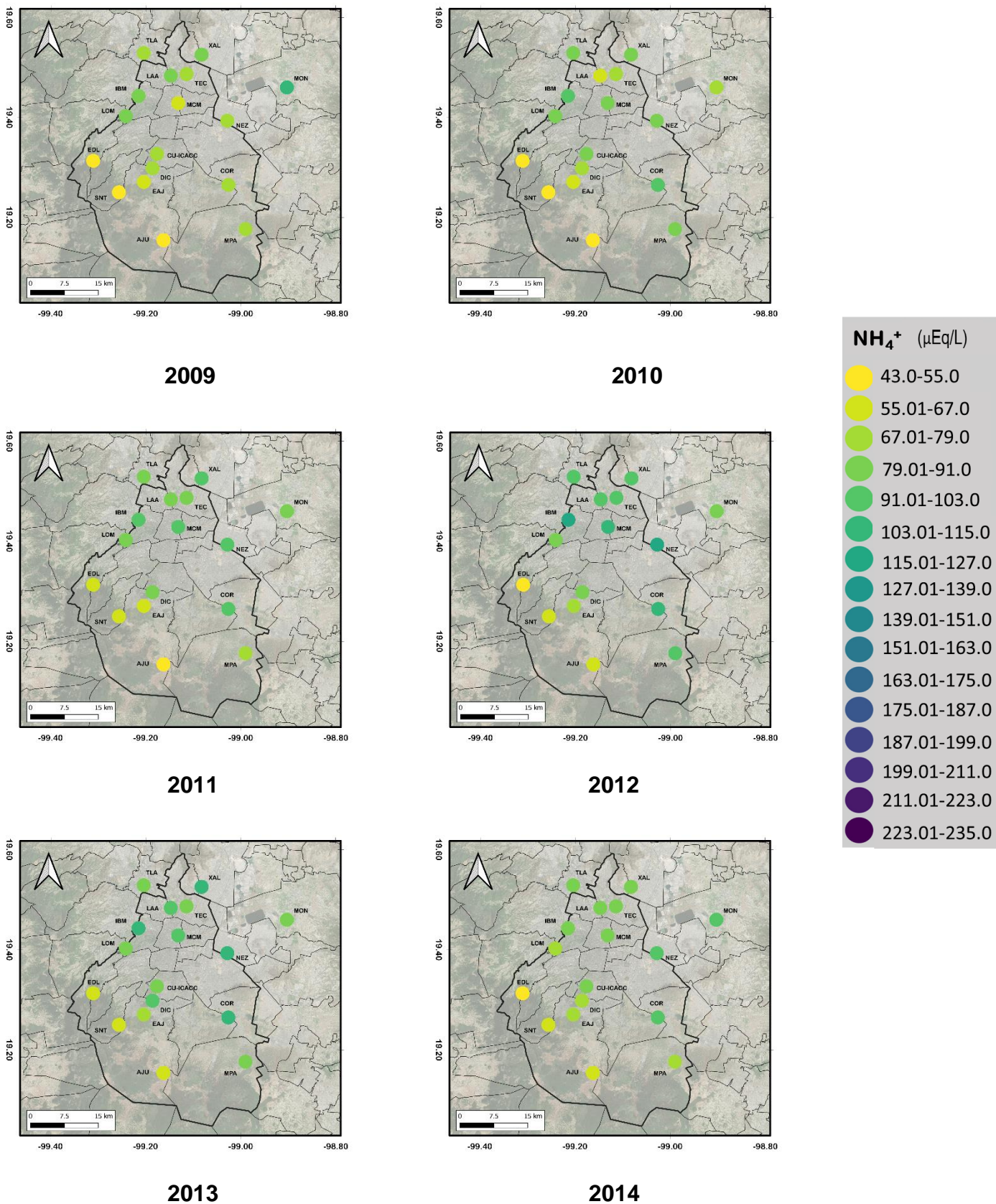
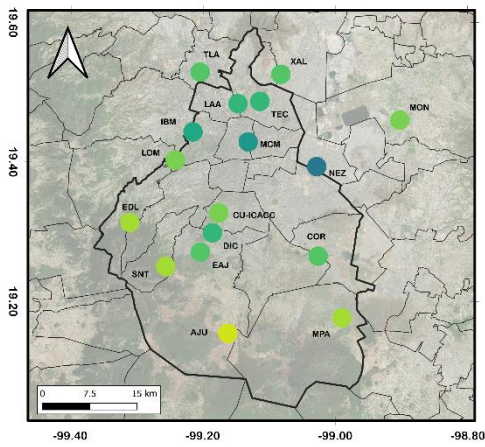


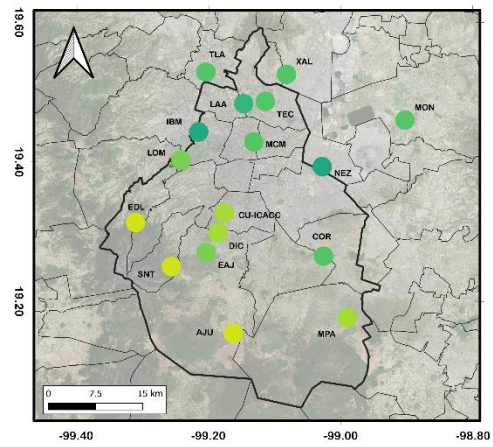
Figura 56. Variación espacial del amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en la ZMCM 2009-2014



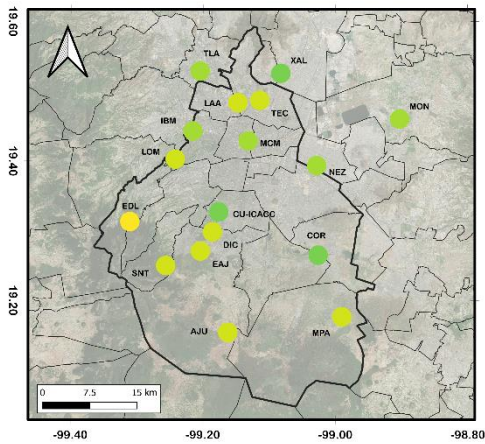
# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA



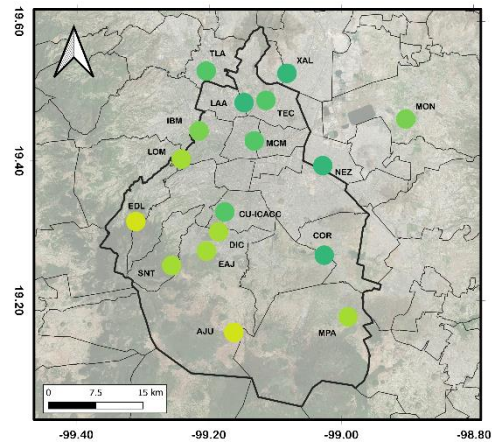
2015



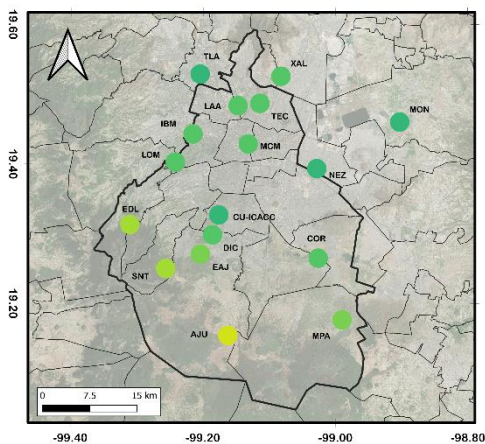
2016



2017



2018



2019

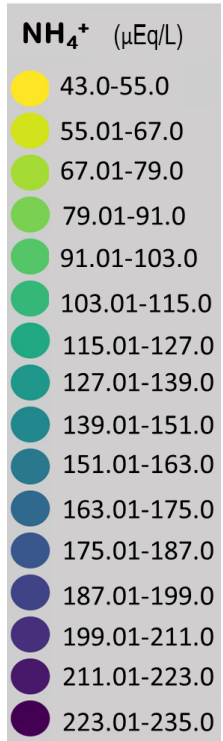


Figura 57. Variación espacial del amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) en la ZMCM 2015-2019

### 5.1.9 Variación temporal y espacial de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$

La relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ , es un indicador del tipo de nitrógeno reactivo (Nr) que predomina en el depósito atmosférico húmedo, ya sea la parte oxidada ( $\text{NO}_3^-$ ) o la parte reducida ( $\text{NH}_4^+$ ). En este estudio, y de acuerdo con la figura 58 se muestra que el valor más alto en la relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  (Tabla 15) (señalado con color amarillo) fue de 4.88 en la estación MON, este valor obtenido significa que la predominancia en este caso es de parte del nitrógeno en su forma reducida ( $\text{NH}_4^+$ ), esto tiene explicación, pues la estación MON está ubicada al norte de la ZMCM zona donde existe la mayor concentración de  $\text{NH}_4^+$  y además corresponde a un área rural rodeada de actividad agrícola y ganadera.

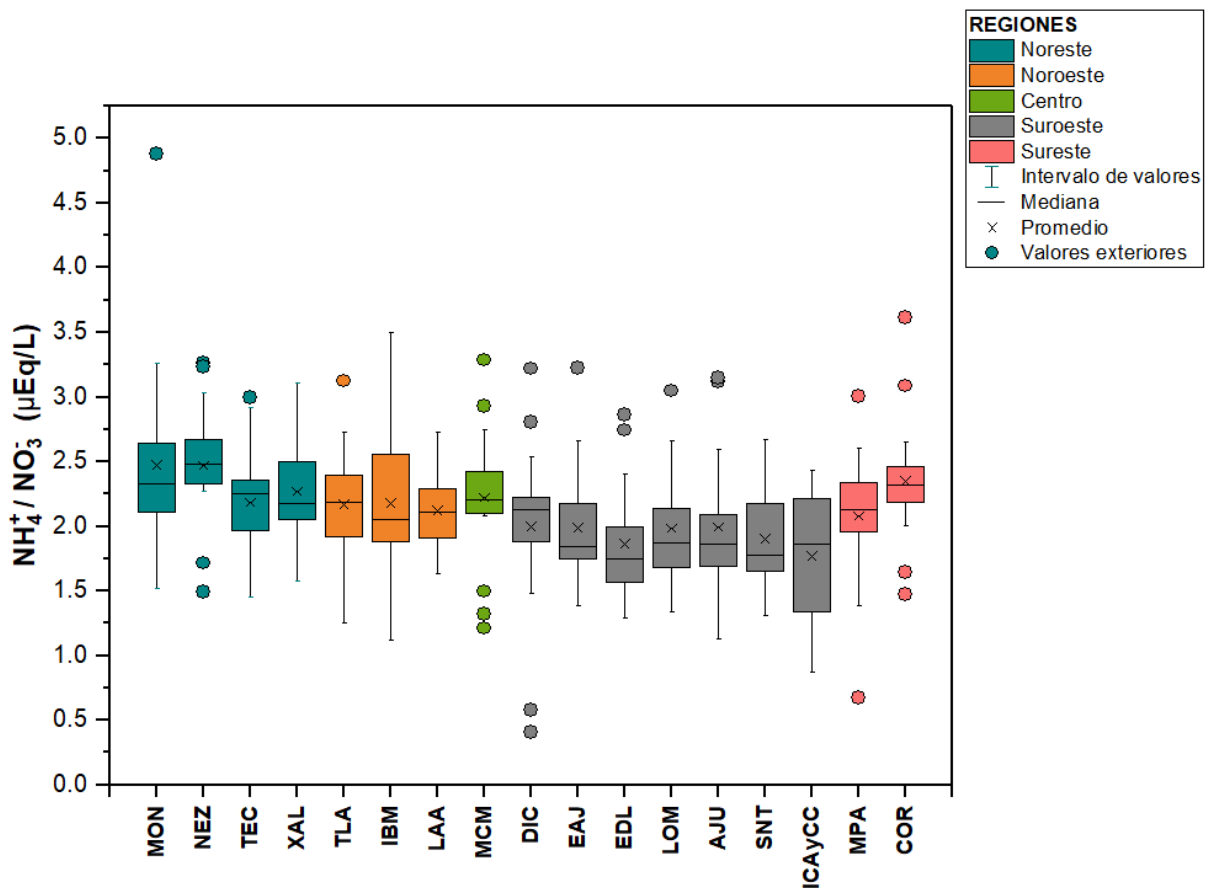


Figura 58. Variación de la relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  del depósito atmosférico húmedo de la ZMCM 2003-2019

Por otro lado, el valor mínimo de la relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  (señalado con color azul) fue durante el año 2008 en la estación DIC, donde la relación tuvo un valor de 0.40, lo que indica mayor presencia del  $\text{NO}_3^-$ , la forma oxidada del N.

**Tabla 15. Promedio ponderado anual de la relación amonio/nitrato por estación de la ZMCM, 2003-2019**

Región	Clave	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Noreste	MON	2.93	4.88	3.27	2.37	1.80	1.52	1.91	2.37	2.49	1.95	2.33	2.21	2.11	2.25	2.68	2.28	2.65
	NEZ	2.68	3.26	3.23	2.86	1.72	1.49	1.72	2.27	2.42	2.48	2.33	2.37	2.40	2.58	3.03	2.48	2.62
	TEC	2.53	2.92	3.00	1.95	1.68	1.62	1.45	2.26	2.46	2.01	2.28	2.10	1.97	1.97	2.36	2.26	2.25
	XAL	3.07	3.11	2.60	2.16	1.68	1.58	1.63	2.08	2.47	2.08	2.43	2.05	1.97	2.36	2.50	2.18	2.61
Noroeste	TLA	2.64	2.18	3.12	2.39	1.88	1.25	1.65	2.06	2.16	1.96	2.31	1.92	1.78	2.20	2.73	2.21	2.41
	IBM	2.75	2.56	3.18	2.60	1.93	1.12	1.45	1.96	2.00	2.06	2.10	1.73	1.72	1.88	3.50	2.23	2.26
	LAA	2.69	2.73	1.96	2.18	1.70	1.63	1.72	2.25	2.29	2.02	2.04	1.91	1.75	2.11	2.47	2.22	2.36
Centro	MCM	2.29	2.93	3.29	2.54	1.32	1.50	1.21	2.23	2.40	2.10	2.16	2.21	2.09	2.16	2.74	2.18	2.43
Suroeste	DIC	2.54	2.44	2.81	2.22	0.58	0.40	1.48	1.94	1.99	1.96	2.13	1.88	1.76	2.20	3.22	2.20	2.17
	EAJ	2.33	3.23	2.21	2.09	1.66	1.52	1.39	1.84	1.83	1.76	1.92	1.64	1.75	1.83	2.66	1.92	2.17
	EDL	1.93	2.86	2.75	2.40	1.56	1.29	1.35	1.81	1.75	1.70	1.65	1.55	1.56	1.72	2.04	1.75	2.00
	LOM	2.53	2.66	3.05	2.06	1.35	1.34	1.44	1.88	2.03	1.68	1.87	1.78	1.67	1.83	2.29	2.10	2.14
	AJU	1.69	3.12	3.15	2.59	1.63	1.41	1.13	1.90	1.73	1.76	1.73	1.63	1.86	2.04	2.43	1.98	2.09
	SNT	1.69	2.67	2.59	2.17	1.66	1.36	1.31	1.75	1.46	1.52	1.93	1.68	1.85	1.78	2.60	1.95	2.34
	ICAYCC	1.86	2.43	1.13	1.42	1.34	0.87	1.20	2.09	No disponible	No disponible	2.15	1.99	1.61	1.53	2.22	2.29	2.38
Sureste	MPA	2.13	3.01	2.61	0.67	1.84	1.39	1.63	2.08	2.56	2.33	2.22	1.95	2.08	2.11	2.25	2.14	2.35
	COR	2.01	3.09	3.62	2.32	2.36	1.64	1.47	2.19	2.46	2.40	2.39	2.21	2.27	2.09	2.66	2.24	2.51

Los promedios del periodo 2003-2019 para todas las estaciones se encuentran por arriba de 1.0 lo que muestra que, sin importar la zona donde se ubique la estación, han tenido en promedio mayor presencia del N en su forma reducida ( $\text{NH}_4^+$ ), mientras que la media general del periodo de estudio fue de 2.12, esto confirma la predominancia del  $\text{NH}_4^+$  ante el  $\text{NO}_3^-$ , en un poco más del doble de concentración.

De la distribución espacial (figura 59, 60 y 61), se puede observar que, durante los años 2003, 2004, 2005 y 2017 se obtuvieron las relaciones  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  más altas, particularmente en el 2004 año en el que se obtuvo el máximo del periodo en la estación Montecillo (MON) como ya se había comentado anteriormente.

# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA

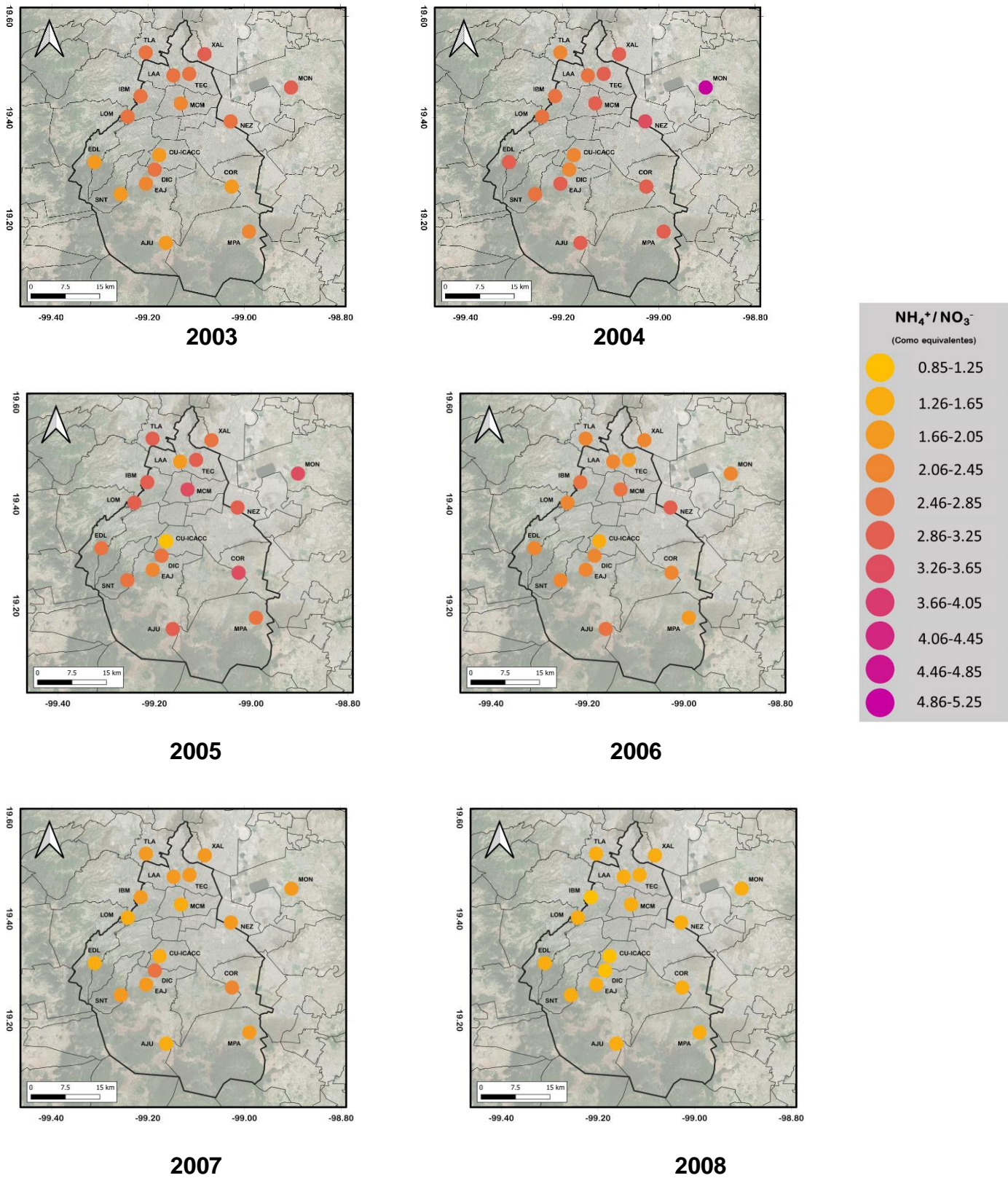
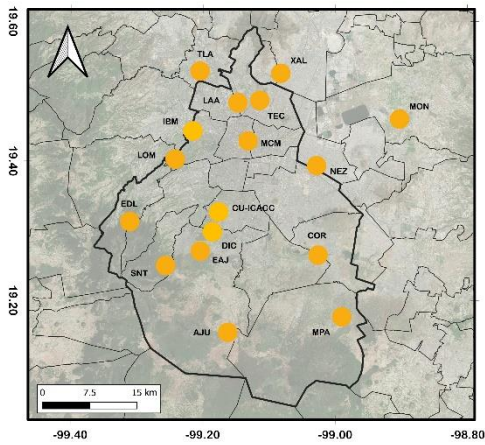
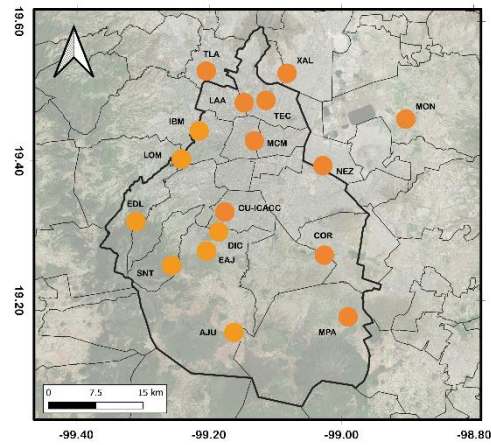


Figura 59. Variación espacial de la relación  $NH_4^+/NO_3^-$  en la ZMCM 2003-2008

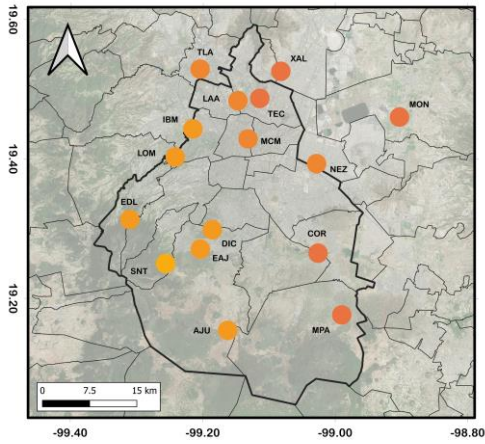
# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA



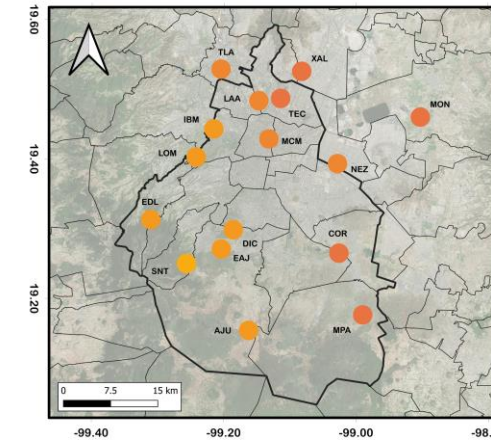
2009



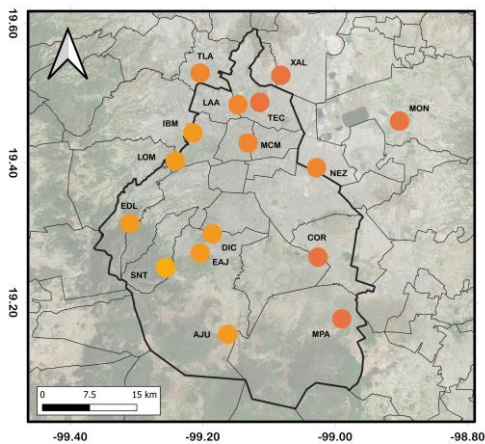
2010



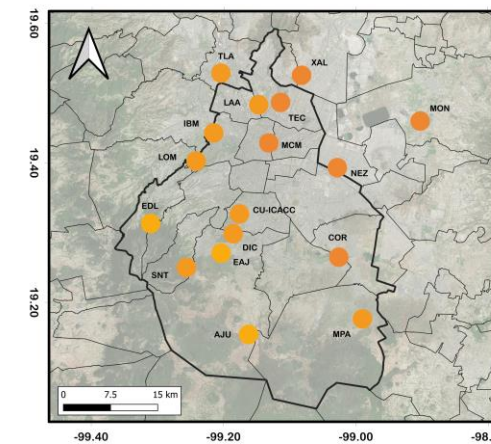
2011



2012



2013



2014

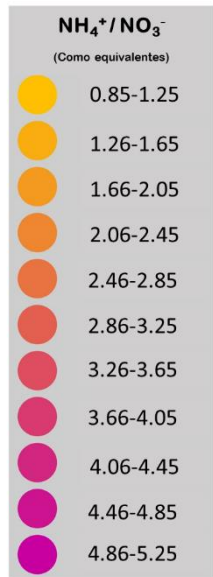
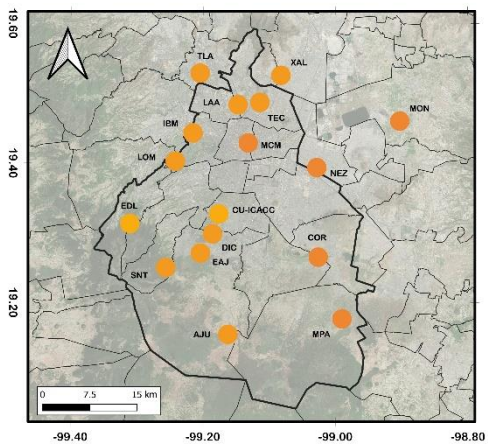
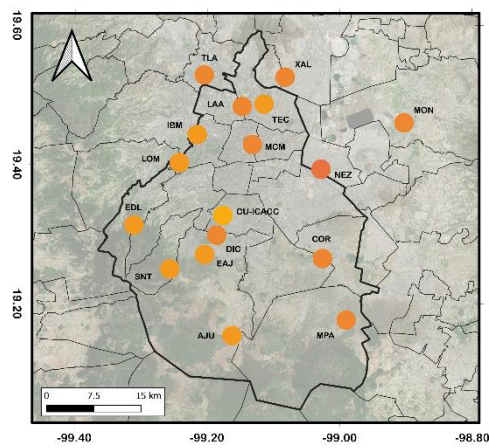


Figura 60. Variación espacial de la relación NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la ZMCM 2009-2014

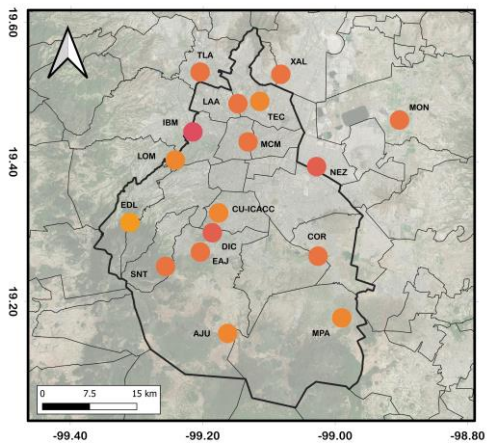
# EVALUACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA EN ZONAS URBANAS DE NORTEAMÉRICA



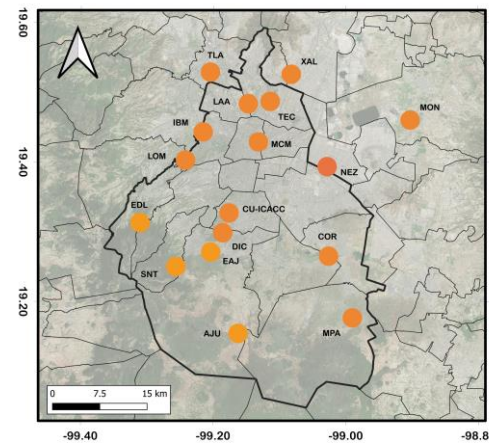
2015



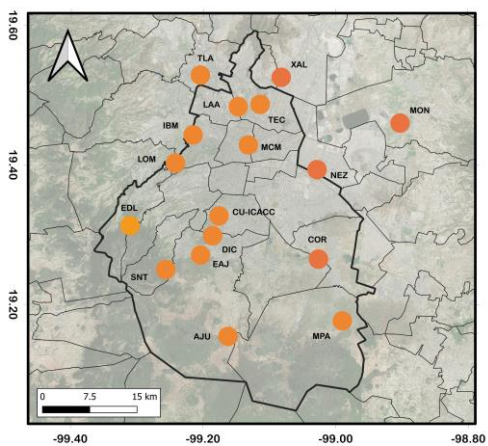
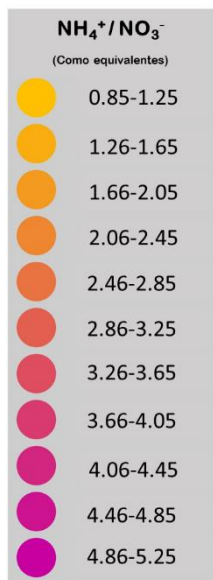
2016



2017



2018



2019

Figura 61. Variación espacial de la relación NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la ZMCM 2015-2019

## 5.2 Comparación del depósito atmosférico húmedo en Zonas Urbanas de Norteamérica

Para la comparación de las características del depósito atmosférico húmedo en distintos sitios de Norteamérica, se calcularon los promedios ponderados anuales para cada parámetro de estudio y cada sitio de muestreo como se hizo para las estaciones de la REDDA en la ZMCM, considerando el mismo periodo de estudio del 2003-2019 para su comparación, debido a que como se mencionó con anterioridad la pandemia por COVID-19 fue una limitante en la disponibilidad de datos principalmente de la REDDA, por la falta de muestreo y análisis continuos a partir del año 2020.

Se seleccionaron sitios urbanos y suburbanos de las zonas de estudio, en el caso de la ZMCM fueron MCM, NEZ, TEC, XAL, TLA, IBM, LAA, DIC, EAJ y LOM, en la ciudad de Los Ángeles, se seleccionó el sitio CA42, para Nueva York, los sitios elegidos fueron NY99, NY43, NY06 y NY92.

En el caso de Denver, Colorado, al no existir sitios de muestreo de depósito atmosférico húmedo clasificados como urbanos o suburbanos en la zona para el periodo 2003-2019, se utilizaron la medias reportadas en el estudio “Inorganic nitrogen wet deposition gradients in the Denver-Boulder metropolitan area and Colorado Front Range – Preliminary implications for Rocky Mountain National Park and interpolated deposition maps”, para sitios urbanos colocados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos durante el 2016-2017 (Wetherbee et al., 2019).

Por último, como se mencionó en el capítulo 4.2 correspondiente a la metodología y la selección de los sitios de estudio, la ciudad de Toronto fue excluida de este análisis pues no hay sitios urbanos de muestreo disponibles en la región.

### 5.2.1 Variación del pH en sitios urbanos de Norteamérica

Comparando la variación del parámetro pH en los sitios urbanos de estudio (Figura 62), se observa que en las ciudades de Los Ángeles y Nueva York para el periodo 2003-2019, todos los eventos de precipitación fueron considerados como lluvia ácida pues sus distribuciones de variación se encuentran totalmente debajo del pH igual a 5.6.

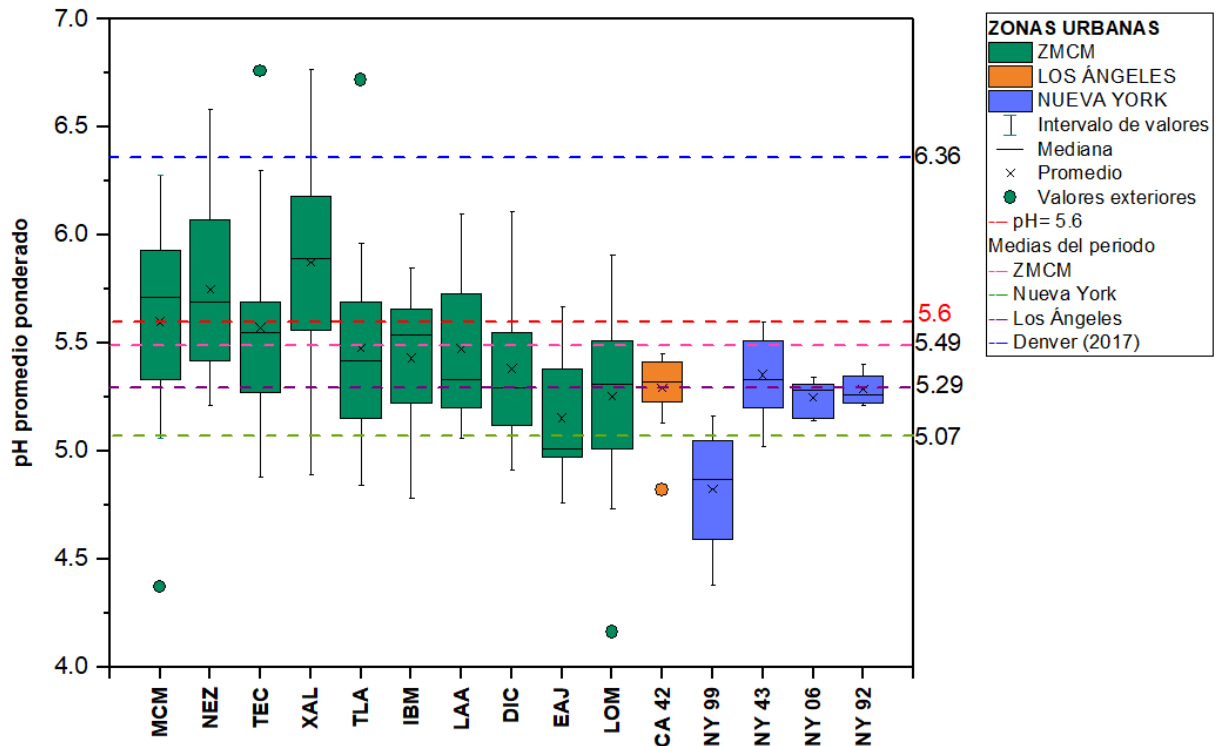


Figura 62. Variación del pH ponderado anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2019

En el caso de la ZMCM, durante el periodo 2003-2019 se presentaron eventos de lluvia tanto debajo de 5.6 como por arriba de este pH, teniendo como media de los sitios urbanos en la ZMCM un pH de 5.4 correspondiente a lluvia ácida. Con respecto a la ciudad de Nueva York y sus sitios urbanos de monitoreo la media del periodo fue de 5.07, mientras que Los Ángeles tuvo un valor de 5.29, ambos resultados presentaron un pH característico de la lluvia ácida. Por otro lado, en la zona urbana de Denver



durante los años 2016-2017 la media para los sitios urbanos instalados en la zona fue de 6.43 (Wetherbee et al., 2019), caso que no corresponde a la presencia de eventos de precipitación ácidos. Con la comparación de esta información se enuncia que la ZMCM tiene una media del pH superior a la ciudad de Los Ángeles y Nueva York, sin embargo, sus valores para estas tres zonas se encuentran por debajo de un pH de 5.6 por lo que la lluvia aún se considera como ácida, con respecto a la Zona Metropolitana de Denver, esta presenta una media superior a todas las demás zonas de estudio y además el valor correspondiente no es característico de la lluvia ácida.

Con respecto al comportamiento del pH a lo largo de los años, el análisis se dividió en dos periodos del 2003 al 2010 y del 2010 al 2019, para tener una mayor claridad en las figuras, con el mismo objetivo se eligieron sólo 4 estaciones de la ZMCM ubicadas en distintas zonas MCM al centro de la región, NEZ al noreste, IBM al noroeste y LOM al sur.

Del gráfico correspondiente al periodo 2003-2010 (Figura 63), se observa que las estaciones ubicadas en la Ciudad de Nueva York (NY99) y Los Ángeles (CA42) presentaron promedios ponderados de pH con valores inferiores a 5.6 durante todos los años, mientras que, en el caso de la ZMCM, sus promedios ponderados tuvieron distintos comportamientos, en el caso de las estaciones MCM, NEZ, e IBM, estas presentaron valores por arriba de 5.6 sobre todo en el periodo 2003-2005, en años posteriores y hasta el 2007 su pH decreció a valores menores a 5.6 dando evidencia de la presencia de lluvia ácida, con respecto a la estación LOM, esta tuvo un comportamiento más constante pues sus eventos de precipitación presentaron valores de pH característicos de lluvia ácida, a excepción del año 2008, donde se obtuvo un valor ligeramente por arriba de 5.6.

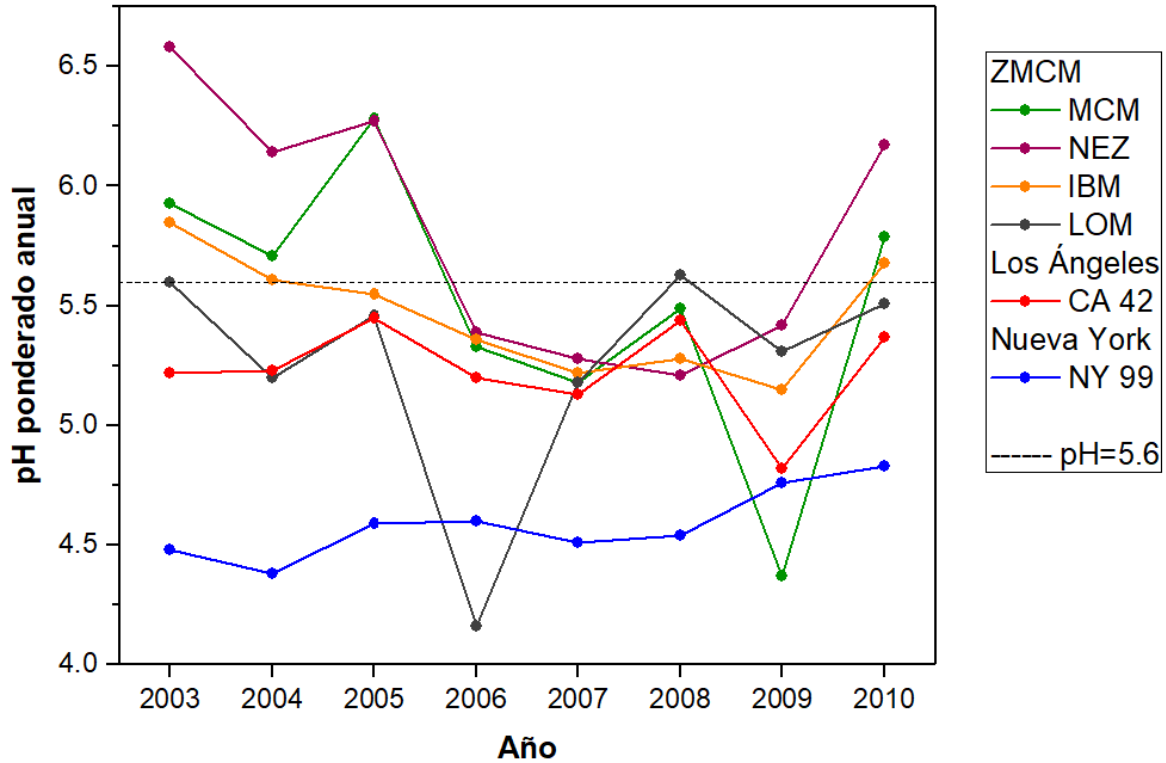


Figura 63. Variación del pH ponderado anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2010

Para la segunda parte del análisis que abarca del 2011 al 2019 (Figura 64), se obtuvo que, las estaciones de NY99 y CA99 se mantuvieron con promedio ponderados de pH inferiores a 5.6, cabe mencionar que durante el 2013 se pusieron en funcionamiento dos sitios urbanos más en la ciudad de Nueva York, con la clave NY43 y NY06, mientras que el 2014 se agregó el sitio NY92, todos estos sitios presentan la misma tendencia con pH correspondiente a lluvia ácida hasta el año 2019.

En la ZMCM, las estaciones MCM, NEZ e IBM tuvieron el mismo comportamiento que el periodo 2003-2010 presentando tendencias inestables, con promedios de pH algunos años por arriba de 5.6 y otras por debajo de este valor, en el caso de la estación LOM, esta presentó promedios debajo de 5.6 manteniendo la tendencia del periodo 2011-2019, con excepción del año 2018 dónde hubo un incremento del pH en esa estación dejando de tener características de lluvia ácida.

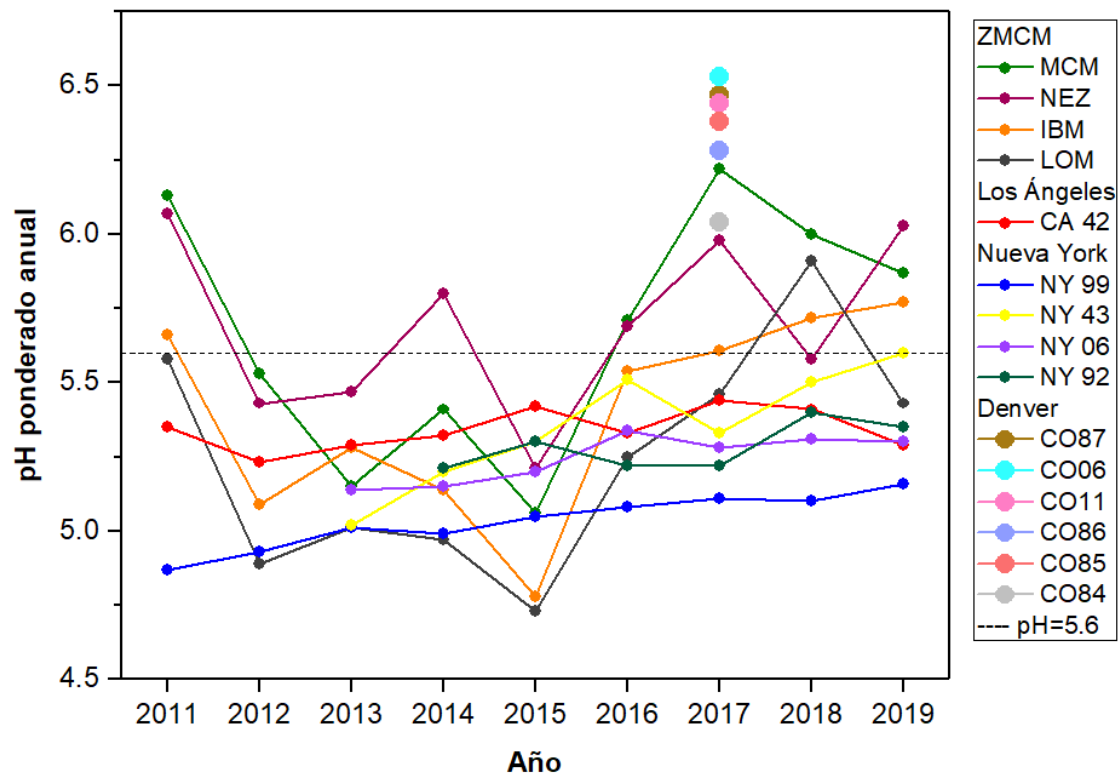


Figura 64. Variación del pH ponderado anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2011-2019

Los valores puntuales de la figura 64 correspondientes a los sitios urbanos instalados en la Zona Metropolitana de Denver, CO87, CO06, CO11 y CO86, en el año 2017, estos muestran el promedio ponderado de pH en dicho año, de dónde puede observarse que los valores obtenidos son superiores a todas las otras zonas urbanas analizadas, con un mínimo de 6.28 en la estación CO86 y un máximo de 6.53 en el sitio CO06 (Wetherbee et al., 2019).

## 5.2.2 Variación del ion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en sitios urbanos de Norteamérica

Se realizó el análisis comparativo de la variación de los promedios ponderados del  $\text{SO}_4^{2-}$  presente en el depósito atmosférico húmedo (Figura 65) de las distintas zonas urbanas de Norteamérica seleccionadas, obteniéndose que la media de la concentración de este ion para el 2003-2019 en la ciudad de los Ángeles fue de 7.63  $\mu\text{Eq/L}$ , mientras que en la ciudad de Nueva York fue superior específicamente de 15.70  $\mu\text{Eq/L}$ , sin embargo, ambos valores fueron inferiores a la media de la ZMCM, la cual fue de 66.38  $\mu\text{Eq/L}$ , este valor es equivalente a 8.69 veces el valor correspondiente a la ciudad de Los Ángeles y 4.22 de la ciudad de Nueva York. En el caso de la Zona Metropolitana de Denver, esta tuvo una media de 3.61  $\mu\text{Eq/L}$  (Wetherbee et al., 2019) en los sitios urbanos instalados durante el año 2017.

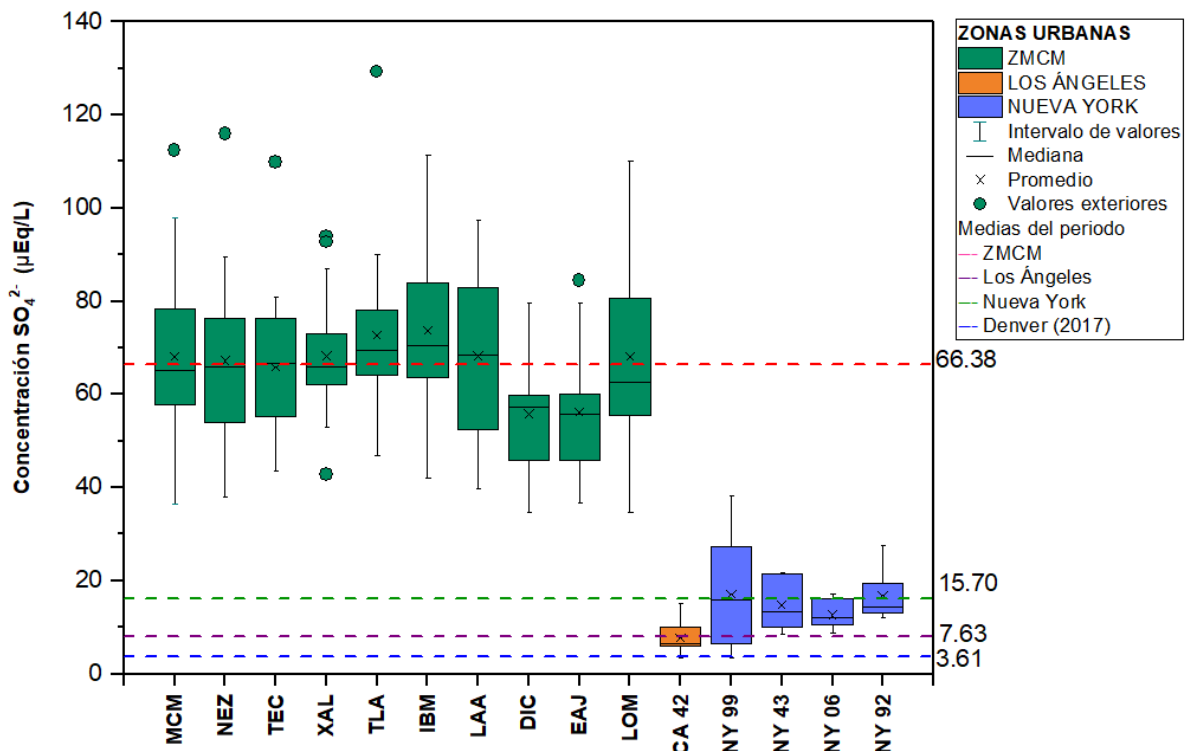
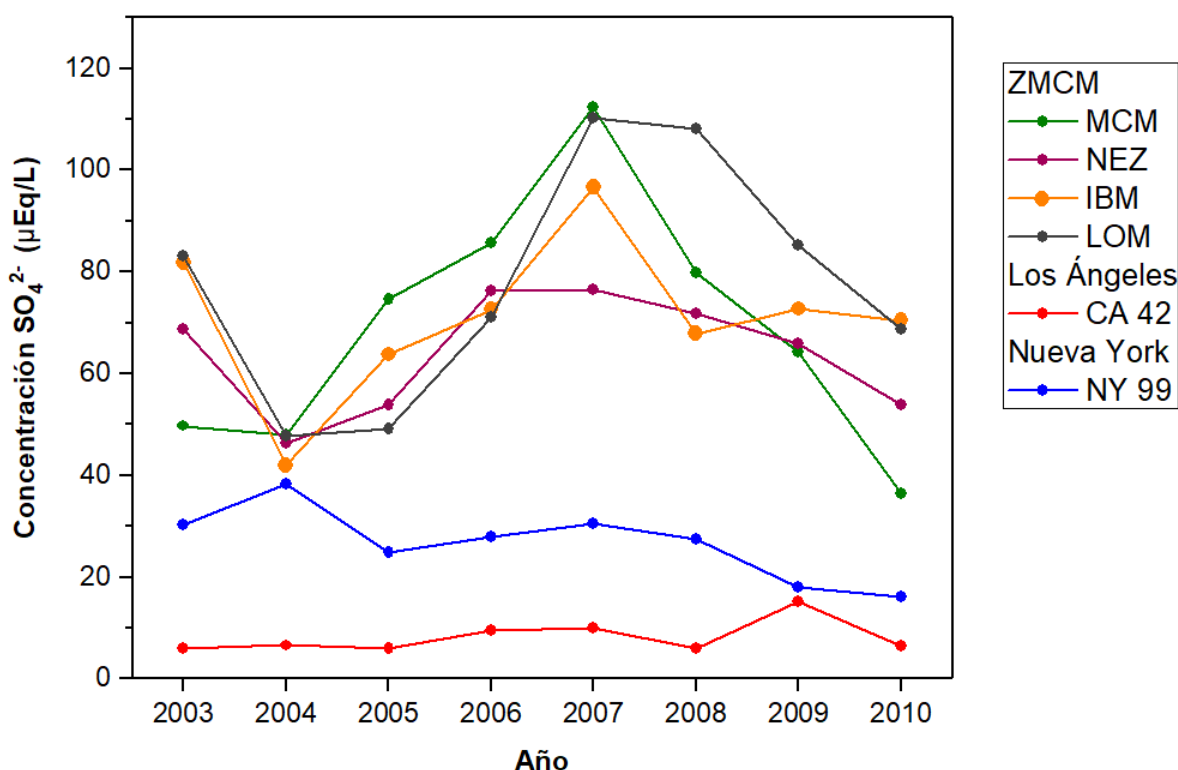


Figura 65. Variación de la concentración  $\text{SO}_4^{2-}$  anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2019

Lo anterior puede observarse con mayor claridad en el siguiente gráfico (Figura 66) dónde se hizo el análisis por año del promedio ponderado de la concentración del ion  $\text{SO}_4^{2-}$  en las estaciones seleccionadas, confirmándose así que, durante el periodo 2003-2010 los valores ponderados del  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron mayores en la ZMCM, superando en los años 2007 y 2008 los 100  $\mu\text{Eq/L}$  en las estaciones MCM y LOM, mientras que en la estación de Nueva York NY99, el máximo del periodo 2003-2010 fue en el año 2004 dónde se alcanzaron 38.29  $\mu\text{Eq/L}$ , con respecto al sitio CA42 de Los Ángeles, este tuvo un notorio incremento en el año 2009 llegando a los 15.20  $\mu\text{Eq/L}$ .



*Figura 66. Variación de la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2010*

En el análisis del 2011 al 2019 (Figura 67), se continuó observando la gran diferencia entre los promedios ponderados del  $\text{SO}_4^{2-}$  de la ZMCM con respecto a la Ciudad de los Ángeles y Nueva York, para las cuales se observa una clara tendencia de decrecimiento en sus concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  incluso en los sitios instalados en los años 2013 y

2014 (NY43, NY06 Y NY92), mientras que, en la ZMCM no hay una tendencia clara pues las concentraciones presentan distintas variaciones, lo que sí se puede afirmar es que se corrobora el argumento de que las estaciones de la zona norte (NEZ e IBM) de la ZMCM tienden a presentar concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  más altas que las ubicadas al sur (LOM), esto por lo que se ha comentado con anterioridad, correspondiente a la cercanía que existe al norte de la ZMCM con zonas industriales importantes dónde se utilizan combustibles con alto porcentaje de azufre.

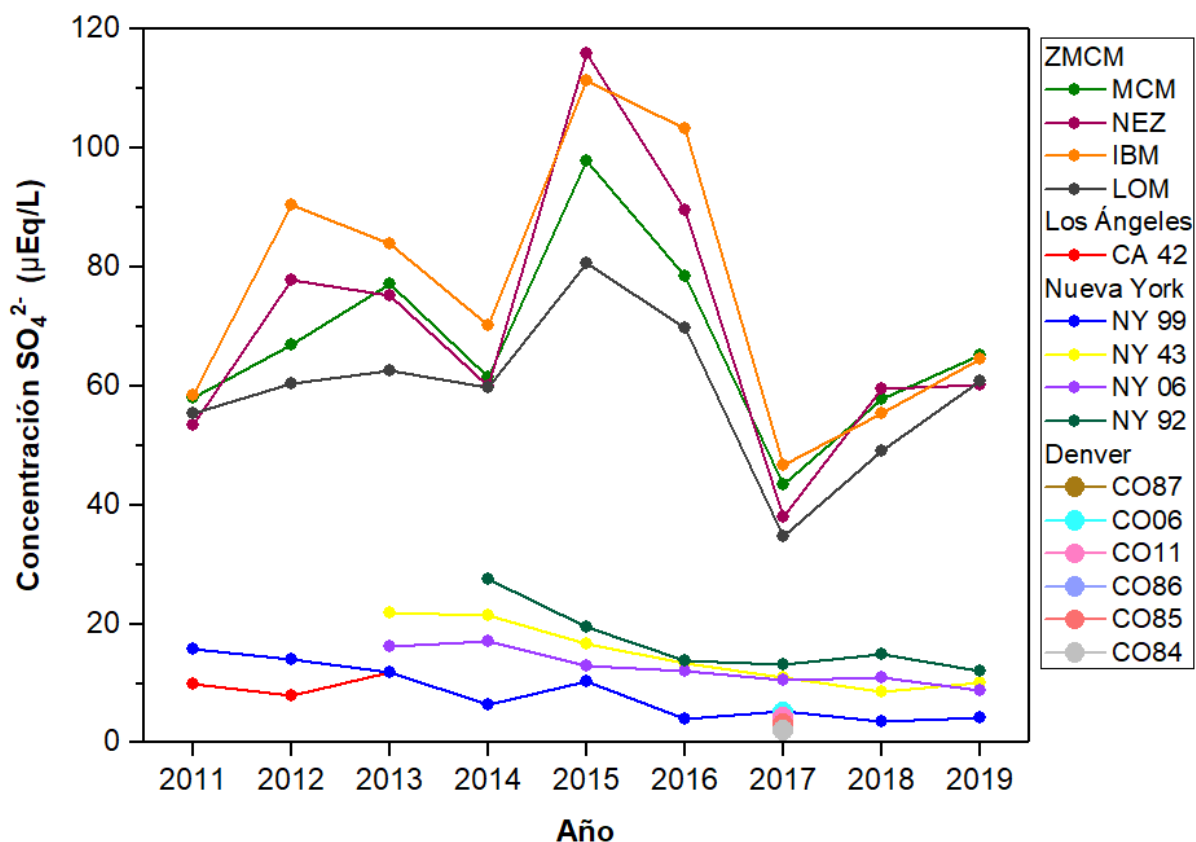


Figura 67. Variación de la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2011-2019

Por otro lado, en la Zona Metropolitana de Denver se obtuvieron valores puntales durante el 2017 con un mínimo en el sitio CO84 de 2.11  $\mu\text{Eq/L}$  y un máximo en CO06 de 5.22  $\mu\text{Eq/L}$ . Refiriéndose a porcentajes de disminución de la presencia del  $\text{SO}_4^{2-}$  en el depósito atmosférico húmedo de las distintas zonas de estudio, resulta que en la

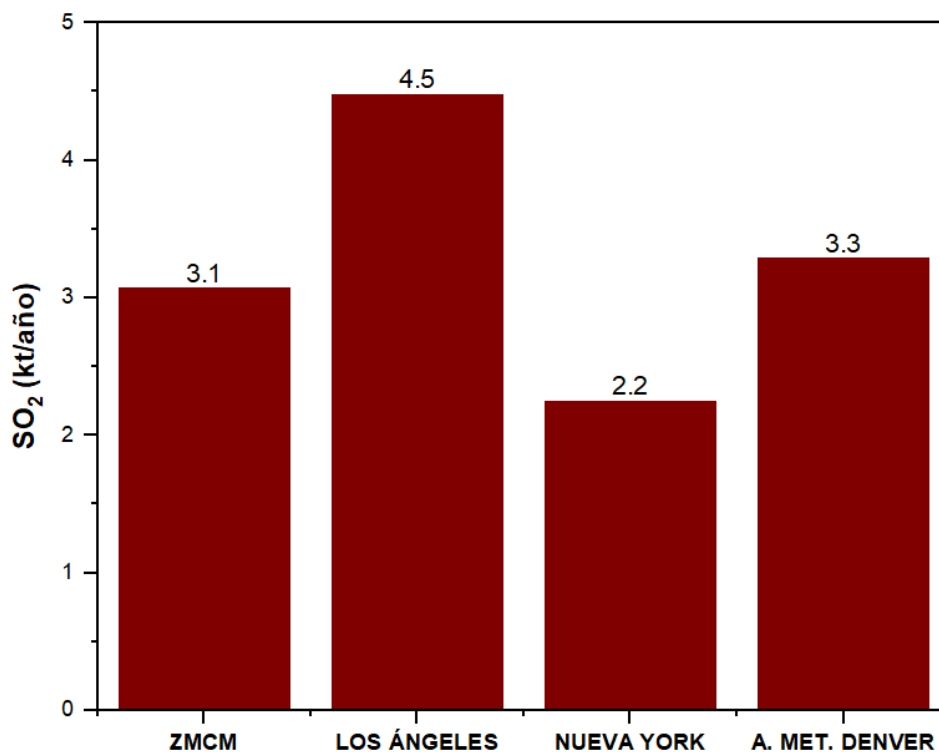
ZMCM hubo un porcentaje de disminución del 11% desde el año 2003 al 2019, mientras que el caso de Nueva York y California hubo una reducción del 27.64% y 70.89% respectivamente.

Como ya se observó en el análisis anterior la ZMCM, tiene concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  superiores a todas las demás ciudades de Norteamérica analizadas, sin embargo, según el inventario de emisiones de la EPA 2017, la ciudad de Los Ángeles presenta el mayor número de emisiones de  $\text{SO}_2$  (4.5 kt/año) (Figura 68), debido principalmente a la presencia del Aeropuerto Internacional de Los Ángeles y las 2 principales refinerías pertenecientes a Tesoro Refining And Marketing Company Llc.

El segundo lugar de las emisiones de  $\text{SO}_2$  se encuentra el área Metropolitana de Denver con 3.3 kt/año provenientes principalmente de las centrales de generación de energía Cherokee y Valmont, además de la refinería perteneciente a la empresa Suncor Energy, seguido se encuentra la ZMCM con un total de emisiones de 3.1 kt/año y finalmente la ciudad de Nueva York, con 2.2 kt/año provenientes en mayor proporción del Aeropuerto Internacional John F. Kennedy y de las centrales generadoras de energía Ravenswood Generating Station y Con Ed-East River Generating Station (SEDEMA, 2021; US EPA, 2020).

El hecho que, aunque la ZMCM no tenga el mayor número de emisiones de  $\text{SO}_2$  pero si las contrataciones anuales ponderadas de  $\text{SO}_4^{2-}$  más elevadas en sitios urbanos que las otras zonas de comparación se justifica mediante la existencia del corredor industrial Tula-Vito Apasco donde la refinería, central eléctrica y otras grandes industrias, ubicadas en las afueras al norte de la ZMCM, consumen combustibles con alto contenido de azufre de hasta 4% en peso (Sosa et al., 2020). Este corredor industrial emite aproximadamente 139,166 ton/año de  $\text{SO}_2$  (SEDEMA et al., 2021) y parte de este contaminante es arrastrado tanto como  $\text{SO}_2$  como  $\text{SO}_4^{2-}$  hacia la ZMCM debido a la dirección del viento, lo que representa un gran problema en el aumento de las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el depósito atmosférico húmedo de la ZMCM.

Estas altas cantidades de emisión de  $\text{SO}_2$  provenientes de la zona industrial al norte exterior a la ZMCM no están consideradas en el inventario de emisiones de la SEDEMA.



*Figura 68. Emisiones anuales de SO<sub>2</sub> en ciudades de Norteamérica de estudio ZMCM 2018, EPA 2017 (SEDEMA, 2021; US EPA, 2020)*

En el caso de las ciudades de Norteamérica de los Estados Unidos estas tienen menores emisiones de SO<sub>2</sub> debido a que la mayoría de las unidades generadoras de electricidad utilizan como alternativa el cambio de combustible, en lugar de instalar controles de emisiones de SO<sub>2</sub>, como una estrategia común de cumplimiento de la regla federal interestatal de aire limpio para la lluvia ácida, de hecho en el año 2013, la Administración de Información de Energía de los Estados Unidos informó que las emisiones de SO<sub>2</sub> del sector de la energía eléctrica en 2012 disminuyeron debido a un aumento en el número de modernizaciones de centrales eléctricas de carbón con el cambio de combustible a carbón con bajo contenido de azufre (1% en peso aproximadamente) y gas natural (EIA, 2022; Sosa et al., 2020).



### 5.2.3 Variación del ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en sitios urbanos de Norteamérica

Como resultado del análisis realizado para la comparación de la variación del promedio ponderado de la concentración del  $\text{NO}_3^-$  del año 2003 a 2019 (Figura 69), se obtuvo que la media de este ion en la ciudad de Los Ángeles fue de  $11.68 \mu\text{Eq/L}$ , mientras que en Nueva York tuvo un valor de  $15.03 \mu\text{Eq/L}$ , ambos valores fueron menores a la media obtenida en la ZMCM para sitios urbanos, la cual fue de  $45.73 \mu\text{Eq/L}$ , lo que representa 3.91 veces el valor de la media de los Ángeles y 3.04 veces la de Nueva York. En la Zona Metropolitana de Denver durante el 2017 la media de la concentración del ion nitrato fue de  $24.52 \mu\text{Eq/L}$  (Wetherbee et al., 2019), valor superior a lo obtenido en la ciudad de Los Ángeles y Nueva York, pero menor que en la ZMCM.

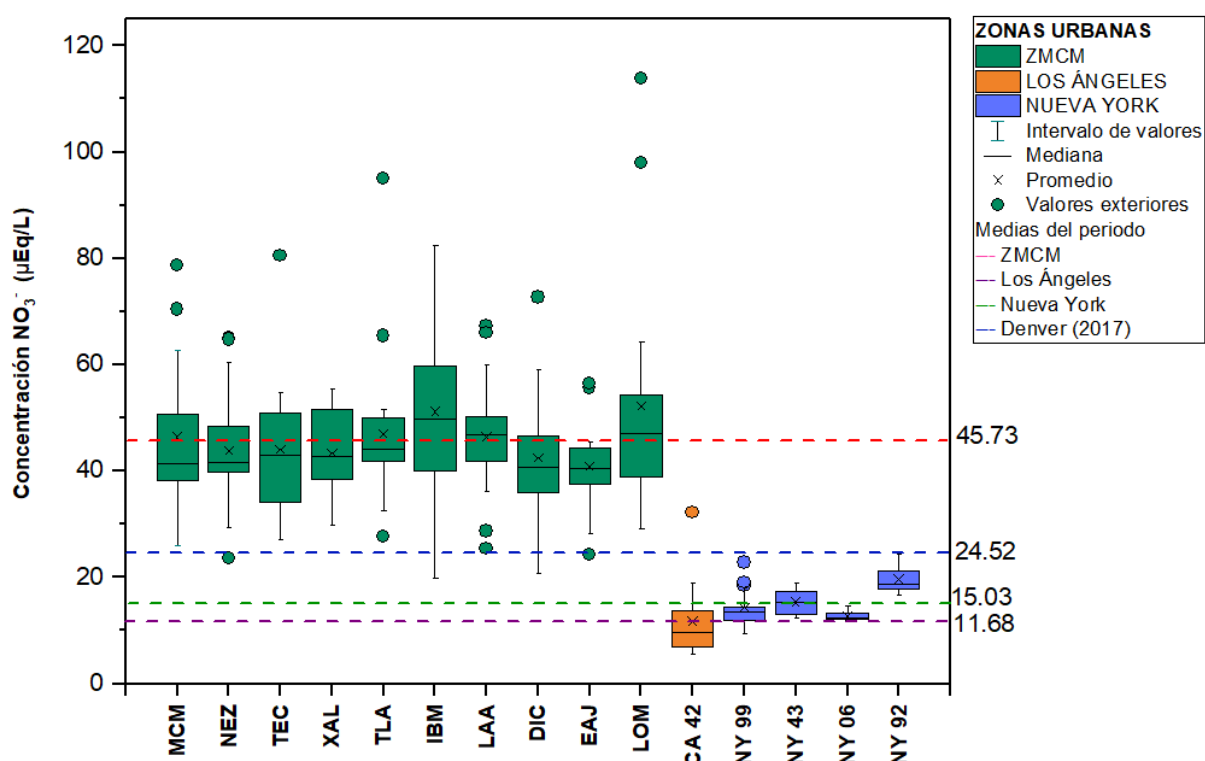


Figura 69. Variación de la concentración  $\text{NO}_3^-$  del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2019

Lo anterior mencionado hace sentido, pues las concentraciones ponderadas de  $\text{NO}_3^-$  más altas se encuentran en los sitios urbanos de la ZMCM, además en la figura 70 que representa la variación del promedio ponderado a través de los años 2003-2010 del  $\text{NO}_3^-$ , evidencia la superioridad de las concentraciones en la ZMCM con respecto a las ciudades de Los Ángeles y Nueva York, sobre todo en el año 2007 dónde se tuvo un incremento notable particularmente en la estación LOM ubicada al sur de la región, dónde se alcanzó un valor de  $113.87 \mu\text{Eq/L}$ , posterior a ese año se observó un decrecimiento en las concentraciones de dicha estación.

En el caso del sitio CA42 de Los Ángeles, se observó un crecimiento de la concentración de  $\text{NO}_3^-$  en el año 2009, posterior a ello en el 2010 hubo una disminución en el valor de las concentraciones, mientras que en el sitio NY99 de Nueva York durante el 2003-2010 su comportamiento tuvo variaciones de entre  $11.47$  y  $22.76 \mu\text{Eq/L}$  de  $\text{NO}_3^-$ .

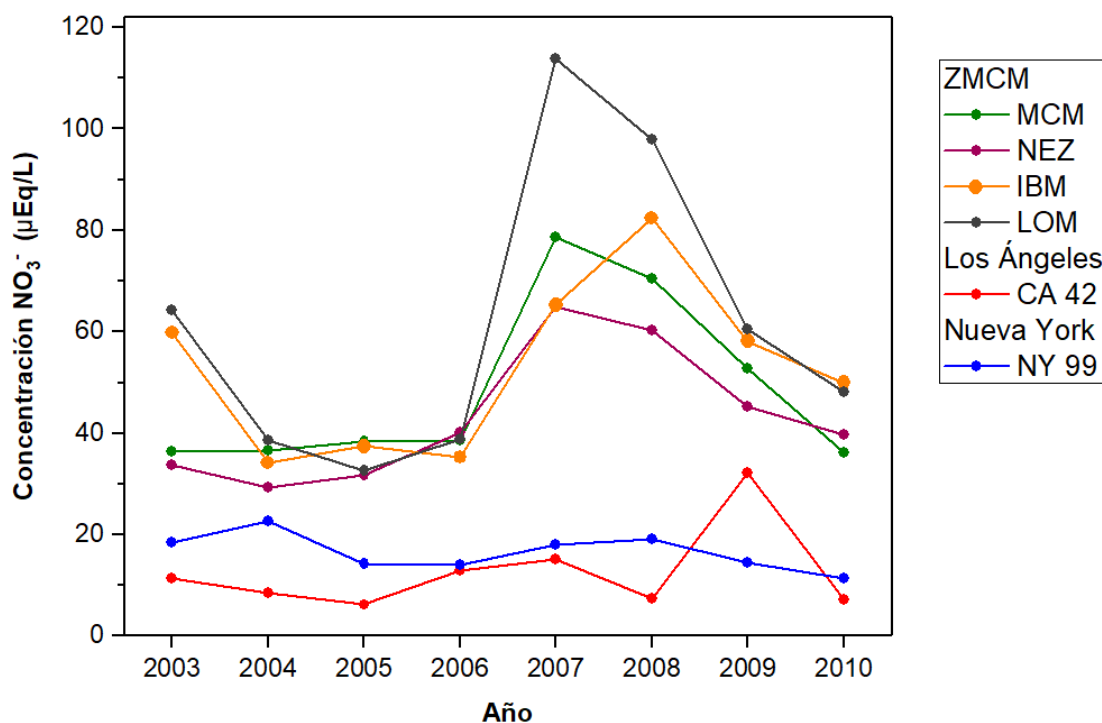


Figura 70. Variación de la concentración de  $\text{NO}_3^-$  anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2010

Del año 2011 al 2019 (Figura 71), los promedios ponderados de las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en la ZMCM siguieron siendo superiores a los otros sitios de Norteamérica. Se observó un pronunciado incremento en los sitios de la ZMCM, durante el año 2015, teniendo valores máximos sobre todo en la estación IBM ubicada en la zona norte de la ZMCM. Durante el 2013 se pusieron en operación los sitios NY43 y NY 06 y un año después el sitio NY92, en Nueva York, dónde incluyendo al sitio NY99, las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en esta ciudad del 2011 al 2019 estuvieron en un rango de 9.32 a 24.38  $\mu\text{Eq/L}$ . En el caso de Denver para el año 2017 se obtuvieron valores de entre 19.17 y 28.16  $\mu\text{Eq/L}$  (Wetherbee et al., 2019), este rango de valores se asemeja mucho a los valores obtenidos durante el mismo año en la ZMCM.

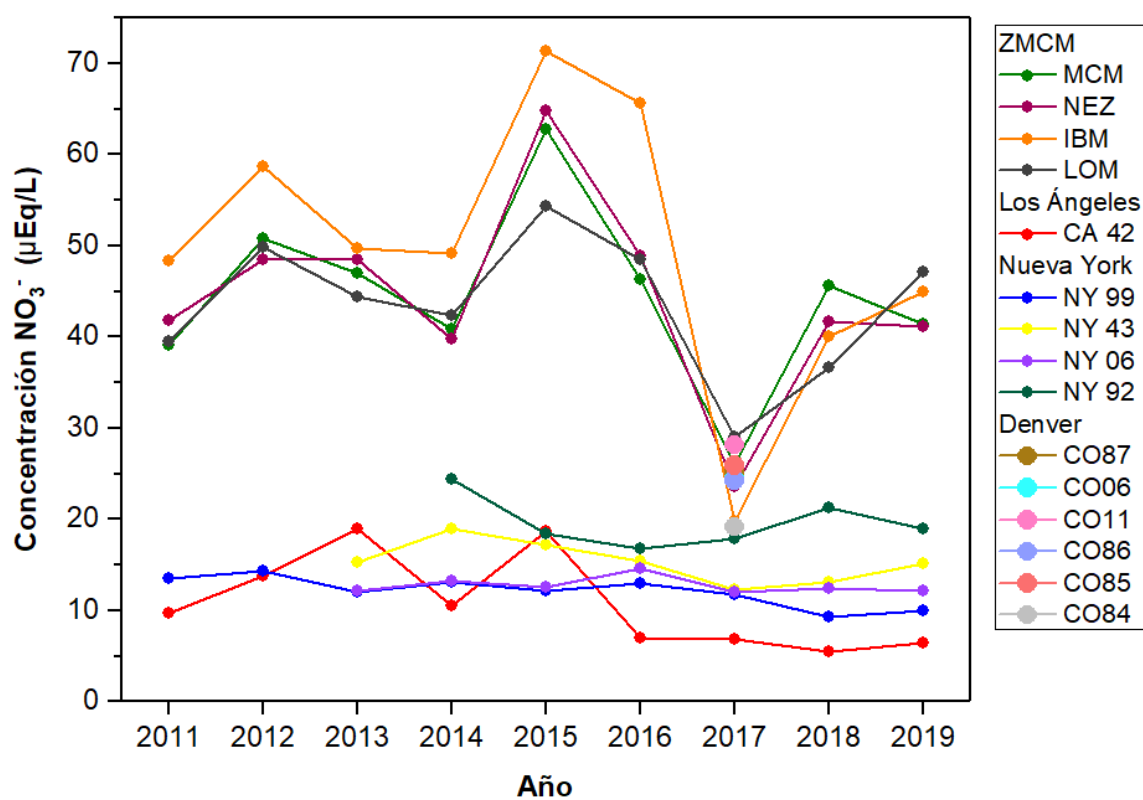


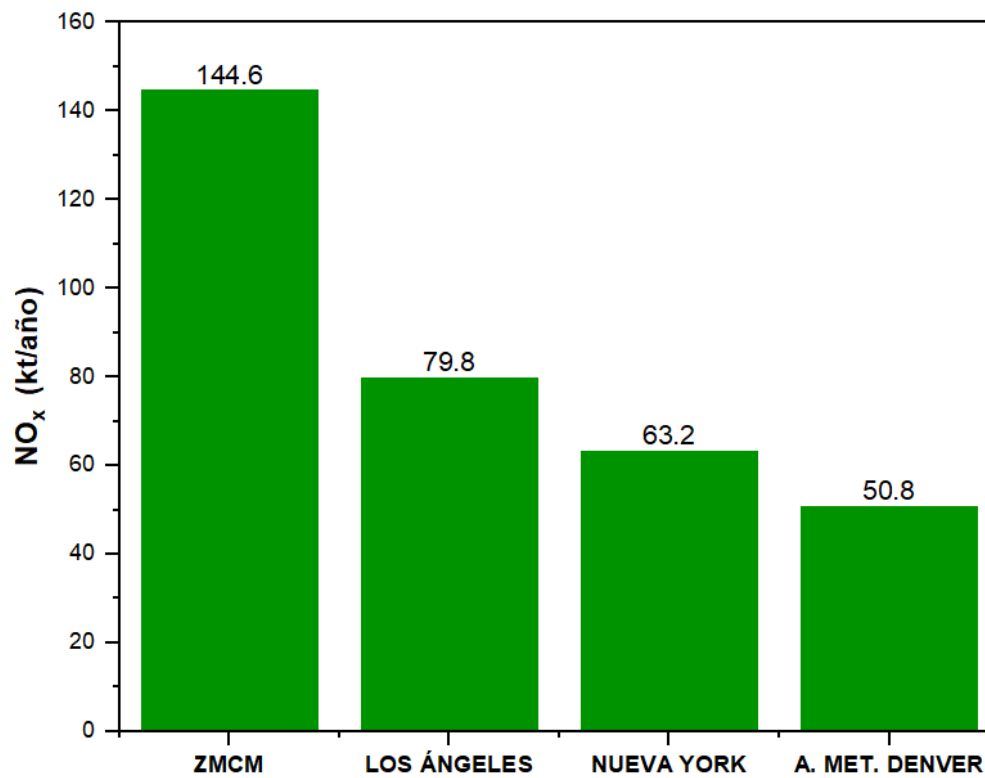
Figura 71. Variación de la concentración de  $\text{NO}_3^-$  anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2011-2019

En el caso de la ZMCM hubo un aumento en la media del promedio ponderado de la concentración de  $\text{NO}_3^-$  del 2003 al 2019 en sitios urbanos. En el año 2003 la media fue de 41.49  $\mu\text{Eq/L}$  y en 2019 tuvo un valor de 42.74  $\mu\text{Eq/L}$  lo que representa un aumento del 3.01%, este comportamiento puede asociarse a que, aunque se han tomado medidas para la disminución de las emisiones de  $\text{NO}_x$  en la ZMCM, estas no han alcanzado una efectividad importante, esto debido a que la principal fuente de  $\text{NO}_x$  son las fuentes móviles y que el número de vehículos en la zona ha estado en constante crecimiento.

En 2003 el parque vehicular según el Programa de Verificación Vehicular Obligatorio en la ZMCM fue de 3,208,138 vehículos, mientras que para el 2019 se alcanzó un total de 6,000,000 millones de vehículos, esto sin contar motocicletas y vehículos con placa federal, (SEDEMA, 2004, 2021) lo que ha llevado a no lograr una disminución de las emisiones de  $\text{NO}_x$  precursor del  $\text{NO}_3^-$ .

Por otro lado, en Nueva York, la media del año 2003 del  $\text{NO}_3^-$  en el depósito atmosférico húmedo fue de 18.35  $\mu\text{Eq/L}$ , mientras que para el 2019 decreció a 14.08  $\mu\text{Eq/L}$ , hubo un porcentaje de reducción del 23.26%, en la ciudad de Los Ángeles, esta reducción fue de 43.32%, pues en 2003 la concentración registrada era de 11.45 y en 2019 disminuyó a 6.49  $\mu\text{Eq/L}$  de  $\text{NO}_3^-$ .

Una menor presencia de  $\text{NO}_3^-$  en el depósito atmosférico de las zonas de Los Ángeles y Nueva York con respecto a la ZMCM, está directamente asociada con las emisiones de  $\text{NO}_x$  en las distintas áreas de estudio. En la figura 72 se observa que la ZMCM es la zona de estudio con el mayor número de emisiones de  $\text{NO}_x$ , seguida de Los Ángeles, Nueva York y el Área Metropolitana de Denver, lo que lleva a que haya mayor presencia de  $\text{NO}_3^-$  en la ZMCM, debido a sus altas emisiones de  $\text{NO}_x$ .



*Figura 72. Emisiones anuales de NO<sub>x</sub> en ciudades de Norteamérica de estudio ZMCM 2018, EPA 2017 (SEDEMA, 2021; US EPA, 2020)*

### 5.2.4 Variación de la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ en sitios urbanos de Norteamérica

Anteriormente, en este trabajo se ha hablado de la importancia que tiene la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  como indicador del ion que contribuye en mayor proporción a la acidez del depósito atmosférico húmedo, en este caso se calcularon los promedios ponderados de la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  para cada año del 2003 al 2019, en cada sitio urbano de estudio, de ello se obtuvo que la media de esta relación en la ZMCM tiene un valor de 1.47, superior a las ciudades de Los Ángeles, Nueva York y el Área Metropolitana de Denver.

La relación obtenida para la ZMCM (Figura 73), indica predominancia de  $\text{SO}_4^{2-}$  y por ende la acidez del depósito atmosférico húmedo en esta zona de estudio está influenciada principalmente por la presencia de este ion. En el caso de Nueva York, esta presenta el mismo comportamiento que la ZMCM, al tener un valor de la media en la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  mayor a 1, cuyo valor específico para el periodo 2003-2019 fue de 1.04.

En la ciudad de Los Ángeles, la media del periodo fue de 0.70 y para los sitios urbanos instalados en el Área Metropolitana de Denver durante el año la media fue 0.15 (Wetherbee et al., 2019), ambas ciudades tienen valores de la media inferiores a 1 lo que significa que en estos casos la acidez del depósito atmosférico húmedo en esas zonas se debe principalmente a la presencia del  $\text{NO}_3^-$ , la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  ha sido un indicador importante en los Estados Unidos sobre la efectividad de estrategias de reducción de emisiones de los contaminantes precursores de la lluvia ácida (Lehmann et al., 2015).

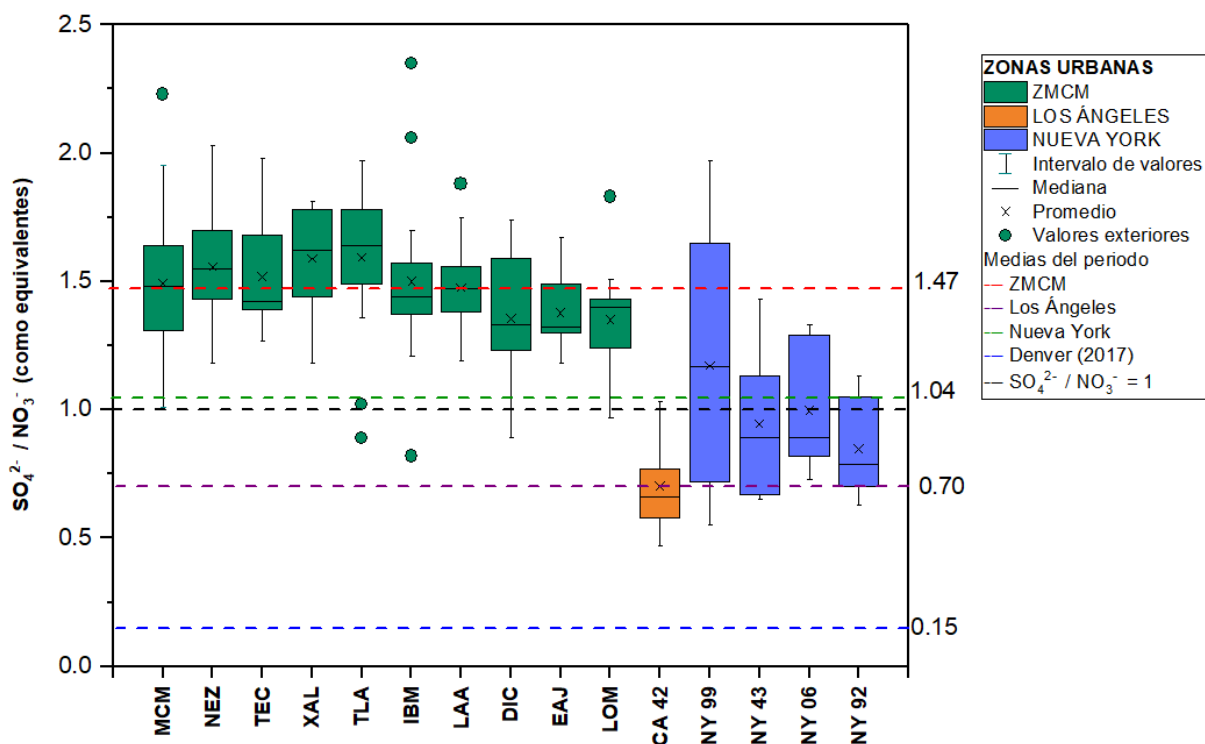


Figura 73. Variación de la relación  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2019

De acuerdo con el análisis realizado por años para los sitios urbanos elegidos en la Figura 74, se puede observar que del año 2003 al 2010 las estaciones de la ZMCM superaron el valor de 1 en la relación  $SO_4^{2-}/NO_3^-$ , a excepción de la estación LOM en el año 2007 e IBM en el año 2008, que obtuvieron un valor menor a 1. En el caso de Nueva York, se observó que del 2003 al 2010 se mantuvo un comportamiento en la relación superior a 1, mientras que en el sitio de Los Ángeles la relación se mantuvo por debajo de 1 durante el mismo periodo, lo que indica mayor contribución de acidez al depósito atmosférico húmedo por parte del  $SO_4^{2-}$  en Nueva York, y del  $NO_3^-$  en Los Ángeles del 2003 al 2010.

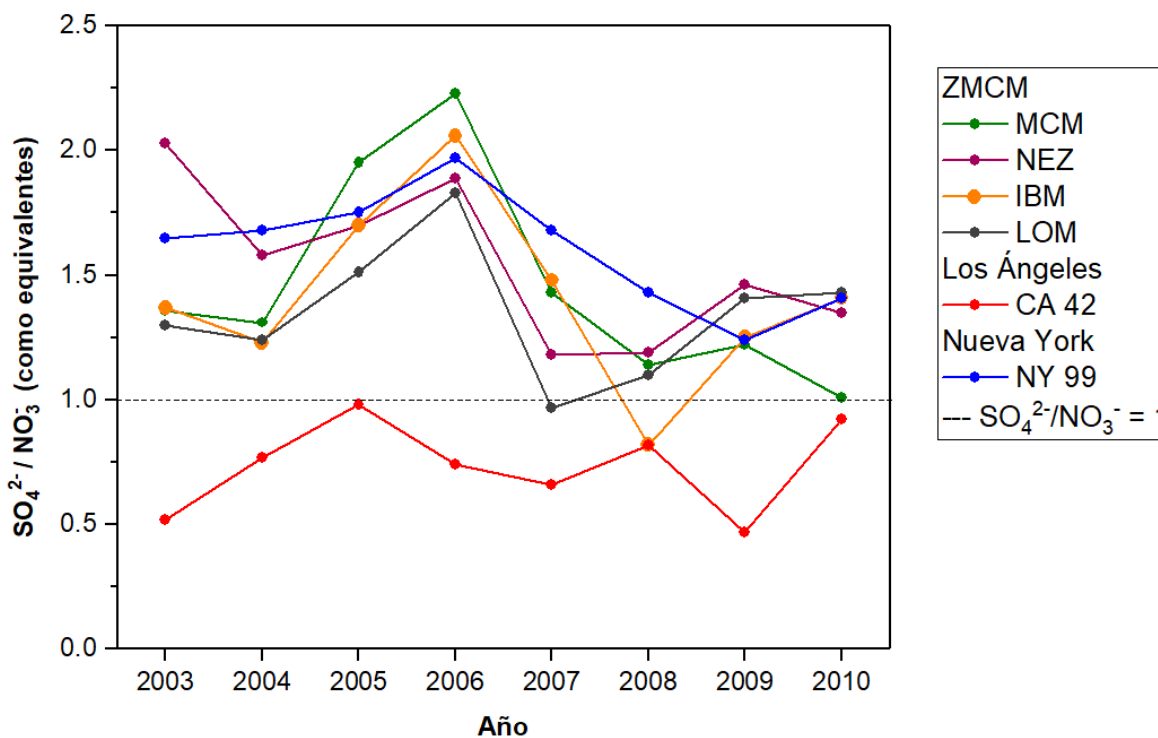


Figura 74. Variación de la relación  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2010

Durante el periodo 2011-2019 (Figura 75) todas las estaciones de la ZMCM mantuvieron el comportamiento de la relación  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  superior a 1, en el caso de Nueva York específicamente en el sitio NY99 que había presentado valores mayores a 1 del 2003 al 2010, hubo un decrecimiento a partir del 2011, siendo en 2012 cuando sus valores lograron disminuir por debajo de 1 manteniendo la tendencia hasta el 2019, por otro lado, en los sitios NY43, NY06 y NY92 puestos en operación en años posteriores al 2003, se obtuvieron relaciones por debajo del 1 en los tres sitios a partir del año 2016.



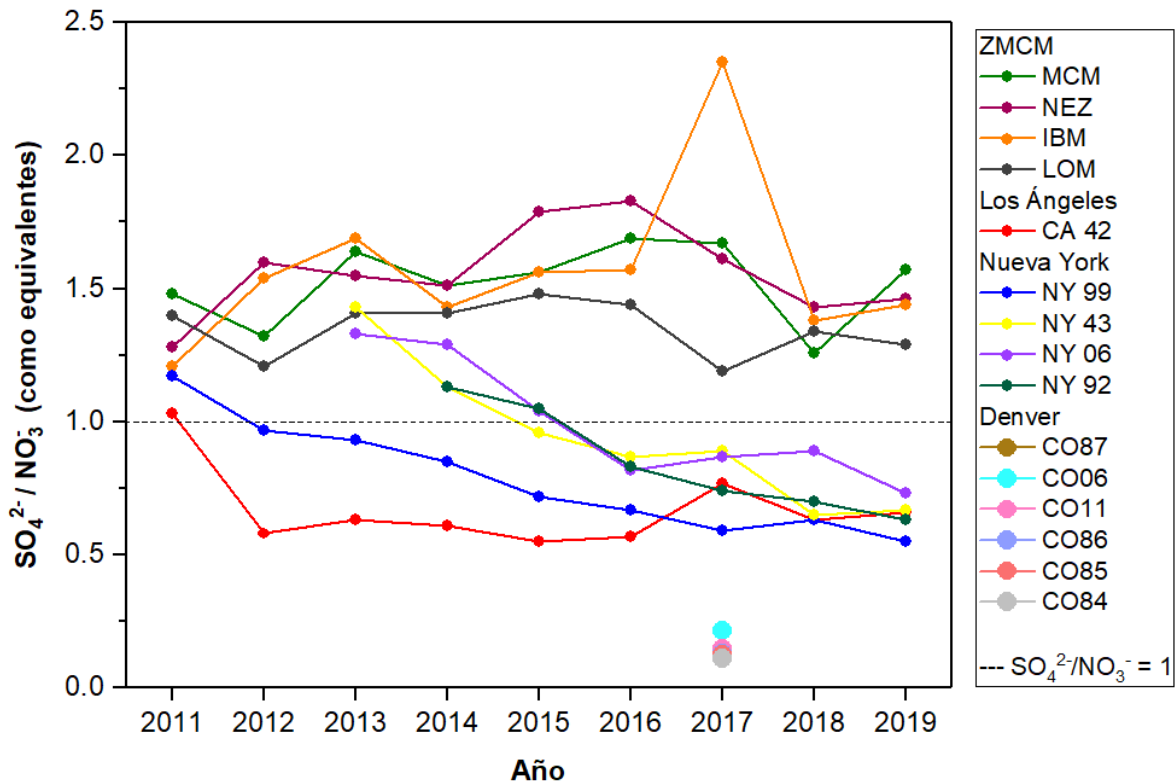


Figura 75. Variación de la relación  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2011-2019

En Los Ángeles, California, durante el 2011 se tuvo un ligero aumento de la relación por encima de 1, sin embargo, posterior a ello se recuperó la tendencia de valores menores a 1 a partir del 2012 y hasta el último año de estudio, 2019. Para los sitios CO87, CO06, CO11, CO86, CO85 y CO84, que se ubicaron en la zona urbana del Área Metropolitana de Denver durante el 2017, se obtuvieron valores debajo incluso de una relación de 0.5, esto indicó mayor influencia del  $NO_3^-$  en el depósito atmosférico húmedo de esa zona.

### 5.2.5 Variación del ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en sitios urbanos de Norteamérica

El análisis realizado para la comparación de los promedios ponderados de las concentraciones del ion amonio en las zonas urbanas de estudio de este proyecto dio como resultado que la media en las estaciones de la ZMCM situadas en zonas urbanas es de  $94.32 \mu\text{Eq/L}$ , seguida de la media para el 2017 en los sitios urbanos de Denver la cual fue de  $62.03 \mu\text{Eq/L}$  (Wetherbee et al., 2019), en el caso de Nueva York y Los Ángeles, estos presentaron medias con valores más bajos, específicamente de  $17.02$  y  $12.13 \mu\text{Eq/L}$ , respectivamente (Figura 76).

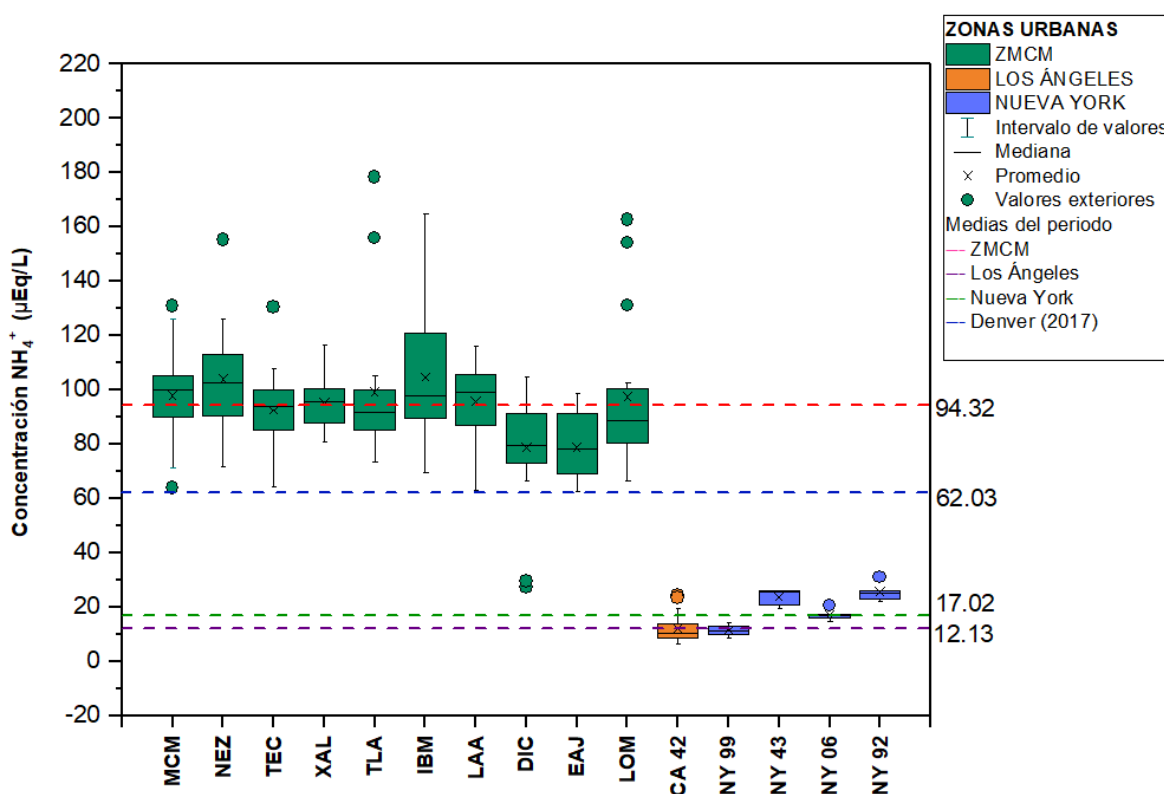
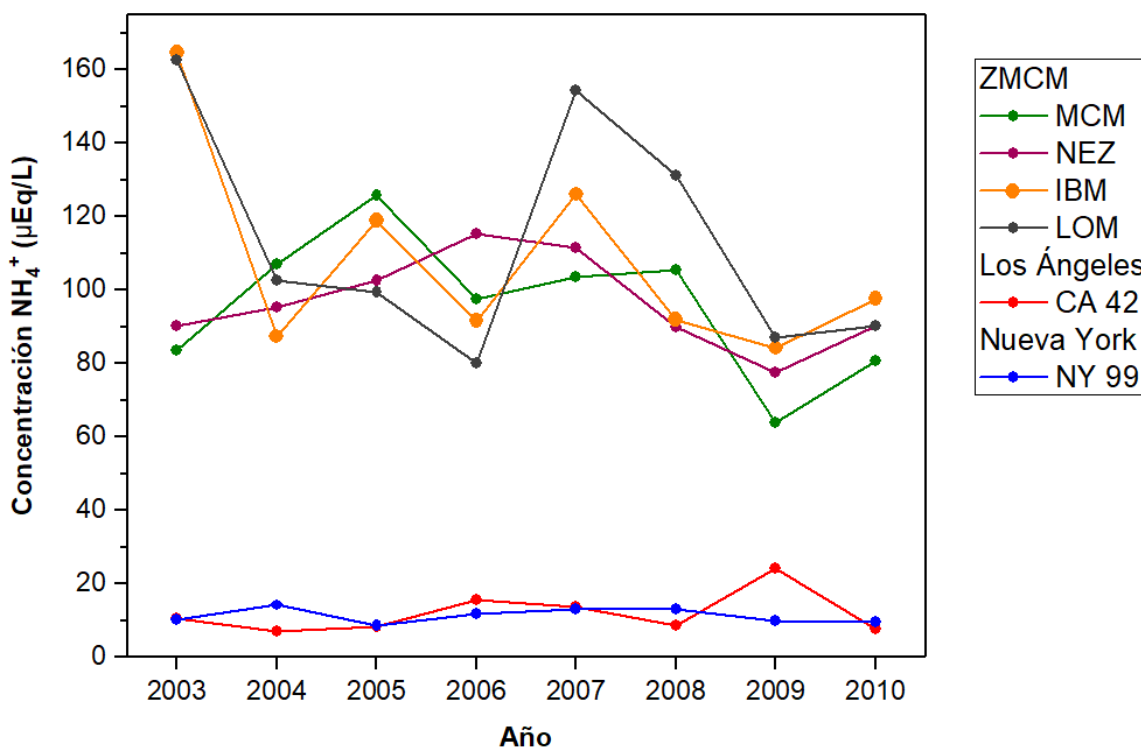


Figura 76. Variación de la concentración de  $\text{NH}_4^+$  del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2019

En el estudio del comportamiento de la concentración de  $\text{NH}_4^+$ , por año del 2003 al 2019, se observa que como sucedió con la media, los valores de las concentraciones ponderadas en la ZMCM son superiores a los demás sitios. Del 2003 al 2010 (Figura

77) se observó un comportamiento con crecimientos y decrecimientos constantes, el punto máximo se obtuvo en las estaciones IBM y LOM en el año 2003 sobrepasando una concentración de 160  $\mu\text{Eq/L}$ , mientras que en el sitio CA42 de Los Ángeles y NY99 en Nueva York, mantuvieron concentraciones de entre 6.29 y 31.01  $\mu\text{Eq/L}$  de  $\text{NH}_4^+$ .



*Figura 77. Variación de la concentración de  $\text{NH}_4^+$  anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2010*

Del 2011 al 2019, mostrado en la figura 78, la ZMCM tuvo un notorio crecimiento en las concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  en el depósito atmosférico húmedo de las estaciones urbanas de la REDDA, alcanzando un máximo en la estación NEZ de 94.44  $\mu\text{Eq/L}$  en el 2015 y posterior a ello un decrecimiento mínimo en el año 2017 en la estación LOM la cual presentó un valor de 66.47  $\mu\text{Eq/L}$  de  $\text{NH}_4^+$ , posterior a este año y hasta el 2019, los sitios urbanos de la ZMCM, presentaron un incremento en las concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  en el depósito atmosférico húmedo.

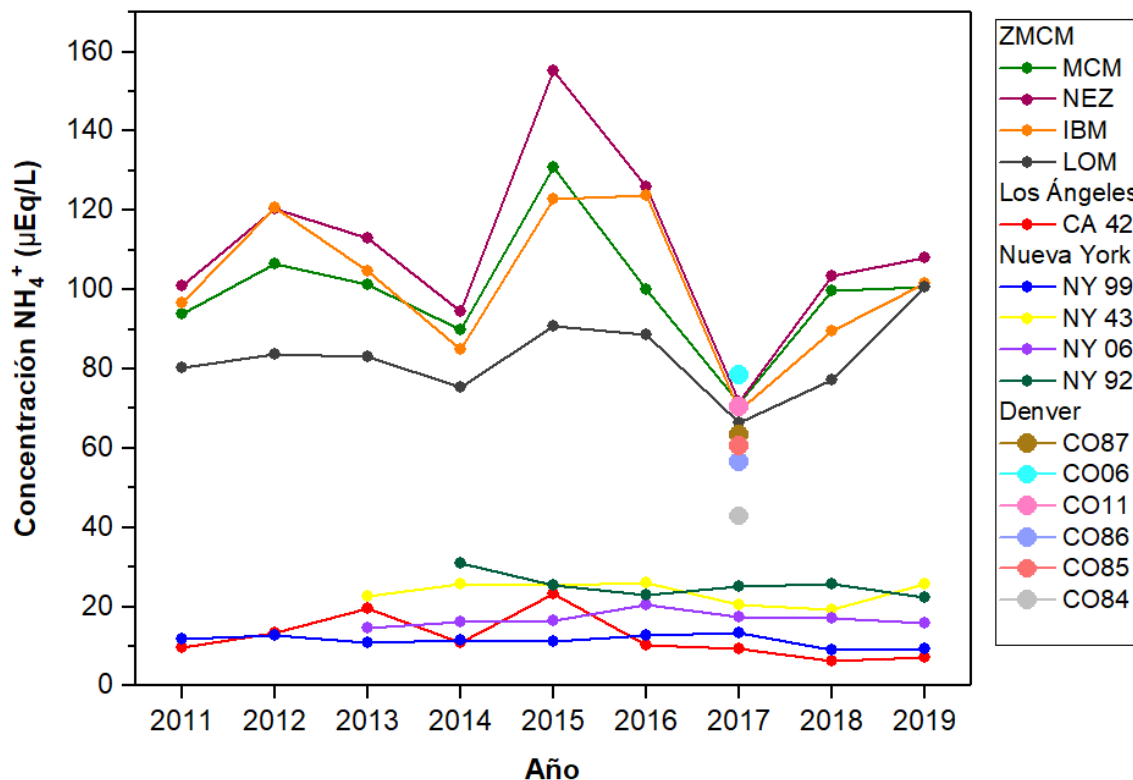
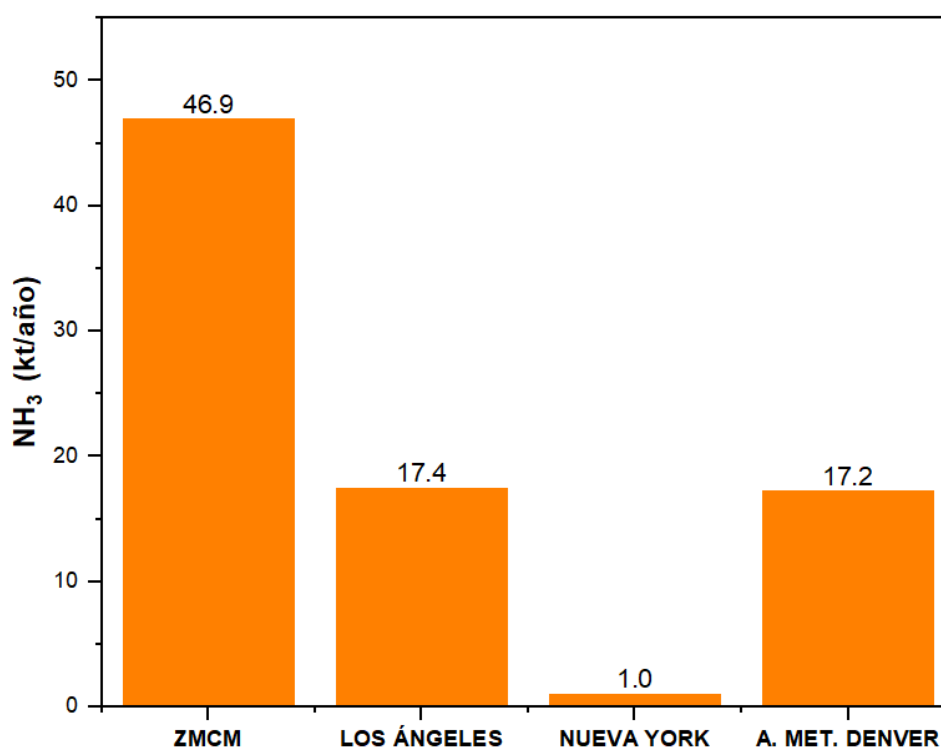


Figura 78. Variación de la concentración de  $\text{NH}_4^+$  anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2011-2019

En Nueva York, particularmente en el sitio NY99 se observó una pequeña reducción de  $\text{NH}_4^+$  desde el 2011 con ligeros incrementos principalmente en los años 2012, 2016 y 2017. Para los sitios NY99 y NY06, puestos en operación durante el año 2013, se observaron pequeños incrementos en las concentraciones de este ion desde el 2013 hasta el 2019. Con respecto al sitio CA42 de Los Ángeles hubo una ligera disminución en las concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  desde el valor presentado en 2003 hasta el 2019, por último, en Denver como ya se ha comentado anteriormente existen valores puntuales de las concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  en el 2017 dónde el valor mínimo se obtuvo en el sitio CO84 y el máximo en CO06 con 42.83 y 78.38  $\mu\text{Eq/L}$  respectivamente (Wetherbee et al., 2019).

El hecho de que la ZMCM tenga la media más alta de la concentración de  $\text{NH}_4^+$  para el periodo 2003-2019 de los sitios urbanos de este estudio se atribuye principalmente a que este ion se forma debido a que el contaminante gaseoso amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) presente en la atmósfera es altamente reactivo, causando la formación de sales de  $\text{NH}_4^+$  presentes en la precipitación (Lajtha et al., 2013), por lo cual al tener la ZMCM mayores emisiones de  $\text{NH}_3$  con respecto a las ciudades de Los Ángeles, Nueva York y el área Metropolitana de Denver (Figura 79), hay mayor formación de  $\text{NH}_4^+$  y por ende mayor presencia en el depósito atmosférico húmedo de la zona.



*Figura 79. Emisiones anuales de  $\text{NH}_3$  en ciudades de Norteamérica de estudio, ZMCM 2018, EPA 2017 (SEDEMA, 2021; US EPA, 2020)*

Además, se debe considerar la influencia de zonas aledañas a la ZMCM sobre todo al norte, dónde se emite  $\text{NH}_3$  desde fuentes agrícolas, con contribuciones menores provenientes del tratamiento del agua, el manejo y tratamiento de residuos sólidos y la quema de biomasa (Sosa et al., 2023).

En el caso de la Zona Metropolitana de Denver, esta zona tiene una media de las concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  correspondiente al año 2017 por debajo de la media de la ZMCM, pero casi cuatro veces mayor a la correspondiente a la Ciudad de Los Ángeles y Nueva York, esto se atribuye a que se ha evidenciado la influencia que tiene la meteorología de la zona y el  $\text{NH}_3$  agrícola emitido desde la región norte y noreste externas a la Zona Metropolitana de Denver contribuyendo a la alta carga de  $\text{NH}_4^+$  en el depósito atmosférico húmedo de la región (Wetherbee et al., 2019).

## 5.2.6 Variación de la relación $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$ en sitios urbanos de Norteamérica

El estudio de la variación de la relación  $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$  en los sitios urbanos de Norteamérica elegidos para este proyecto, permitió conocer las medias generales para el periodo 2003-2019 (Figura 80), en el caso de la ZMCM la media fue de 2.52 para sitios urbanos, lo que nos muestra la predominancia del ion  $\text{NH}_4^+$  ante el  $\text{NO}_3^-$ , al igual que en la Zona Metropolitana de Denver dónde la media fue de 2.16 durante el año 2017 para los sitios urbanos instalados (Wetherbee et al., 2019). Por otro lado, en la ciudad de Los Ángeles y Nueva York la media fue ligeramente mayor a 1 con valores de 1.09 y 1.14 respectivamente, esto muestra que, en estas ciudades la presencia del  $\text{NH}_4^+$  fue ligeramente superior a la del  $\text{NO}_3^-$  durante el periodo de análisis.

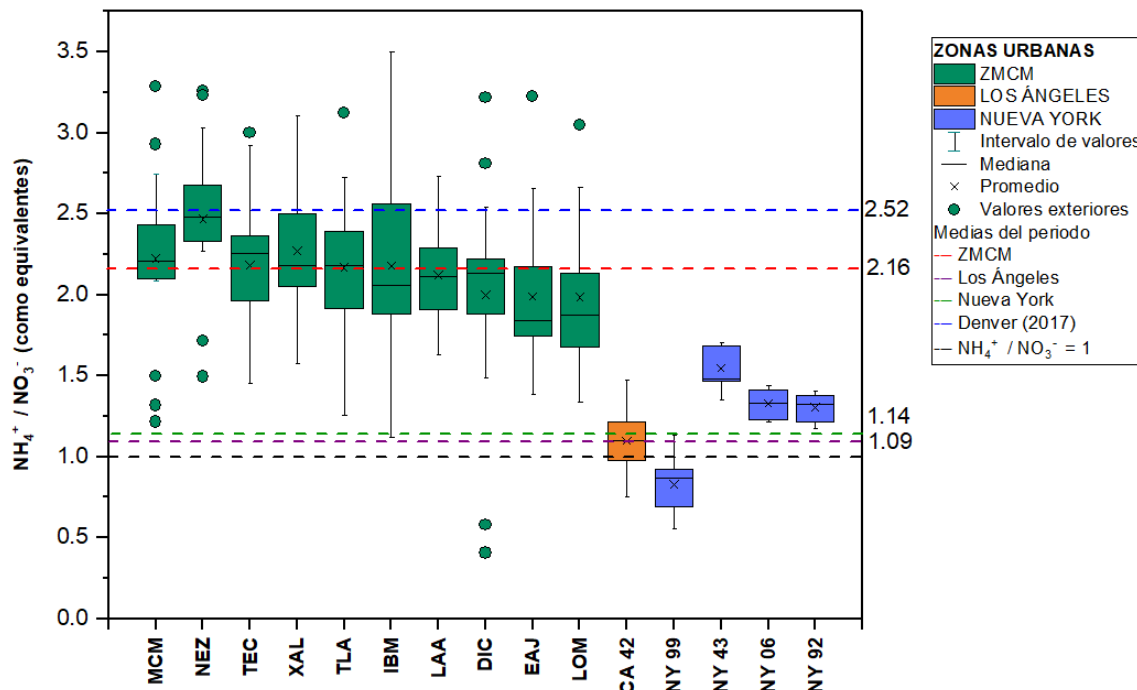


Figura 80. Variación de la relación  $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$  del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2019

Del análisis por años del comportamiento de la relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  en los sitios elegidos en la figura 81, se observa que del año 2003 al 2010 las estaciones de la ZMCM tuvieron comportamientos por encima de una relación igual a 1, observándose un decrecimiento desde el año 2005 al 2008, posterior a este año hubo un crecimiento en el valor de la relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  hasta el 2010, mientras que en el sitio NY99 de Nueva York, se observaron valores por debajo de 1 lo que significa que durante el periodo 2003-2010, predominó el  $\text{NO}_3^-$  sobre el  $\text{NH}_4^+$  en esa zona, mientras que en el sitio CA42 perteneciente a Los Ángeles, no hubo una tendencia clara pues durante los años 2003, 2004, 2007 y 2009 se obtuvieron relaciones inferiores a uno, mientras que en los años 2005, 2006, 2008 y 2010 hubo predominancia del  $\text{NH}_4^+$  debido al valor de la relación mayor a 1.

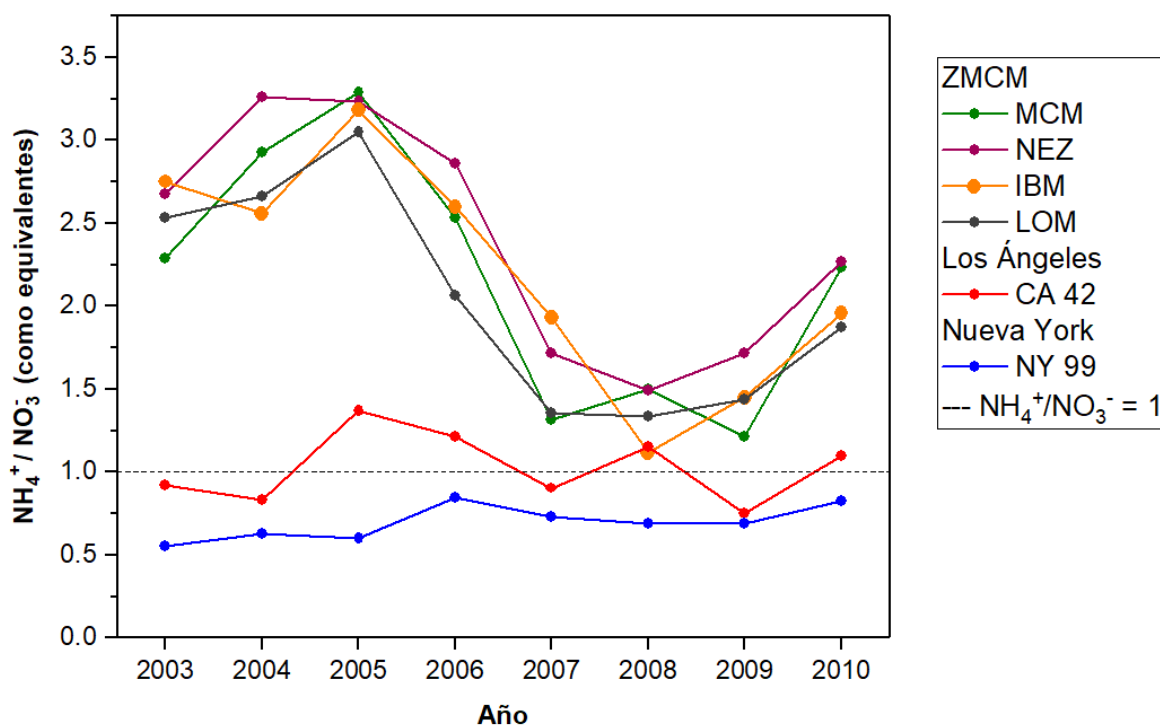


Figura 81. Variación de la relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2003-2010

En el periodo del 2011 al 2019, en la ZMCM (Figura 82) se observó un notorio aumento en la relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ , específicamente en el año 2017, año dónde también se tuvo



registro de las relaciones para sitios urbanos en el área Metropolitana de Denver, cuyos valores fueron similares a los de la ZMCM, obteniéndose como valor mínimo 2.33 en el sitio CO86, y como máximo 2.51 en CO87(Wetherbee et al., 2019).

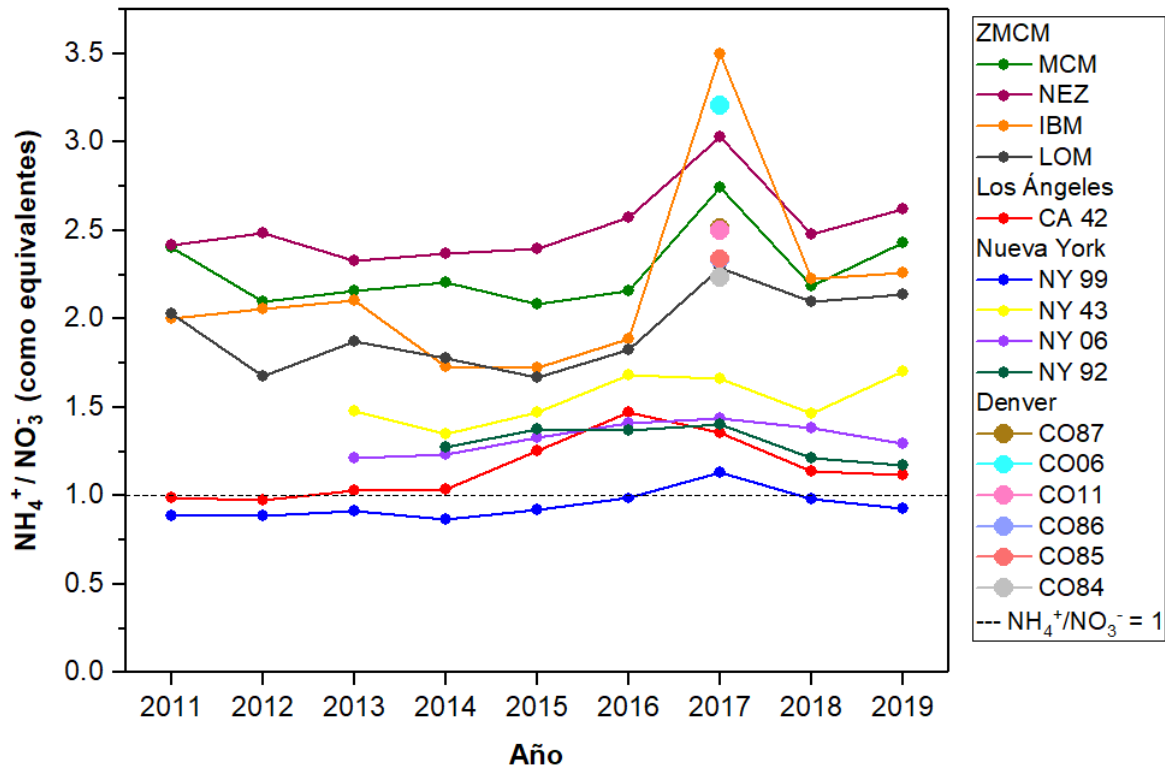


Figura 82. Variación de la relación  $NH_4^+/NO_3^-$  anual del depósito atmosférico húmedo de sitios urbanos de Norteamérica 2011-2019

En Los Ángeles el comportamiento de la relación  $NH_4^+/NO_3^-$  tuvo un crecimiento del año 2013 al 2016, superando el valor de 1, lo cual es indicador de mayor presencia de  $NH_4^+$  en el depósito atmosférico húmedo, con respecto a los sitios de Nueva York, específicamente en NY99 se obtuvieron valores por debajo de 1 hasta el año 2016 donde incrementó superando el valor antes mencionado, sin embargo en 2018 y 2019 logró un descenso en los valores de la relación, mientras que los sitios puestos en marcha en 2013 y 2014 (NY43, NY06 y NY92) muestran predominancia del  $NH_4^+$  en el depósito atmosférico húmedo.

Como se ha discutido anteriormente la relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  representa un indicador del tipo de nitrógeno reactivo (Nr) que predomina en el depósito atmosférico húmedo, ya sea la parte oxidada ( $\text{NO}_3^-$ ) o la parte reducida ( $\text{NH}_4^+$ ), en este caso de acuerdo a las medias del periodo 2003-2019 presentadas y al ser todas mayores a 1 se dice que hay predominancia de Nr en su forma reducida, es decir,  $\text{NH}_4^+$ .

Recordando la capacidad de las sales formadas con el  $\text{NH}_4^+$  para disminuir o neutralizar la acidez del depósito atmosférico húmedo (Sosa et al., 2023), entonces es necesario mencionar que la ZMCM y el área Metropolitana de Denver tienen mayor potencial de neutralización debido a la alta presencia del  $\text{NH}_4^+$ , con respecto al  $\text{NO}_3^-$ , y en comparación con las ciudades de Nueva York y Los Ángeles, esto puede observarse con mayor claridad en la figura 62 del capítulo 5.2.1, donde la zona de Denver tiene el pH menos ácido (pH=6.36), seguido de la ZMCM (pH=5.49), mientras que Nueva York y Los Ángeles presentan medias de pH inferiores.

**CAPÍTULO 6. PROPUESTA DE  
ESTRATEGIAS DE  
PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y  
CONTROL DE  
CONTAMINANTES  
PRECURSORES DE LLUVIA  
ÁCIDA EN LA ZMCM**

Como se ha mencionado anteriormente la presencia de lluvia ácida tiene efectos adversos en el medio ambiente y para disminuir el riesgo que esta representa se debe abordar el problema desde la causa principal la cual es la presencia de los contaminantes gaseosos  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  en el aire, para lo que es necesario sugerir y dar herramientas a los tomadores de decisiones para establecer estrategias de prevención, minimización y control de las emisiones de estos contaminantes precursores de la lluvia ácida.

En la ZMCM, los niveles de  $\text{SO}_2$ , han dejado de ser un problema de calidad del aire; sin embargo, los altos niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$  observados en el depósito atmosférico húmedo siguen siendo motivo de preocupación, esto debido a la presencia de fuentes de  $\text{SO}_2$  externas al norte de la ZMCM principalmente el corredor industrial Tula-Vito-Aspasco dónde se lleva a cabo la quema de combustibles con alto contenido de azufre. Desde este sitio el  $\text{SO}_2$  es transportado a la ZMCM debido a la dirección predominante del viento de norte a sur, por esta razón es que las estrategias de prevención, minimización y control de las emisiones de  $\text{SO}_2$ , deben ser dirigidas principalmente a esta zona industrial.

Debido a lo expuesto anteriormente, la principal estrategia propuesta para el caso del contaminante precursor de lluvia ácida  $\text{SO}_2$ , debe centrarse en la central termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” y en la refinería “Miguel Hidalgo” dónde se consume combustible que supera constantemente la especificación correspondiente, según lo dispuesto en la NOM-016-CRE-2016 (2 % de azufre en peso), reportando porcentajes entre 3.6 y 3.9 % (SEMARNAT et al., 2020).

Lograr una reducción importante en las emisiones anuales de  $\text{SO}_2$ , puede realizarse mediante el cambio a combustibles más limpios e impulsando el uso de gas natural sobre el combustóleo y en unidades generadoras de energía eléctrica que lo permitan la combinación de ambos combustibles, con esto la tasa de emisión horaria de  $\text{SO}_2$  de la unidad generadora de electricidad no cambiaría al quemar combustóleo, pero sus emisiones anuales disminuirían cuando aumenta el porcentaje de gas natural (Sosa et al., 2020; Sosa et al., 2016).

El funcionamiento efectivo de esta estrategia propuesta, se sustenta en la evidencia que se ha tenido en ciudades de Norteamérica pertenecientes a los Estados Unidos y Canadá, donde la mayoría de las unidades generadoras de electricidad han utilizado como alternativa el cambio de combustible en lugar de instalar sistemas de control de emisiones de  $\text{SO}_2$ , como una estrategia común de cumplimiento de la regla federal interestatal de aire limpio para la lluvia ácida, implementando el cambio de combustible a carbón con bajo contenido de azufre (1% en peso o menos) y gas natural (EIA, 2022).

En el caso de las cementeras ubicadas en el corredor Tula-Vito-Apasco, la fuente principal de  $\text{SO}_2$  es la materia prima, por lo que lo ideal sería trabajar con materia prima de bajo contenido de azufre. (Emilio et al., 2008).

Por otro lado, con respecto a las emisiones de los  $\text{NO}_x$ , las estrategias de prevención, minimización y control de las emisiones en la ZMCM deben estar mayormente dirigidas a las fuentes móviles, pues de acuerdo con el último inventario de esta región, son la fuente con mayor contribución a la emisión de este contaminante.

Para lo anterior, es necesario establecer como estrategia rigurosa la constante evaluación de normas que busquen que los fabricantes de vehículos implementen nuevas tecnologías que permitan poder medir la emisión de gases contaminantes y, así mismo, poder controlar e impedir la emisión excesiva de gases dañinos para la población como los son los  $\text{NO}_x$ , con el fin de cumplir los estándares Euro VI y EPA 2010, esto puede lograrse con la implementación de tecnologías como la de Reducción Catalítica Selectiva (SCR) y la de Recirculación de los Gases de Escape (EGR) (SENER, 2022).

La implementación de estas tecnologías como estrategias para la reducción de la emisión de  $\text{NO}_x$  por parte de fuentes móviles, debe ser monitoreada por un dispositivo SDB/OBD, que indica cuándo estos sistemas se encuentran en mal estado o necesitan mantenimiento, anticipando fallas o deterioros, de manera que se puede conocer cuando un automóvil supera el límite  $\text{NO}_x$  estandarizado y entonces se pueden tomar medidas para poner fuera de circulación las unidades que no tengan un funcionamiento adecuado.

A continuación, se describen las ventajas y desventajas de las tecnologías y estrategias antes sugeridas en este capítulo, para la minimización de las emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> en la ZMCM (Tabla 16)

**Tabla 16. Estrategias y tecnologías para la minimización de emisiones de contaminantes precursores de lluvia ácida en la ZMCM.** (Mateos, 2016; SENER, 2022; US EPA, 2023a)

Contaminante	Estrategia/Tecnología	Ventajas	Desventajas
SO <sub>2</sub>	Cambio a combustibles con bajo contenido de azufre e impulso del uso de gas natural sobre el combustóleo. Combinación de combustibles	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disminución de las emisiones de SO<sub>2</sub> anuales en las plantas generadoras eléctricas al aumentar el porcentaje de gas natural utilizado.</li> <li>Disminución en la cantidad de hollín, provocando menos acumulación en superficies de transferencia de calor, evitando que este actúe como aislante y disminuyendo el consumo de combustible.</li> <li>Combustiones más limpias, sin compuestos corrosivos de azufre, que afecten a las calderas reduciendo costos de mantenimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Procesos con medidas de seguridad más estrictas por el uso de gas natural, debido a sus características de alta inflamabilidad.</li> <li>Las emisiones monóxido de carbono, compuestos orgánicos totales, metano, y benceno incrementan si se utiliza gas natural.</li> <li>Deben existir relaciones de aire-combustible distintas a las originales lo que necesita una modificación en la operación del ventilador de tiro forzado, para que la cantidad de aire que entra al proceso sea la adecuada y garantice la combustión completa y la reducción de emisiones de combustible no quemado.</li> </ul>
	Implementación de materia prima con bajo contenido de azufre en industrias cementeras	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se reduce la volatilización de azufre y se genera una atmósfera oxidante que reduce las emisiones de SO<sub>2</sub> en el proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se propicia la existencia de una atmósfera oxidante lo cual aumenta las emisiones de NO<sub>x</sub> en el proceso.</li> </ul>
NO <sub>x</sub>	Reducción Catalítica Selectiva (SCR, por sus siglas en inglés)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Logra reducir entre 70% y 90% la emisión de los NO<sub>x</sub> y aumenta el rendimiento del combustible, alarga la vida útil de los motores y reduce los costos de mantenimiento en fuentes móviles.</li> </ul> <p>Para unidades quemadoras de gas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Es aplicable a fuentes con bajas concentraciones de NO<sub>x</sub>.</li> <li>Las reacciones ocurren dentro de un rango de temperatura más bajo.</li> <li>No requiere modificaciones a la unidad de combustión.</li> </ul>	<p>Para unidades quemadoras de gas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Costos de operación. significativamente más altos que los quemadores de bajo NO<sub>x</sub>.</li> <li>La reconversión de la SCR en calderas industriales es difícil y costosa.</li> <li>Se requieren grandes cantidades de reactor y catalizador.</li> <li>Resulta en amoníaco en la corriente del gas residual, lo cual puede impactar la visibilidad de la pluma y la reventa o disposición de la ceniza.</li> </ul>
	Recirculación de los Gases de Escape (EGR, por sus siglas en inglés), en fuentes móviles	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduce hasta un 50% la emisiones de NO<sub>x</sub> de las fuentes móviles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La implementación de esta tecnología debe tener un estricto control en fuentes móviles, pues de no ser así también podría disminuir el rendimiento del motor, la calidad del ralentí y la capacidad de conducción.</li> <li>Esta tecnología está diseñada para siempre trabajar en conjunto con la tecnología SCR; de lo contrario no se podrá evitar las emisiones de NO<sub>x</sub>.</li> </ul>

Finalmente, deben considerarse como estrategias el hecho de instrumentar políticas y programas para acelerar la renovación del parque vehicular con unidades de sistemas eléctricos o híbridos y en caso de las unidades a diésel que estas cuenten con sistemas avanzados de control de emisiones. Además, se deben fortalecer actividades de vigilancia y seguimiento respecto a las condiciones operativas y ambientales de las unidades móviles, pero también de aquellas fuentes estacionarias emisoras de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$ , sobre todo aquellas que por su antigüedad, o falta de mantenimiento generan una tasa alta de estos contaminantes.

# CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



## 7.1 Conclusiones

Uno de los objetivos de este trabajo consistió en evaluar los parámetros fisicoquímicos del depósito atmosférico húmedo en la ZMCM, concluyéndose que durante el periodo 2003-2019 hubo presencia de lluvia ácida en todas las estaciones de esta región. La región con pH más ácido fue el sur de la ZMCM debido la dirección de los vientos característica, de norte a sur, lo que provoca que los contaminantes provenientes de fuentes importantes internas y externas a la ZMCM ubicadas al norte, sean desplazados hacia el sur de la región provocando precipitaciones más ácidas en esta zona, además, de que en el norte de la región existe una alta neutralización, lo que resulta en un pH más alto, mientras que en el sur la neutralización es menor, causando pH más bajo.

Con respecto a la conductividad, los valores más altos de este parámetro durante los años del periodo de estudio están en la zona norte de la ZMCM, mientras que, los valores más bajos se encuentran ubicados en las estaciones del sur de la región.

De los iones predominantes en el depósito atmosférico húmedo de la ZMCM, el catión  $\text{NH}_4^+$  fue el más abundante (37%), en segundo lugar, el  $\text{Ca}^{2+}$  (19%) y en menor proporción el  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ , de los aniones, el  $\text{SO}_4^{2-}$  tuvo mayor presencia (25%), seguido del  $\text{NO}_3^-$  (17%).

Del  $\text{NO}_3^-$  tuvo su valor máximo en la estación del suroeste LOM, debido a que esta región es considerada como zona de conservación con alta carga de materia orgánica propiciando que ocurran reacciones de nitrificación y el aumento de las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ . En la zona centro de la ZMCM las altas concentración de  $\text{NO}_3^-$  se deben a la alta afluencia de vehículos diarios en la zona, pues los vehículos son la principal fuente de emisión de  $\text{NO}_x$  en la ZMCM.

Para el caso del  $\text{SO}_4^{2-}$  las concentraciones más altas se encontraron en la zona norte y centro de la ZMCM, principalmente por la presencia del corredor Tula-Vito-Aspasco que es una fuente externa al norte de la ZMCM, dónde se ubican entre otras industrias

la refinería de PEMEX “Miguel Hidalgo” y la planta termoeléctrica de CFE “Francisco Pérez Ríos” que consumen combustible fósil con alto contenido de azufre.

La relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ , como indicador de cuál de ambos iones es el que contribuye mayormente a la acidez del depósito atmosférico húmedo, mostró que, la zona noroeste y centro presentan las relaciones más altas, además, se obtuvo una media de la relación de 1.47 para todo el periodo de estudio, esto indica que la acidez de la precipitación en la ZMCM se ve mayormente influenciada por la presencia del ion  $\text{SO}_4^{2-}$ , esto se atribuyó a fuentes externas emisoras de  $\text{SO}_2$  al norte de la región, desde dónde partículas ácidas de  $\text{SO}_4^{2-}$  se pueden transportar hasta la ZMCM, por la dirección del viento de norte a sur.

La concentración más alta de  $\text{NH}_4^+$  se dio en las estaciones ubicadas al norte y centro de la ZMCM, por esta razón y debido al efecto neutralizante que tiene este ion en el depósito atmosférico húmedo, se explica que se haya obtenido pH menos ácido al norte de la ZMCM. Por otra parte, todas las relaciones  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  del periodo 2003-2019 fueron mayores a 1.0, esto indica predominancia del Nr en su forma reducida ( $\text{NH}_4^+$ ).

Por otro lado, se identificaron las características del depósito atmosférico húmedo en sitios urbanos de la ZMCM, Zona Metropolitana de Denver, Los Ángeles y Nueva York, del 2003 al 2019, obteniéndose que, para de la ZMCM la media general del periodo para pH fue de 5.4, en Nueva York de 5.07, y en Los Ángeles de 5.29, todos correspondientes a un pH característico de la lluvia ácida. En la zona urbana de Denver durante los años 2016-2017 la media para los sitios urbanos instalados en la zona fue de 6.43, caso que no corresponde a eventos de lluvia ácida.

El valor de la media de la concentración del  $\text{SO}_4^{2-}$  para el periodo de estudio en Los Ángeles fue de 7.63  $\mu\text{Eq/L}$  y en Nueva York de 15.70  $\mu\text{Eq/L}$ , ambos valores fueron inferiores a la media de la ZMCM de 66.38  $\mu\text{Eq/L}$ . En la Zona Metropolitana de Denver, la media fue 3.61  $\mu\text{Eq/L}$  durante el año 2017. La mayor concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  en la ZMCM se explicó por la existencia del corredor industrial Tula-Vito Apasco dónde se consumen combustibles fósiles con alto contenido de azufre, a diferencia de los Estados Unidos dónde el sector de la energía eléctrica ha disminuido el contenido de

azufre en combustibles a 1% en peso aproximadamente, además de la implementación del uso de gas natural.

En relación con el  $\text{NO}_3^-$  se obtuvo que, la media su concentración (2003-2019) en Los Ángeles fue de 11.68  $\mu\text{Eq/L}$  y en Nueva York de 15.03  $\mu\text{Eq/L}$ , estos dos valores fueron menores a la media obtenida en los sitios urbanos de la ZMCM, la cual fue de 45.73  $\mu\text{Eq/L}$ , mientras tanto, en la Zona Metropolitana de Denver durante el 2017 la media obtenida fue 24.52  $\mu\text{Eq/L}$ . Una menor presencia  $\text{NO}_3^-$  en el depósito atmosférico de las zonas de Los Ángeles y Nueva York con respecto a la ZMCM, se relaciona directamente con las emisiones de  $\text{NO}_x$ , dónde la ZMCM es la zona de estudio con mayor número de emisiones de  $\text{NO}_x$ , seguida de Los Ángeles, Nueva York y el Área Metropolitana de Denver.

Para la media de la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ , los sitios urbanos de la ZMCM presentaron un valor de 1.47, siendo superior lo obtenido en Los Ángeles (0.70), Nueva York (1.04) y el Área Metropolitana de Denver (0.15), concluyéndose así que, la presencia de  $\text{SO}_4^{2-}$  ante  $\text{NO}_3^-$  es mayor en la ZMCM y Nueva York y viceversa en el depósito atmosférico húmedo de Los Ángeles y Denver por tener relaciones menores a 1.

De la comparación de los promedios ponderados de las concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  se concluyó que, la media en las estaciones de la ZMCM situadas en zonas urbanas es de 94.32  $\mu\text{Eq/L}$ , seguida de la media para el 2017 en Denver la cual fue de 62.03  $\mu\text{Eq/L}$ , en el caso de Nueva York y Los Ángeles, estos presentaron medias con valores más bajos, específicamente de 17.02 y 12.13  $\mu\text{Eq/L}$ , respectivamente. La concentración más alta de  $\text{NH}_4^+$  en la ZMCM se debe a que las emisiones  $\text{NH}_3$  en esa zona son más altas con respecto a las de Los Ángeles, Nueva York y el área Metropolitana de Denver. Entre más emisiones de  $\text{NH}_3$ , hay mayor formación de  $\text{NH}_4^+$  y por ende mayor presencia de este ion en el depósito atmosférico húmedo.

A partir del estudio de la relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  en los sitios urbanos se concluyó que, en el caso de la ZMCM la media fue de 2.52 demostrando predominancia del  $\text{NH}_4^+$  ante el  $\text{NO}_3^-$ , al igual que en la Zona Metropolitana de Denver dónde la media fue de 2.16. Por otro lado, en la ciudad de Los Ángeles y Nueva York la media fue ligeramente mayor a

1 con valores de 1.09 y 1.14 respectivamente, indicando una ligera mayor presencia de  $\text{NH}_4^+$  durante el periodo de análisis.

Finalmente, de acuerdo con lo obtenido en esta tesis se dice que, las estrategias de reducción de los contaminantes  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  implementadas en los Estados Unidos, son una guía adecuada de implementación para la mejora de la calidad del aire de la ZMCM, ya que, en general, se ha observado menor concentración de los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  en el depósito atmosférico húmedo de las ciudades de Los Ángeles, Nueva York y Denver que en la ZMCM.

## 7.2 Recomendaciones

Se recomienda poner en marcha las estrategias de prevención, minimización y control de contaminantes precursores de lluvia ácida en la ZMCM, enfocadas principalmente a las emisiones de  $\text{SO}_2$  en fuentes externas al norte de la ZMCM ante todo en el corredor industrial Tula-Vito-Aspasco dónde se sigue llevando a cabo la quema de combustibles con alto contenido de azufre, y desde dónde es transportado  $\text{SO}_2$  a la ZMCM debido a la dirección predominante del viento de norte a sur, siendo la principal estrategia el cambio a combustibles más limpios e impulsando el uso de gas natural sobre el combustóleo y en unidades generadoras de energía eléctrica que lo permitan la combinación de ambos combustibles. La recomendación anterior se sustenta en la evidencia que se ha tenido en ciudades de Norteamérica pertenecientes a los Estados Unidos y Canadá, dónde se han reducido las emisiones de  $\text{SO}_2$  debido al cambio de combustible (carbón con bajo contenido de azufre 1% peso) en lugar de la instalación sistemas de control de emisiones de  $\text{SO}_2$ .

También se recomienda dirigir estrategias en la ZMCM, a la reducción de  $\text{NO}_x$  principalmente provenientes de las fuentes móviles, pues son el tipo de fuente con mayor contribución a la emisión de este contaminante, esto es implementando la constante evaluación de normas que busquen que los fabricantes de vehículos implementen nuevas tecnologías, que permitan poder medir la emisión de gases

contaminantes y así mismo, poder controlar e impedir la emisión excesiva de gases dañinos para la población, como las tecnologías de Reducción Catalítica Selectiva (SCR) y la de Recirculación de los Gases de Escape (EGR).

Finalmente, se considera recomendable instrumentar políticas y programas para fortalecer actividades de vigilancia y seguimiento respecto a las condiciones operativas y ambientales de todos los tipos de fuentes de emisión de contaminantes precursores de lluvia ácida, así como la ampliación de la REDDA, con la instalación de más sitios de muestreo de depósito atmosférico húmedo en la ZMCM, para la obtención de datos que lleven a un estudio más amplio sobre este tema.

## CAPÍTULO 8. REFERENCIAS

- Alarcón, A. (2012). *Luvia ácida en la zona metropolitana de la Ciudad de México: Evaluación y trascendencia* [Universidad Nacional Autónoma de México].  
[https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/K8DT498NSJ2784YRN9V6AL34SKD7TIF2Q965TUGKXRA4UYBQR9-35497?func=full-set-set&set\\_number=890319&set\\_entry=000002&format=999](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/K8DT498NSJ2784YRN9V6AL34SKD7TIF2Q965TUGKXRA4UYBQR9-35497?func=full-set-set&set_number=890319&set_entry=000002&format=999)
- Ávila, D. (2018). *Influencia de las condiciones meteorológicas en el depósito atmosférico húmedo en la zona metropolitana de la Ciudad de México* [Universidad Nacional Autónoma de México].  
[https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/PHRX14JEGHB3HG7BYSVD5ACBJU1G96KS35VGILCSB7U4D44RAR-15891?func=find-b&local\\_base=TES01&request=daimy+avila&find\\_code=WRD&adjacent=N&filter\\_code\\_2=WYR&filter\\_request\\_2=&filter\\_code\\_3=WYR&filter\\_request\\_3=](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/PHRX14JEGHB3HG7BYSVD5ACBJU1G96KS35VGILCSB7U4D44RAR-15891?func=find-b&local_base=TES01&request=daimy+avila&find_code=WRD&adjacent=N&filter_code_2=WYR&filter_request_2=&filter_code_3=WYR&filter_request_3=)
- Bruno, D., Ryan, G., Kaplan, C., & Slemmer, J. (2000). *Climate of Los Angeles, California*.  
<https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/14744>
- Burns, D. A., Aherne, J., Gay, D. A., & Lehmann, C. M. B. (2016). Acid rain and its environmental effects: Recent scientific advances. *Atmospheric Environment*, 146, 1–4.  
<https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2016.10.019>
- Carn, S. A., Fioletov, V. E., Mclinden, C. A., Li, C., & Krotkov, N. A. (2017). A decade of global volcanic SO<sub>2</sub> emissions measured from space OPEN. *Nature Publishing Group*.  
<https://doi.org/10.1038/srep44095>
- County of Los Angeles Public Health. (2022). *Criteria Air Pollutants | Los Angeles County Department of Public Health - Environmental Health*.  
<http://publichealth.lacounty.gov/eh/safety/criteria-air-pollutants.htm>
- Doesken, N., Pielke, R., & Bliss, O. (2003). *Climate of Colorado*. Colorado Climate Center. Colorado State University. [https://climate.colostate.edu/climate\\_long.html](https://climate.colostate.edu/climate_long.html)
- Doherty, A., Kirylo, A., Rohlehr Kaiea, & Tuquabo, H. (2021). *Air Quality Data and Transportation-Related Emissions | Earthlab*. <https://earthlab.colorado.edu/blog/air-quality-data-and-transportation-related-emissions>
- Driscoll, C., Cowling, E., Grennfelt P., Galloway, J., & Dennis, R. (2010). Integrated Assessment of Ecosystem Effects of Atmospheric Deposition. *Air and Waste Management Association's Magazine for Environmental*, 6–13.  
[https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=227569](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=227569)
- ECCC. (2010). *Acid rain: history - Canada*. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/air-pollution/issues/acid-rain-causes-effects/history.html>
- ECCC. (2017). *Canadian Air and Precipitation Monitoring Network - Canada.ca*.  
<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/air-pollution/monitoring-networks-data/canadian-air-precipitation.html>
- ECCC. (2020). *Canada-United States Air Quality Agreement: overview*.  
<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/air-pollution/issues/transboundary/canada-united-states-air-quality-agreement-overview.html>

- ECCC. (2023a). *Air Pollutant and Black Carbon Emissions Inventories online search - Canada.ca*. <https://pollution-waste.canada.ca/air-emission-inventory/>
- ECCC. (2023b). *Canada's Air Pollutant Emissions Inventory*. <https://data-donnees.ec.gc.ca/data/substances/monitor/canada-s-air-pollutant-emissions-inventory/>
- ECCC. (2023c). *Canadian Air and Precipitation Monitoring Network (CAPMoN) - RESOURCES*. <https://data.ec.gc.ca/data/air/monitor/networks-and-studies/canadian-air-and-precipitation-monitoring-network-capmon/>
- EIA. (1994). *Electric Utility Phase I Acid Rain Compliance Strategies for the Clean Air Act Amendments of 1990*. <https://www.eia.gov/electricity/pdfpages/caaphase1/index.php>
- EIA. (2022). *Coal grade*. <https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=Coal%20grade>
- Eltarkawe, M., Thomas, G., & Miller, S. L. (2022). Modeling county-level benzene emissions using transportation analysis zones in the Denver metro area. *Atmospheric Environment: X*, 15. <https://doi.org/10.1016/J.AEAOA.2022.100180>
- Emilio, A., Barreto, H., María, M., Correa, J., Ortiz Muñoz, A., & Montes De Correa, C. (2008). Cement plant gaseous pollutant emission reduction technologies. En *DICIEMBRE DE* (Vol. 28, Número 3).
- Gough, W. A. (2008). Theoretical considerations of day-to-day temperature variability applied to Toronto and Calgary, Canada data. *Theoretical and Applied Climatology*, 94(1–2), 97–105. <https://doi.org/10.1007/S00704-007-0346-9>
- Gough, W. A., Tam, B. Y., Mohsin, T., & Allen, S. M. J. (2014). Extreme cold weather alerts in Toronto, Ontario, Canada and the impact of a changing climate. *Urban Climate*, 8, 21–29. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2014.02.006>
- Granados Sánchez, D., López Ríos, G. F., & Hernández García, M. Á. (2010). La lluvia ácida y los ecosistemas forestales. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 16(2), 187–206. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2010.04.022>
- IDEAM. (2021). *El problema de la lluvia ácida*. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/el-problema-de-la-lluvia-acida>
- IJC. (1994). *Canada-United States Air Quality Agreement: Progress Report 1994*. [https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2014/ec/En40-388-1994-eng.pdf](https://publications.gc.ca/collections/collection_2014/ec/En40-388-1994-eng.pdf)
- IJC. (2001). *Canada-United States Air Quality Agreement: Progress Report 2000*. [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/2000\\_u.s.-canada\\_progress\\_report.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/2000_u.s.-canada_progress_report.pdf)
- IJC. (2005). *Canada-United States Air Quality Agreement: Progress Report 2004*. [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/2004\\_u.s.-canada\\_progress\\_report.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/2004_u.s.-canada_progress_report.pdf)
- IJC. (2009). *Canada-United States Air Quality Agreement: Progress Report 2008*. [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/2006\\_u.s.-canada\\_progress\\_report.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/2006_u.s.-canada_progress_report.pdf)



- IJC. (2015). *Canada-United States Air Quality Agreement: Progress Report 2014*.  
[https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/2014\\_u.s.-canada\\_progress\\_report.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/2014_u.s.-canada_progress_report.pdf)
- IJC. (2019). *Canada-United States Air Quality Agreement: Progress Report 1994*.  
<https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-12/documents/en85-1-2018-eng.pdf>
- INECC. (2021). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2020*.  
<https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2020.pdf>
- INEGI. (2019). Directorio Nacional de Unidades Económicas. DENUÉ. *Censos Económicos 2019*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
- Jury, M. R. (2020). Meteorology of air pollution in Los Angeles. *Atmospheric Pollution Research*, 11(7), 1226–1237. <https://doi.org/10.1016/J.APR.2020.04.016>
- Kline, K. M., Eshleman, K. N., Garlitz, J. E., & U'Ren, S. H. (2016). Long-term response of surface water acid neutralizing capacity in a central Appalachian (USA) river basin to declining acid deposition. *Atmospheric Environment*, 146, 195–205.  
<https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2016.07.034>
- LA County Government. (2022). *Maps and Geography – COUNTY OF LOS ANGELES*.  
<https://lacounty.gov/government/about-la-county/maps-and-geography/>
- Lajtha, K., Jones, J., Lajtha, K., & Jones, J. (2013). Trends in cation, nitrogen, sulfate and hydrogen ion concentrations in precipitation in the United States and Europe from 1978 to 2010: a new look at an old problem. 116, 303–334. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9860-2>
- Lamb, D., & Van Bowersox, J. (2000). The national atmospheric deposition program: an overview. *Atmospheric Environment*, 34(11), 1661–1663. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00425-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00425-2)
- Lehmann, C. M. B., Kerschner, B. M., & Gay, D. A. (2015). Impact of sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) and nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) emissions reductions on: Acidic deposition in the United States. *EM: Air and Waste Management Association's Magazine for Environmental Managers*, 65(July), 6–11.
- Likens, G. E., & Bailey, S. W. (2013). The discovery of acid rain at the Hubbard Brook experimental forest: A story of collaboration and long-term research. *USDA Forest Service Experimental Forests and Ranges: Research for the Long Term*, 463–482.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1818-4\\_20/FIGURES/7](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1818-4_20/FIGURES/7)
- Likens, G. E., & Butler, T. J. (2018). Acid Rain: Causes, Consequences, and Recovery in Terrestrial, Aquatic, and Human Systems. *Encyclopedia of the Anthropocene*, 1–5, 23–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.09977-8>
- Masters Gilbert M., & Wendell P. Ela. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental*. Pearson Educación.

- Mateos, E. (2016). *Emisiones a la atmósfera por consumo de combustóleo y por cambio a gas natural en una central termoeléctrica de interés*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mehta, P. (2010). Science behind Acid Rain: Analysis of Its Impacts and Advantages on Life and Heritage Structures. En *South Asian Journal of Tourism and Heritage* (Vol. 3, Número 2).
- Meir, T., Orton, P. M., Pullen, J., Holt, T., & Thompson, W. T. (2013). Forecasting the New York City urban heat island and sea breeze during extreme heat events. *Weather and Forecasting*, 28(6), 1460–1477. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-13-00012.1>
- Muñiz-Unamunzaga, M., Borge, R., Sarwar, G., Gantt, B., de la Paz, D., Cuevas, C. A., & Saiz-Lopez, A. (2018). The influence of ocean halogen and sulfur emissions in the air quality of a coastal megacity: The case of Los Angeles. *Science of The Total Environment*, 610–611, 1536–1545. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.06.098>
- Muñoz Cruz, R., López Venegas, G., & Campos Díaz, A. (2008). *Estado de la lluvia ácida en la Zona Metropolitana del Valle de México*. [http://centro.paot.org.mx/documentos/simat/edo\\_lluvia\\_acida\\_zmvm.pdf](http://centro.paot.org.mx/documentos/simat/edo_lluvia_acida_zmvm.pdf)
- NADP. (2022a). *Aerochem: National Trends Network*. <https://nadp.slh.wisc.edu/siteops/collectors/#acmntn>
- NADP. (2022b). *NADP Networks*. <https://nadp.slh.wisc.edu/networks/>
- NADP. (2022c). *National Trends Network*. <https://nadp.slh.wisc.edu/networks/national-trends-network/>
- NADP. (2023a). *Educational Resources: Acid Rain*. <https://nadp.slh.wisc.edu/education/>
- NADP. (2023b). *NTN site information*. <https://nadp.slh.wisc.edu/maps-data/ntn-interactive-map/>
- NASA. (2023). *Shuttle Radar Topography Mission*. Perspective View, SRTM / Landsat. <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/california.html>
- NJDEP. (2009). *2009 Atmospheric Deposition Summary*. [www.state.nj.us/dep/dsr/](http://www.state.nj.us/dep/dsr/)
- NOAA. (2022). *Global Monitoring Laboratory -Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- NOAA. (2023). *City Time Series | Climate at a Glance | National Centers for Environmental Information (NCEI)*. [https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/city/time-series/USW00023174/tavg/1/12/1944-2022?base\\_prd=true&begbaseyear=1991&endbaseyear=2020](https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/city/time-series/USW00023174/tavg/1/12/1944-2022?base_prd=true&begbaseyear=1991&endbaseyear=2020)
- NYC Health Program. (2022). *Outdoor Air Quality*. <https://www.nyc.gov/site/doh/health/health-topics/air-quality-air-pollution-protection.page>
- OMS. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*. <https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/who-global-air-quality-guidelines>

- OMS. (2022). *Contaminación atmosférica*. [https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab\\_1](https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab_1)
- Ontario Government. (2022). *Toronto at a Glance*. <https://www.toronto.ca/city-government/data-research-maps/toronto-at-a-glance/>
- Pacyna, J. M. (2008). Atmospheric Deposition. *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set*, 275–285. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00258-5>
- Poessel, S. A., Breck, S. W., & Gese, E. M. (2016). *Spatial ecology of coyotes in the Denver metropolitan area: influence of the urban matrix*. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyw090>
- Saavedra Romero, M., de, L. L., Rosales, A., & Hernández, V. (2003). Análisis de la precipitación pluvial en bosques de Abies religiosa, en el sur de la Ciudad de México. *Agrociencia*, 37, 57–64. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30237106>
- SEDEMA. (1995). *Informe anual 1994: Programa de Precipitaciones ácidas en la ZMCM*. [http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe\\_anual\\_Iluvia\\_acida\\_1994/#p=6](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_Iluvia_acida_1994/#p=6)
- SEDEMA. (2000). *Programa de Precipitación Ácida de la ZMCM. Informe anual 1999*. [http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe\\_anual\\_Iluvia\\_acida\\_1999/#p=1](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_Iluvia_acida_1999/#p=1)
- SEDEMA. (2002). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010 (ProAire)*. [http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/proaire\\_2002-2010.pdf](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/proaire_2002-2010.pdf)
- SEDEMA. (2004). *Elementos para la Propuesta de Actualización del Programa “Hoy No Circula” de la Zona Metropolitana del Valle de México*. [http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/elementos\\_actualizacion\\_phnc\\_dime.pdf](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/elementos_actualizacion_phnc_dime.pdf)
- SEDEMA. (2021). Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018. En *Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire*. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2018/Inventario-de-emisiones-cdmx-2018.pdf>
- SEDEMA. (2022). *Informe Anual de Calidad del Aire 2019. Ciudad de México*. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-2019.pdf>
- SEDEMA, & SMAGEM. (2011). *Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020*. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire-2011-2020-anexos/>
- SEDEMA, SMAGEM, SEMARNATH, & SEMARNAT. (2021). *Programa de gestión para mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2021-2030 (ProAire)*.

<http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire2021-2030/pdf/ProAireZMVM2021-2030-ResumenEjecutivo.pdf>

- SEMARNAT. (2013). *Informe 2012. Lluvia ácida: causas y consecuencias*.  
[https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_12/05\\_atmosfera/recuadro2.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/05_atmosfera/recuadro2.html)
- SEMARNAT. (2018, enero). *Fuentes de Contaminación Atmosférica*.  
<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica>
- SEMARNAT, INECC, Gobierno del Estado de Hidalgo, & Comisión Ambiental de la Megalópolis. (2020). *Calidad del Aire en la Cuenca Atmosférica de Tula*.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/571616/Calidad\\_del\\_Aire\\_Cuenca\\_Atmo\\_de\\_Tula-FINAL.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/571616/Calidad_del_Aire_Cuenca_Atmo_de_Tula-FINAL.pdf)
- SENER. (2022). *Ficha Técnica Dirección de Movilidad y Transporte. Reducción de emisiones en motores diésel*.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/794566/ficha\\_tecnica-Reduccion\\_de\\_emisiones\\_en\\_motores\\_di\\_sel.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/794566/ficha_tecnica-Reduccion_de_emisiones_en_motores_di_sel.pdf)
- Shaker, R. R., Altman, Y., Deng, C., Vaz, E., & Forsythe, K. W. (2019). Investigating urban heat island through spatial analysis of New York City streetscapes. *Journal of Cleaner Production*, 233, 972–992. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.389>
- Sheinbaum, Claudia. (2008). *Problemática ambiental de la Ciudad de México : diagnóstico y experiencias de gestión, 2001-2006*.  
[https://www.researchgate.net/publication/297427525\\_Problematica\\_Ambiental\\_de\\_la\\_Ciudad\\_de\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/297427525_Problematica_Ambiental_de_la_Ciudad_de_Mexico)
- SIMAT. (2021). *El monitoreo de la calidad del aire*.  
<http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=%27>
- Sosa E, R., Vega, E., Wellens, A., Jaimes, M., Fuentes G, G., Granados H, E., Alarcón J, A. L., Torres B, M. del C., Sánchez A, P., Rosas A, S., & Mateos D, E. (2020). Reduction of atmospheric emissions due to switching from fuel oil to natural gas at a power plant in a critical area in Central Mexico. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 70(10), 1043–1059. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1808113>
- Sosa Echeverría, R., Alarcón Jiménez, A. L., Torres Barrera, M. del C., Sánchez Alvarez, P., Granados Hernandez, E., Vega, E., Jaimes Palomera, M., Retama, A., & Gay, D. A. (2023). Nitrogen and sulfur compounds in ambient air and in wet atmospheric deposition at Mexico city metropolitan area. *Atmospheric Environment*, 292.  
<https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2022.119411>
- Sosa, G., Vega, E., González-Avalos, E., Mora, V., & López-Veneroni, D. (2013). Air pollutant characterization in Tula industrial corridor, central Mexico, during the MILAGRO study. *BioMed Research International*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/521728>
- Sosa, R., Bravo, H., Alarcón, A., Torres, B., Sánchez, P., Rosas, S., Mateos, E., & Granados, E. (2016). Reduction of atmospheric emissions by changing from fuel oil to natural gas at a power plant in a critical zone in Mexico. *109th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. New Orleans, Louisiana, USA*.

- Sosa-Echeverría, R., Alarcón-Jiménez, A. L., Torres-Barrera, M. D. C., Jaimes-Palomera, M., Retama-Hernández, A., Sánchez-álvarez, P., Granados Hernández, E., & Bravo-álvarez, H. (2019). Spatial and temporal variation of acid rain in the Mexico City Metropolitan Zone. *Atmósfera*, 32(1), 57–71. <https://doi.org/10.20937/ATM.2019.32.01.05>
- SSA. (2019). *Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Valores normados para la concentración de dióxido de azufre en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.* [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019#gsc.tab=0)
- SSA. (2021). *Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Valores normados para la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.* Universitat Politècnica de Catalunya. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0)
- Statistics Canada. (2022). *Focus on Geography Series, 2021 Census - Toronto (Census metropolitan area).* <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/as-sa/fogs-spg/page.cfm?topic=1&lang=E&dguid=2021S0503535>
- Taha, H., Hammer, H., & Akbari, H. (2002). *Meteorological and air quality impacts of increased urban albedo and vegetative cover in the Greater Toronto Area, Canada.* <https://doi.org/10.2172/799565>
- Toronto Government. (2022). *Air Quality: Toronto.* <https://www.toronto.ca/community-people/health-wellness-care/health-programs-advice/air-quality/>
- UNEP. (2020). *Air Pollution Series Actions on Air Quality in North America Programmes to Reduce Air Pollution.* [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/37958/NA\\_AAQ.pdf](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/37958/NA_AAQ.pdf)
- U.S. Census Bureau. (2022a). *U.S. Census Bureau QuickFacts: New York.* <https://www.census.gov/quickfacts/fact/table/NY/POP010220>
- U.S. Census Bureau. (2022b). *U.S. Census Bureau QuickFacts: United States, Denver City.* <https://www.census.gov/quickfacts/fact/table/denvercitycolorado,US/POP010220>
- U.S. Census Bureau. (2022c). *U.S. Census Bureau QuickFacts: United States, Los Angeles.* <https://www.census.gov/quickfacts/fact/table/losangelescountycalifornia,losangelescitycalifornia/POP010220>
- US EPA. (1999). *Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>), ¿Por Qué y Cómo Se Controlan?* [www.epa.gov/tnn/catc](http://www.epa.gov/tnn/catc)
- US EPA. (2020). *2017 National Emissions Inventory Report.* <https://gispub.epa.gov/neireport/2017/>
- US EPA. (2022a). *¿Por qué es dañina la lluvia ácida?* [https://www3.epa.gov/acidrain/education/site\\_students\\_spanish/whyharmful.html](https://www3.epa.gov/acidrain/education/site_students_spanish/whyharmful.html)

- US EPA. (2022b). *Acid Deposition. Report on the Environment* .  
<https://cfpub.epa.gov/roe/indicator.cfm?i=1>
- US EPA. (2022c). *Acid Rain Program* . <https://www.epa.gov/acidrain/acid-rain-program>
- US EPA. (2022d). *Aire* . <https://espanol.epa.gov/espanol/aire>
- US EPA. (2022e). *Basic Information about NO<sub>2</sub>* . <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2>
- US EPA. (2022f). *Effects of Acid Rain* . <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain#ecosystems>
- US EPA. (2022g). *EMC: Continuous Emission Monitoring Systems*.  
<https://www.epa.gov/emc/emc-continuous-emission-monitoring-systems>
- US EPA. (2022h). *Phase II of the Acid Rain Program* . <https://www.epa.gov/airmarkets/phase-ii-acid-rain-program>
- US EPA. (2022i). *Sulfur Dioxide Basics | US EPA*. <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#what%20is%20so2>
- US EPA. (2022j). *What is Acid Rain?* . <https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>
- US EPA. (2023a). *Hoja de Datos- Tecnología de Control de la Contaminación del Aire. Reducción Catalítica Selectiva (SCR)*. <https://www3.epa.gov/ttnecat1/cica/files/fscrs.pdf>
- US EPA. (2023b). *U.S.-Canada Air Quality Agreement* . <https://www.epa.gov/power-sector/us-canada-air-quality-agreement>
- US MPCA. (2022). *Sulfur dioxide | Minnesota Pollution Control Agency*.  
<https://www.pca.state.mn.us/pollutants-and-contaminants/sulfur-dioxide>
- Walker, J. T., & Beachley, G. (2019). Evolution of Monitoring and Modeling of Reactive Nitrogen Deposition in the United States. *EM (Pittsburgh, Pa.)*, July, 1.  
</pmc/articles/PMC7805549/>
- Watmough, S. A., Eimers, C., & Baker, S. (2016). Impediments to recovery from acid deposition. *Atmospheric Environment*, 146, 15–27.  
<https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2016.03.021>
- Wetherbee, G. A., Benedict, K. B., Murphy, S. F., & Elliott, E. M. (2019). Inorganic nitrogen wet deposition gradients in the Denver-Boulder metropolitan area and Colorado Front Range – Preliminary implications for Rocky Mountain National Park and interpolated deposition maps. *Science of The Total Environment*, 691, 1027–1042.  
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.06.528>
- Wetherbee, G. A., Latysh, N. E., Lehmann, C. M. B., & Rhodes, M. F. (2011). *Four Studies on Effects of Environmental Factors on the Quality of National Atmospheric Deposition Program Measurements*. <http://www.usgs.gov/pubprod>
- Wetherbee, G., Wiczorek, M., Robertson, D., Saad, D., Novick, J., & Mast, M. A. (2022). Estimating urban air pollution contribution to South Platte River nitrogen loads with

National Atmospheric Deposition Program data and SPARROW model. *Journal of Environmental Management*, 301, 113861.

<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113861>

Williston, P., Aherne, J., Watmough, S., Marmorek, D., Hall, A., de la Cueva Bueno, P., Murray, C., Henolson, A., & Laurence, J. A. (2016). Critical levels and loads and the regulation of industrial emissions in northwest British Columbia, Canada. *Atmospheric Environment*, 146, 311–323. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2016.08.058>

Xu, R. K., & Ji, G. L. (2001). Effects of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and HNO<sub>3</sub> on soil acidification and aluminum speciation in variable and constant charge soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 129(1–4), 33–43. <https://doi.org/10.1023/A:1010315011341/METRICS>

# ANEXOS



## Anexo 1. Cadena de custodia REDDA, ZMCM



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA  
SECCIÓN CONTAMINACIÓN AMBIENTAL



CADENA DE CUSTODIA- MUESTRAS DH  
CAMPAÑA 2023-REDDA

FECHA ENVIO: 16 JUNIO 2023

RESPONSABLE (S): IQM Alejandro de David Palacios Ibarra  
M en I Ana Luisa Alarcón Jiménez

MATERIAL ENTREGADO:

20 botellas limpias y acondicionadas Lote \_\_\_\_\_

OBSERVACION(ES):


Mantener en refrigeración

#Botella	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	#Botella	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	#Botella	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	#Botella	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )		
1 BLAB	0.88	6	0.87	11	0.86	16	0.84		
2 BCON	0.88	7	0.87	12	0.86	17	0.84		
3	0.88	8	0.86	13	0.86	18	0.84		
4	0.88	9	0.86	14	0.85	19	0.83		
5	0.87	10	0.86	15	0.85	20	0.82		

ENTREGADO POR:	AREA	FECHA/HORA	RECIBIDO POR:	AREA
Ana Luisa Alarcón	LAB. SCA-ICAYCC			

LAB SCA-CCA-UNAM

Anexo 2. Field Observer Report Form (FORF), NADP




NY10 Chautauqua  
NY10-SI018

**NATIONAL TRENDS NETWORK  
FIELD OBSERVER REPORT FORM (FORF)**  
 Send Completed Form with Each Sample to:  
 NADP Sample Receiving, 465 Henry Mall, Madison, WI 53706  
 Problems? Call the NADP Site Support at 1-800-952-7353  
 e-mail: ntn@slh.wisc.edu

RECEIVER INITIALS  RCK  Y  N  
 NO BOTTLE  BAG LEAK

TZ3677SW



---

**1. SITE**  
Name Chautauqua ID NY110

**2. OBSERVER**  
Print name Todd Zimmer Initials TAZ

---

**3. FIELD BUCKET**

Date: ON MO DAY YR 04 25 23 OFF 05 02 23  
 Time: 0001-2400 1400 1545

**4. SITE OPERATIONS** Check YES, NO, or U (Unable to determine) for each field bucket. If NO or U for Item 1 or 2, describe in Block 10 and call NADP Site Support 1-800-952-7353

YES	NO	U
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

- The collector sensor heater and motor box operated properly. Lid is in correct position.
- Raingauge operated properly during the week.
- Collector opened and closed at least once during the week, other than for testing.
- Raingauge in winterized state during sampling period (antifreeze in bucket & funnel out).

---

**5. SAMPLE CONDITION**  
Check type of contamination for all field buckets before and after decanting. Describe all contamination in Block 10, including any not listed here.

YES	NO
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

- Bird droppings
- Cloudy or discolored

YES	NO
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

- Soot/ash/dirt particles
- Insects/animal matter

YES	NO
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

- Leaves/twigs/pollen/plant matter
- Handling contamination

After decanting into sample bottle, look closely at sample and field bucket and double-check your entry.

---

**6. BUCKET SAMPLE WEIGHT**  
Record ALL sample weights, even if DRY week or NO SAMPLE in bucket.

1. Bucket + Lid + Sample: 3003.0  
 2. Bucket/Bag (No Lid): 743.0  
 3. Lid: 48.0  
 Sample Weight (grams): 2217.0

**7. PRECIPITATION RECORD** All sites must circle **Precipitation Type**

← Bucket On R - Rain Only (Includes Hail) S - Snow Only M - Mixture U - Unknown Bucket Off →

	TUES	WED	THURS	FRI	SAT	SUN	MON	TUES
Type circle one →	(R) S M U	(R) S M U	(R) S M U	(R) S M U	(R) S M U	(R) S M U	(R) S M U	(R) S M U
Amount inches or circle one →	0.040	0.09		0.180	0.130	2.10	2.60	2.6
	Z T MM	Z T MM	Z T MM	Z T MM	Z T MM	Z T MM	Z T MM	Z T MM

Z - Zero T - Trace (Circle Type) MM - Mixing

Sample Weight (grams) 01.18 ← Do these values agree within ± 5%? → 01.17  
 X 0.00058 inches/gram = Sample Depth (inches) YES  NO  (If no, reweigh) Total Raingauge Depth (inches)

E-gage sites: Please submit your electronic raingauge data promptly after shipping this sample.  
 Email data to: [nadp-precip@slh.wisc.edu](mailto:nadp-precip@slh.wisc.edu) or upload at <http://nadp.slh.wisc.edu/upload/ppt>

**8. SAMPLE BOTTLE USE**  
Pour ANY and ALL liquid up to 1-liter into the sample bottle.  
Did you pour sample into the bottle? YES  NO

---

**9. SUPPLIES** Request early. Circle if needed.  
 CAL address labels Lid seal pad  
 Packing tape Gloves (S, M, L)  
 Dry sample env. Field forms  
 1L bottles 1L boxes

**10. REMARKS** For example: equipment malfunction, contamination, farming, burning, logging, leakage before weighing, etc.  
Dirt particles

White copy - Analytical Lab Pink Copy - Site Operator

**Anexo 3. Conductividad equivalente de iones***Tabla 17. Conductividad equivalente de los iones*

<b>Cationes</b>	<b>Conductividad eq (Scm<sup>2</sup>/mol)</b>	<b>Aniones</b>	<b>Conductividad eq (Scm<sup>2</sup>/mol)</b>
Na <sup>+</sup>	50.11	Cl <sup>-</sup>	76.34
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	73.5	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	71.4
K <sup>+</sup>	73.52	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	160
Mg <sup>2+</sup>	106.1	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	44.5
Ca <sup>2+</sup>	119		

## ANEXO 4. Promedio ponderado anual de la concentración de los iones presentes en el depósito atmosférico húmedo

Tabla 18. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2003, REDDA, NADP

2003		Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$
					$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$		
ZMCM	MON	368.00	7.48	34.00	14.89	79.46	2.05	12.33	37.24	9.32	27.10	41.75	1.54	2.93
	NEZ	560.40	6.58	22.39	14.63	90.45	2.64	23.42	56.08	33.35	33.80	68.73	2.03	2.68
	TEC	620.70	6.76	26.04	23.51	97.41	2.92	35.44	66.49	16.29	38.44	76.23	1.98	2.53
	XAL	609.80	6.77	23.26	11.36	99.29	1.52	12.81	60.76	14.79	32.31	55.87	1.73	3.07
	TLA	727.80	6.72	20.30	18.61	85.98	4.84	12.68	53.33	27.27	32.56	57.35	1.76	2.64
	IBM	962.20	5.85	21.69	37.14	164.62	6.46	24.00	75.89	56.16	59.84	81.79	1.37	2.75
	LAA	591.00	6.10	21.16	14.47	97.52	2.80	19.81	51.82	15.70	36.20	50.99	1.41	2.69
	MCM	944.90	5.93	24.60	11.12	83.54	1.97	23.89	42.77	26.90	36.49	49.74	1.36	2.29
	DIC	789.40	6.11	22.64	18.47	104.98	2.83	13.28	61.40	14.19	41.37	55.07	1.33	2.54
	EAJ	873.60	5.57	20.62	13.31	92.57	2.15	7.09	51.41	10.89	39.71	60.16	1.52	2.33
	EDL	1464.85	5.72	16.31	38.44	75.93	22.70	44.84	51.45	29.39	39.39	44.98	1.14	1.93
	LOM	922.50	5.60	22.05	49.87	162.78	3.69	21.30	89.36	41.91	64.22	83.17	1.30	2.53
	AJU	842.40	5.66	15.36	15.39	58.38	4.03	6.65	33.71	13.22	34.57	35.37	1.02	1.69
	SNT	1046.90	5.41	19.22	16.35	85.14	1.54	5.91	47.10	14.08	50.25	48.40	0.96	1.69
	ICAYCC	822.32	5.37	25.54	5.35	72.55	5.14	15.59	51.48	20.36	39.01	61.72	1.58	1.86
MPA	542.50	6.63	18.56	14.95	89.50	2.38	10.25	35.45	17.63	42.09	51.21	1.22	2.13	
COR	616.40	6.57	19.99	12.44	92.42	1.77	14.92	46.25	22.66	45.99	58.36	1.27	2.01	
Nueva York	NY99	1494.28	4.48	18.95	7.91	10.15	0.80	2.23	3.30	10.34	18.35	30.30	1.65	0.55
Los Ángeles	CA42	546.61	5.22	6.15	7.84	10.58	0.27	1.78	2.25	8.95	11.45	5.93	0.52	0.92

Tabla 19. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2004, REDDA, NADP

2004	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	508.32	7.25	23.42	0.95	68.39	1.90	6.10	26.37	4.44	14.02	26.06	1.86	4.88
	NEZ	501.90	6.14	27.59	5.74	95.47	5.50	17.71	51.19	8.82	29.29	46.28	1.58	3.26
	TEC	692.20	5.69	33.18	20.57	99.83	2.72	8.75	65.17	9.01	34.16	43.50	1.27	2.92
	XAL	539.90	6.22	23.20	2.90	92.48	3.47	11.16	92.73	6.27	29.76	42.84	1.44	3.11
	TLA	872.30	5.47	23.39	8.04	99.99	2.54	8.18	75.46	8.24	45.80	46.92	1.02	2.18
	IBM	829.70	5.61	24.65	7.13	87.47	2.56	8.22	74.55	6.80	34.19	41.96	1.23	2.56
	LAA	712.10	5.65	23.81	2.14	116.23	2.74	8.46	69.82	7.27	42.60	52.44	1.23	2.73
	MCM	650.00	5.71	25.37	2.14	107.20	2.27	7.30	53.48	12.79	36.62	48.04	1.31	2.93
	DIC	781.30	5.46	22.54	10.56	86.43	3.92	12.63	52.64	6.98	35.45	43.73	1.23	2.44
	EAJ	1020.80	5.07	21.30	1.77	91.27	3.09	9.96	47.68	8.35	28.29	36.75	1.30	3.23
	EDL	1316.90	5.20	17.77	0.55	76.96	2.06	6.63	44.72	28.66	26.90	35.45	1.32	2.86
	LOM	1084.30	5.20	24.06	8.58	102.78	3.05	9.80	66.84	6.34	38.57	47.83	1.24	2.66
	AJU	1091.10	5.12	16.74	4.69	75.29	2.99	9.63	34.33	10.70	24.15	27.76	1.15	3.12
	SNT	1344.40	5.02	20.47	1.06	83.49	2.84	9.13	33.81	4.47	31.26	44.28	1.42	2.67
	ICAYCC	708.66	5.26	30.33	5.83	110.67	4.22	10.35	63.01	16.04	45.50	65.57	1.44	2.43
MPA	596.00	5.70	17.99	1.78	117.49	5.87	18.90	39.56	9.45	39.10	43.52	1.11	3.01	
COR	502.40	6.30	20.00	1.34	96.19	2.23	7.18	34.44	18.23	31.18	37.95	1.22	3.09	
Nueva York	NY99	1365.00	4.38	23.21	6.94	14.25	0.57	2.08	3.75	9.06	22.77	38.30	1.68	0.63
Los Ángeles	CA42	660.40	5.23	5.51	7.21	7.14	0.24	1.53	2.16	7.81	8.57	6.58	0.77	0.83

Tabla 20. Tabla 18. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2005, REDDA, NADP

2005	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	384.90	6.97	20.44	8.44	233.07	9.83	13.09	58.69	5.70	71.34	112.93	1.58	3.27
	NEZ	410.80	6.27	23.38	3.56	102.63	2.07	5.73	29.39	7.39	31.76	53.92	1.70	3.23
	TEC	443.20	5.63	25.27	4.46	96.20	2.09	16.87	31.46	7.67	32.08	60.02	1.87	3.00
	XAL	367.60	5.98	24.05	2.32	100.14	2.53	4.26	52.37	8.69	38.59	68.60	1.78	2.60
	TLA	488.90	5.69	27.20	1.79	155.87	3.89	7.75	67.79	8.47	49.91	83.92	1.68	3.12
	IBM	596.70	5.55	20.42	1.36	118.97	1.80	4.48	40.95	7.23	37.41	63.76	1.70	3.18
	LAA	486.30	5.75	22.59	3.08	102.76	3.80	5.45	48.61	8.74	52.49	79.80	1.52	1.96
	MCM	598.97	6.28	22.48	2.95	125.95	3.21	5.02	48.24	6.41	38.31	74.66	1.95	3.29
	DIC	724.40	5.72	20.09	1.96	100.77	2.23	5.30	37.25	4.46	35.88	59.95	1.67	2.81
	EAJ	1190.89	5.67	15.82	14.09	83.92	9.46	16.27	34.54	12.47	37.89	44.59	1.18	2.21
	EDL	1281.00	5.22	16.29	1.25	81.91	1.78	3.78	35.18	6.43	29.83	51.09	1.71	2.75
	LOM	686.90	5.46	17.52	5.40	99.63	1.43	9.96	31.50	4.34	32.68	49.21	1.51	3.05
	AJU	948.40	5.18	19.89	1.89	87.83	2.35	3.56	28.98	9.71	27.91	55.67	1.99	3.15
	SNT	1143.90	5.52	19.33	1.81	88.15	3.28	3.68	31.56	7.19	34.00	50.54	1.49	2.59
	ICAYCC	715.08	5.22	28.44	8.16	79.14	8.43	10.94	64.71	27.37	70.12	89.84	1.28	1.13
MPA	449.00	5.23	17.38	1.61	84.47	2.44	3.25	20.95	9.16	32.41	47.63	1.47	2.61	
COR	446.10	5.59	19.66	9.17	102.63	1.39	3.74	25.86	10.59	28.38	58.30	2.05	3.62	
Nueva York	NY99	1444.24	4.59	15.59	7.70	8.59	0.57	2.11	3.24	9.71	14.27	24.90	1.75	0.60
Los Ángeles	CA42	919.48	5.45	5.27	11.60	8.48	0.40	2.27	1.96	13.41	6.18	6.07	0.98	1.37

Tabla 21. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2006, REDDA, NADP

2006	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	292.60	6.09	20.04	2.85	84.52	3.11	3.94	32.88	14.19	35.59	65.48	1.84	2.37
	NEZ	468.00	5.39	23.04	15.55	115.25	7.71	13.77	49.13	18.81	40.26	76.28	1.89	2.86
	TEC	513.90	4.88	26.89	4.77	94.05	2.45	6.74	60.90	23.81	48.17	80.77	1.68	1.95
	XAL	436.30	5.56	25.58	4.28	116.56	2.71	11.60	70.73	25.86	54.00	93.97	1.74	2.16
	TLA	620.30	5.13	22.73	3.09	101.73	2.43	3.61	56.67	15.36	42.54	75.89	1.78	2.39
	IBM	655.90	5.36	21.48	3.96	91.72	3.94	3.44	47.94	10.50	35.28	72.58	2.06	2.60
	LAA	629.80	5.07	23.41	9.19	96.44	6.51	3.92	46.54	16.16	44.14	82.87	1.88	2.18
	MCM	590.90	5.33	23.01	2.30	97.69	3.09	6.38	58.46	23.60	38.51	85.74	2.23	2.54
	DIC	958.20	5.29	24.26	3.73	90.62	3.10	5.74	53.39	18.23	40.75	70.88	1.74	2.22
	EAJ	1285.21	5.22	19.30	35.62	92.56	29.34	48.23	64.67	38.87	44.34	57.74	1.30	2.09
	EDL	1152.00	4.74	15.81	1.40	67.53	4.15	1.65	30.90	7.56	28.13	58.84	2.09	2.40
	LOM	1082.24	4.16	15.58	4.95	80.00	8.15	7.19	40.75	15.19	38.83	71.04	1.83	2.06
	AJU	1151.00	4.27	19.10	3.20	76.24	2.92	7.66	43.11	12.86	29.38	63.97	2.18	2.59
	SNT	1162.20	4.95	18.68	4.00	76.96	4.15	13.03	46.32	11.49	35.42	67.40	1.90	2.17
	ICAYCC	532.46	5.42	24.24	2.57	70.30	2.80	10.81	48.52	12.71	49.49	47.37	0.96	1.42
MPA	501.30	5.10	20.46	30.02	78.17	2.96	2.49	17.12	10.05	42.01	57.25	1.36	1.81	
COR	601.80	5.36	18.71	2.58	93.64	5.43	10.24	45.07	19.82	40.32	78.23	1.94	2.32	
Nueva York	NY99	1226.31	4.60	15.27	6.46	11.94	0.75	2.05	4.38	8.29	14.13	27.87	1.97	0.85
Los Ángeles	CA42	593.09	5.20	8.03	11.95	15.81	1.11	3.03	4.18	13.47	13.01	9.60	0.74	1.22

Tabla 22. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2007, REDDA, NADP

2007		Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$
					$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$		
ZMCM	MON	537.90	6.19	15.12	6.86	107.44	7.54	9.96	52.71	9.68	59.68	94.48	1.58	1.80
	NEZ	504.60	5.28	19.09	5.24	111.53	4.33	7.36	49.07	11.66	65.03	76.54	1.18	1.72
	TEC	652.50	5.13	19.75	6.94	87.67	4.55	16.45	56.09	14.59	52.25	71.70	1.37	1.68
	XAL	496.30	5.45	23.60	9.13	80.79	5.22	18.03	60.63	12.98	48.01	86.88	1.81	1.68
	TLA	622.20	5.14	25.47	10.21	178.41	6.58	12.51	105.61	16.81	95.05	129.22	1.36	1.88
	IBM	730.20	5.22	18.97	12.56	126.17	11.36	14.70	60.95	27.82	65.31	96.65	1.48	1.93
	LAA	584.00	5.33	21.44	7.26	114.15	4.04	9.44	61.72	9.69	67.26	85.09	1.27	1.70
	MCM	640.60	5.18	24.65	24.58	103.73	7.30	55.09	67.19	13.88	78.70	112.41	1.43	1.32
	DIC	862.50	5.17	19.00	2.05	27.36	2.25	2.78	15.46	5.68	47.21	44.94	0.95	2.78
	EAJ	1213.84	5.01	14.60	5.92	92.28	4.53	7.36	60.51	10.73	55.67	79.49	1.43	1.66
	EDL	1195.90	4.91	15.86	3.53	84.63	4.05	8.86	58.53	8.80	54.10	82.56	1.53	1.56
	LOM	986.34	5.18	16.24	10.42	154.23	8.70	21.97	87.47	17.24	113.87	110.13	0.97	1.35
	AJU	793.30	4.67	24.90	9.63	124.71	6.57	9.76	64.43	16.13	76.69	96.18	1.25	1.63
	SNT	922.50	5.15	22.70	7.25	120.74	6.51	7.12	69.49	20.81	72.88	93.90	1.29	1.66
	ICAYCC	181.81	4.93	24.80	5.30	77.76	3.36	14.84	67.01	13.48	58.14	75.68	1.30	1.34
MPA	429.90	5.11	23.45	9.75	126.99	5.81	16.28	60.76	21.52	68.91	87.01	1.26	1.84	
COR	417.20	5.16	21.66	5.64	132.94	3.96	8.00	56.77	10.24	56.24	102.45	1.82	2.36	
Nueva York	NY99	981.96	4.51	17.47	5.90	13.30	1.87	2.13	4.02	7.64	18.13	30.52	1.68	0.73
Los Ángeles	CA42	265.94	5.13	8.72	16.96	13.73	0.94	4.12	4.20	18.77	15.18	10.04	0.66	0.90



Tabla 23. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2008, REDDA, NADP

2008	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	337.10	6.08	21.33	6.97	82.46	5.75	13.35	29.52	12.29	54.11	64.34	1.19	1.52
	NEZ	645.82	5.21	20.92	10.14	90.06	7.97	14.82	39.93	14.22	60.33	71.79	1.19	1.49
	TEC	579.10	5.53	22.32	13.82	130.43	9.24	24.37	58.82	17.81	80.52	109.88	1.36	1.62
	XAL	566.00	5.90	23.90	6.74	83.04	6.12	11.57	35.76	12.01	52.70	62.19	1.18	1.58
	TLA	692.00	5.24	24.64	11.57	82.07	6.37	11.71	34.19	14.75	65.40	58.10	0.89	1.25
	IBM	780.60	5.28	24.68	19.39	91.97	7.57	11.45	38.46	10.04	82.41	67.89	0.82	1.12
	LAA	577.80	5.20	25.37	10.90	107.56	6.69	16.02	46.58	15.53	65.95	97.36	1.48	1.63
	MCM	545.30	5.49	26.43	11.50	105.40	6.97	12.55	42.48	15.57	70.39	79.90	1.14	1.50
	DIC	917.10	5.12	24.15	3.82	29.41	6.21	8.82	12.42	9.58	72.65	64.74	0.89	1.13
	EAJ	907.90	4.98	21.75	9.12	68.92	4.82	8.04	27.54	15.53	45.47	54.35	1.20	1.52
	EDL	1443.30	5.14	17.68	7.20	71.44	4.94	9.83	34.00	12.65	55.17	55.05	1.00	1.29
	LOM	752.90	5.63	35.05	16.23	131.15	24.95	19.29	50.14	17.63	98.00	108.08	1.10	1.34
	AJU	956.20	4.88	19.57	5.16	59.74	5.42	9.29	26.53	13.34	42.31	51.09	1.21	1.41
	SNT	1226.60	4.93	20.05	18.89	66.05	5.00	8.91	25.38	24.62	48.42	52.18	1.08	1.36
	ICAYCC	704.59	5.17	26.51	13.01	60.63	18.87	18.82	87.48	27.01	69.79	98.43	1.41	0.87
MPA	505.70	5.05	23.83	9.21	85.86	6.35	12.20	35.51	16.33	61.92	65.61	1.06	1.39	
COR	488.00	5.03	23.38	4.65	75.86	6.33	11.12	27.11	16.80	46.14	59.36	1.29	1.64	
Nueva York	NY99	979.68	4.54	16.05	3.86	13.21	0.67	1.47	3.97	5.06	19.11	27.36	1.43	0.69
Los Ángeles	CA42	819.91	5.44	6.09	16.70	8.54	0.49	3.51	3.03	19.18	7.43	6.07	0.82	1.15

Tabla 24. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2009, REDDA, NADP

2009	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	387.90	5.87	15.59	12.10	111.72	4.78	20.94	77.44	10.58	58.59	92.41	1.58	1.91
	NEZ	439.60	5.42	23.30	7.67	77.69	1.92	13.26	42.98	8.02	45.28	65.92	1.46	1.72
	TEC	487.40	5.35	23.56	8.87	74.46	3.31	19.27	63.72	8.42	51.23	71.41	1.39	1.45
	XAL	580.70	5.81	22.23	9.36	90.21	2.26	12.78	63.82	6.68	55.44	73.11	1.32	1.63
	TLA	514.50	5.42	22.54	7.64	73.47	1.54	10.42	47.21	9.35	44.43	66.19	1.49	1.65
	IBM	547.40	5.15	26.01	7.10	84.29	1.85	13.61	52.29	7.63	58.10	72.71	1.25	1.45
	LAA	600.30	5.26	23.55	5.02	82.12	4.06	8.83	42.44	6.87	47.80	68.38	1.43	1.72
	MCM	634.80	4.37	23.55	22.21	63.89	2.83	13.24	53.78	7.60	52.70	64.34	1.22	1.21
	DIC	620.30	5.10	22.80	4.31	73.01	2.06	10.45	39.75	7.36	49.23	57.68	1.17	1.48
	EAJ	648.50	4.97	23.52	9.75	62.47	1.30	9.89	32.59	9.61	45.03	55.45	1.23	1.39
	EDL	1142.90	5.40	17.36	4.46	51.03	1.62	9.42	32.12	4.55	37.84	46.33	1.22	1.35
	LOM	691.40	5.31	25.25	15.51	87.28	2.35	12.23	68.67	10.38	60.58	85.12	1.41	1.44
	AJU	704.00	5.09	17.60	8.03	44.21	1.33	9.20	32.89	7.72	39.08	43.64	1.12	1.13
	SNT	1054.40	5.06	18.97	7.50	53.36	2.18	12.12	30.21	5.65	40.70	44.14	1.08	1.31
	ICAYCC	568.07	4.86	25.65	10.15	73.83	3.83	11.23	52.62	9.76	61.35	65.06	1.06	1.20
MPA	574.90	5.37	21.33	6.70	68.46	1.96	8.04	33.93	9.28	41.96	57.26	1.36	1.63	
COR	345.20	5.57	21.66	10.73	72.74	2.87	15.28	48.30	10.41	49.37	63.16	1.28	1.47	
Nueva York	NY99	1168.65	4.76	11.29	6.76	10.05	0.72	2.07	4.36	7.99	14.50	18.06	1.24	0.69
Los Ángeles	CA42	103.89	4.82	12.49	17.52	24.15	0.71	4.27	6.82	17.53	32.17	15.21	0.47	0.75

Tabla 25. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2010, REDDA, NADP

2010	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	388.00	6.19	13.02	2.68	71.76	2.14	4.85	19.86	4.36	30.34	32.62	1.08	2.37
	NEZ	393.80	6.17	18.30	4.18	90.33	2.57	6.11	41.91	7.79	39.81	53.77	1.35	2.27
	TEC	542.00	6.30	15.50	2.89	73.67	2.09	5.32	31.42	5.37	32.64	45.86	1.41	2.26
	XAL	440.70	6.18	22.41	6.73	83.93	3.43	6.94	78.81	6.69	40.27	63.16	1.57	2.08
	TLA	461.90	5.52	20.86	3.98	86.34	2.47	6.97	53.03	5.98	41.90	67.50	1.61	2.06
	IBM	648.90	5.68	21.37	4.42	97.69	3.13	5.81	64.27	8.71	49.92	70.48	1.41	1.96
	LAA	428.50	5.85	14.47	3.56	64.43	2.05	5.21	24.79	4.85	28.69	42.28	1.47	2.25
	MCM	400.50	5.79	15.48	3.10	80.60	1.74	4.12	30.56	5.29	36.10	36.45	1.01	2.23
	DIC	797.00	5.55	16.09	2.92	73.36	1.93	4.83	34.23	6.12	37.78	45.92	1.22	1.94
	EAJ	951.10	5.40	15.32	3.07	66.11	2.16	4.77	29.00	6.24	35.86	44.38	1.24	1.84
	EDL	1256.37	5.18	13.75	1.97	52.96	1.22	2.83	24.66	4.78	29.34	40.25	1.37	1.81
	LOM	665.00	5.51	20.34	3.73	90.18	2.66	5.97	61.31	6.46	48.09	68.62	1.43	1.88
	AJU	1014.50	5.11	13.75	2.34	49.41	1.69	4.21	20.28	6.54	26.05	38.06	1.46	1.90
	SNT	1217.80	5.19	13.26	2.65	53.64	1.99	4.55	22.82	5.00	30.66	37.83	1.23	1.75
	ICAYCC	677.90	5.56	19.55	7.98	88.63	3.61	10.61	43.23	8.89	42.50	51.50	1.21	2.09
MPA	431.00	5.32	18.01	3.31	86.08	2.30	5.54	36.29	12.27	41.41	55.80	1.35	2.08	
COR	414.50	5.71	20.89	3.90	98.10	2.91	6.20	42.64	10.31	44.82	62.02	1.38	2.19	
Nueva York	NY99	1436.12	4.83	10.31	8.17	9.49	1.08	2.29	3.12	9.69	11.48	16.13	1.41	0.83
Los Ángeles	CA42	753.87	5.37	7.08	21.54	7.81	0.67	4.63	2.94	24.81	7.11	6.53	0.92	1.10

Tabla 26. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2011, REDDA, NADP

2011	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	457.00	5.59	15.27	2.96	79.55	2.22	6.88	19.67	6.33	31.92	40.58	1.27	2.49
	NEZ	239.50	6.07	19.77	6.80	101.04	4.25	6.67	44.43	11.21	41.80	53.47	1.28	2.42
	TEC	727.20	5.92	15.37	3.00	81.86	1.96	6.69	28.79	6.02	33.31	47.12	1.41	2.46
	XAL	499.10	5.89	18.06	4.65	92.00	2.49	7.01	40.90	8.10	37.18	57.35	1.54	2.47
	TLA	699.80	5.61	17.81	3.31	84.31	2.52	7.18	42.40	6.80	39.02	64.08	1.64	2.16
	IBM	856.50	5.66	19.01	3.42	96.73	2.19	6.96	38.79	7.75	48.33	58.51	1.21	2.00
	LAA	722.70	5.67	15.85	3.14	82.79	2.15	6.87	30.63	6.05	36.14	46.03	1.27	2.29
	MCM	658.30	6.13	19.17	7.15	93.89	3.35	6.93	44.56	11.54	39.09	58.04	1.48	2.40
	DIC	859.40	5.32	17.31	3.26	79.59	2.34	7.08	31.87	7.81	39.95	49.03	1.23	1.99
	EAJ	919.40	5.00	16.18	3.18	64.49	2.14	7.05	24.58	8.25	35.28	45.90	1.30	1.83
	EDL	1359.10	5.04	15.34	3.10	57.98	2.20	6.93	26.43	6.09	33.19	38.87	1.17	1.75
	LOM	782.20	5.58	17.08	3.24	80.24	2.09	6.67	37.00	7.36	39.53	55.47	1.40	2.03
	AJU	868.80	4.90	14.39	3.19	48.74	2.11	7.00	20.85	8.29	28.11	38.39	1.37	1.73
	SNT	959.60	4.77	19.66	3.42	63.13	2.34	6.91	30.40	10.35	43.14	52.76	1.22	1.46
	ICAYCC	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
MPA	572.60	4.89	17.37	2.68	68.27	1.81	6.58	13.05	18.81	26.71	44.69	1.67	2.56	
COR	551.30	5.07	18.99	3.27	93.56	2.31	7.12	22.88	14.98	38.00	55.71	1.47	2.46	
Nueva York	NY99	1699.01	4.87	10.33	8.78	11.93	1.18	2.61	3.61	10.21	13.51	15.81	1.17	0.88
Los Ángeles	CA42	524.26	5.35	6.39	12.08	9.61	0.53	3.62	6.74	13.08	9.70	9.99	1.03	0.99

Tabla 27. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2012, REDDA, NADP

2012	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	383.20	5.30	18.35	2.83	79.76	2.49	3.94	21.75	10.22	40.88	53.98	1.32	1.95
	NEZ	412.60	5.43	25.55	8.14	120.28	4.08	5.05	44.05	17.97	48.44	77.70	1.60	2.48
	TEC	599.80	5.27	21.80	5.65	92.33	3.79	4.82	47.61	11.83	45.83	67.85	1.48	2.01
	XAL	548.50	5.40	22.03	7.15	98.87	2.92	5.02	46.88	13.57	47.49	67.31	1.42	2.08
	TLA	615.70	4.84	26.61	4.63	98.25	2.47	4.59	50.85	14.78	50.01	72.34	1.45	1.96
	IBM	717.40	5.09	28.91	5.18	120.62	2.89	12.00	64.32	14.94	58.68	90.44	1.54	2.06
	LAA	567.20	5.27	23.31	4.83	101.37	3.61	5.33	54.47	11.43	50.28	69.15	1.38	2.02
	MCM	784.60	5.53	22.68	6.42	106.63	3.80	4.54	53.55	12.69	50.76	66.95	1.32	2.10
	DIC	870.70	5.26	20.15	5.96	87.27	2.88	5.16	37.01	15.91	44.51	58.21	1.31	1.96
	EAJ	941.50	4.90	21.59	8.50	74.39	4.80	4.42	32.42	21.79	42.19	55.86	1.32	1.76
	EDL	1118.50	4.83	17.86	4.03	54.06	2.07	3.89	25.14	10.70	31.89	46.61	1.46	1.70
	LOM	676.60	4.89	22.60	3.40	83.54	4.44	4.25	39.86	13.06	49.79	60.45	1.21	1.68
	AJU	890.90	4.61	23.03	2.82	59.37	2.38	4.04	22.68	18.20	33.65	53.73	1.60	1.76
	SNT	1094.30	4.58	23.45	3.35	59.28	2.91	4.39	25.43	14.74	39.11	53.85	1.38	1.52
	ICAYCC	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
MPA	537.50	4.90	26.12	3.53	100.97	3.14	4.13	27.22	28.12	43.27	65.93	1.52	2.33	
COR	585.60	4.86	27.23	3.46	113.20	2.86	4.08	34.12	25.67	47.22	74.26	1.57	2.40	
Nueva York	NY99	1231.90	4.93	8.87	5.54	12.69	0.89	2.62	4.66	6.52	14.30	13.94	0.97	0.89
Los Ángeles	CA42	431.55	5.23	7.62	15.32	13.51	0.69	4.01	3.19	17.95	13.84	7.97	0.58	0.98

Tabla 28. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2013, REDDA, NADP

2013		Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$
					$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$		
ZMCM	MON	498.00	5.12	18.38	2.44	88.26	2.16	1.37	23.12	16.75	37.91	50.97	1.34	2.33
	NEZ	715.60	5.47	23.64	2.39	112.90	2.76	1.40	41.29	19.94	48.43	75.13	1.55	2.33
	TEC	847.30	5.04	20.39	2.39	85.23	3.54	1.64	35.51	18.38	37.42	66.61	1.78	2.28
	XAL	824.10	5.40	22.71	3.40	104.44	2.02	3.21	49.09	17.55	42.91	77.64	1.81	2.43
	TLA	996.80	5.15	20.31	1.64	85.82	1.68	1.32	40.66	11.62	37.20	70.14	1.89	2.31
	IBM	969.60	5.28	24.10	3.80	104.55	2.48	2.34	52.81	17.34	49.70	83.84	1.69	2.10
	LAA	610.10	5.13	23.86	4.65	95.84	2.76	2.28	50.30	18.31	46.93	82.07	1.75	2.04
	MCM	867.80	5.15	22.68	3.24	101.40	2.07	2.65	46.97	19.11	47.02	77.06	1.64	2.16
	DIC	828.80	4.91	23.11	1.98	91.12	2.20	1.03	38.72	21.62	42.76	68.09	1.59	2.13
	EAJ	961.80	4.76	21.47	3.05	74.54	1.92	3.08	29.96	21.61	38.73	62.59	1.62	1.92
	EDL	1554.60	4.80	19.66	2.88	59.04	2.25	1.31	24.89	12.17	35.73	53.44	1.50	1.65
	LOM	1117.30	5.01	20.28	3.32	83.16	2.23	0.86	35.84	14.46	44.43	62.62	1.41	1.87
	AJU	1219.80	4.43	23.00	2.37	64.94	3.40	4.37	19.78	29.71	37.60	60.54	1.61	1.73
	SNT	896.50	4.77	20.46	2.90	63.33	1.42	2.31	26.66	22.79	32.74	55.99	1.71	1.93
	ICAYCC	859.58	4.90	20.68	5.17	84.01	3.47	6.94	33.32	14.79	39.08	60.70	1.55	2.15
MPA	723.50	4.62	21.49	2.11	85.21	2.99	0.93	25.68	30.74	38.37	66.84	1.74	2.22	
COR	930.30	4.94	20.52	3.32	112.87	3.03	1.53	41.47	21.65	47.13	79.87	1.69	2.39	
Nueva York	NY99	1224.53	5.01	7.64	3.94	11.00	1.03	1.62	3.45	4.59	11.99	11.16	0.93	0.92
	NY06	1041.40	5.14	10.09	20.53	14.73	0.86	5.09	6.77	23.34	12.13	16.09	1.33	1.21
	NY43	760.73	5.02	9.97	4.66	22.55	0.43	2.47	7.68	5.34	15.24	21.84	1.43	1.48
Los Ángeles	CA42	233.17	5.29	10.98	30.62	19.55	0.87	7.39	4.94	34.34	19.02	11.91	0.63	1.03

Tabla 29. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2014, REDDA, NADP

2014	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	641.10	5.03	21.15	4.65	97.78	3.07	3.29	32.50	10.45	44.19	66.67	1.51	2.21
	NEZ	752.70	5.80	19.10	5.65	94.44	2.30	4.12	31.00	22.60	39.84	60.00	1.51	2.37
	TEC	695.30	5.60	17.67	5.22	85.56	3.58	4.12	35.50	11.02	40.65	56.88	1.40	2.10
	XAL	1058.00	6.07	20.76	6.52	87.78	2.05	3.29	44.50	12.43	42.74	63.54	1.49	2.05
	TLA	920.70	5.35	21.88	24.35	85.00	1.28	4.94	46.00	11.30	44.35	68.96	1.55	1.92
	IBM	1402.30	5.14	21.33	8.26	85.00	3.07	3.29	52.50	10.45	49.19	70.21	1.43	1.73
	LAA	1052.80	5.16	19.98	6.09	86.67	2.30	3.29	38.50	12.15	45.48	65.21	1.43	1.91
	MCM	1260.00	5.41	19.82	5.22	90.00	1.79	4.12	37.50	11.58	40.81	61.46	1.51	2.21
	DIC	1007.70	5.24	18.59	5.65	75.56	2.05	4.12	34.00	10.45	40.16	57.29	1.43	1.88
	EAJ	1172.20	4.95	19.47	6.52	70.56	2.09	4.12	35.41	12.99	42.90	58.54	1.36	1.64
	EDL	1746.70	4.95	15.90	5.22	53.33	1.79	4.12	25.50	9.04	34.35	44.38	1.29	1.55
	LOM	1415.10	4.97	18.99	4.35	75.34	1.02	4.12	36.95	8.89	42.35	59.62	1.41	1.78
	AJU	1070.00	4.56	22.69	3.48	55.55	1.28	4.12	21.50	12.99	34.03	57.70	1.70	1.63
	SNT	1183.80	4.98	17.20	8.70	58.33	3.07	4.12	25.38	11.07	34.80	50.46	1.45	1.68
	Nueva York	ICAYCC	967.80	4.93	24.26	9.33	85.01	4.57	7.54	37.10	12.56	42.79	57.14	1.34
MPA		609.70	4.73	20.21	3.58	78.45	2.10	4.12	26.33	12.52	40.16	61.78	1.54	1.95
COR		509.50	5.06	21.27	4.78	95.00	2.05	4.12	31.00	12.99	42.90	62.92	1.47	2.21
NY99		1203.20	4.99	7.91	4.46	11.38	1.15	1.97	4.45	5.05	13.16	11.20	0.85	0.86
Los Ángeles	NY06	1405.13	5.15	10.90	24.70	16.26	1.24	5.94	8.18	27.57	13.21	17.04	1.29	1.23
	NY43	962.16	5.20	11.99	22.72	25.63	0.63	4.91	14.25	23.46	18.94	21.47	1.13	1.35
	NY92	998.98	5.21	13.23	17.24	31.01	0.72	5.72	22.29	17.67	24.38	27.51	1.13	1.27
Los Ángeles	CA42	422.15	5.32	6.99	16.88	10.93	0.69	4.13	3.31	18.85	10.52	6.46	0.61	1.04

Tabla 30. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2015, REDDA, NADP

2015	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	500.70	4.69	25.56	3.97	88.13	1.84	4.49	28.56	15.20	41.70	72.86	1.75	2.11
	NEZ	507.40	5.21	35.03	9.61	155.30	9.24	5.79	61.55	21.14	64.81	115.91	1.79	2.40
	TEC	629.40	5.17	25.92	4.50	107.93	4.70	3.63	43.82	10.58	54.79	78.01	1.42	1.97
	XAL	657.90	4.89	28.76	8.28	102.48	2.62	5.56	52.26	15.13	51.97	92.70	1.78	1.97
	TLA	548.40	4.86	28.48	12.97	91.83	4.05	4.23	46.25	14.00	51.66	90.08	1.74	1.78
	IBM	784.90	4.78	35.11	6.53	122.84	2.44	5.34	69.95	14.97	71.31	111.32	1.56	1.72
	LAA	687.40	5.06	27.86	5.62	104.67	2.41	4.61	58.03	12.70	59.87	93.21	1.56	1.75
	MCM	725.70	5.06	31.19	5.88	130.88	4.81	5.54	56.91	13.58	62.74	97.92	1.56	2.09
	DIC	800.40	4.92	26.58	5.25	103.93	3.01	3.75	39.98	10.66	59.15	79.64	1.35	1.76
	EAJ	835.70	4.82	27.60	10.16	98.76	2.02	3.50	41.35	13.01	56.49	84.46	1.49	1.75
	EDL	1220.60	4.76	22.87	5.21	69.54	1.70	3.69	32.93	9.38	44.48	64.82	1.46	1.56
	LOM	983.70	4.73	28.22	5.38	90.80	2.63	4.86	42.50	11.81	54.38	80.58	1.48	1.67
	AJU	1034.00	4.85	17.97	4.58	59.96	2.02	4.22	19.41	9.95	32.18	53.67	1.67	1.86
	SNT	715.90	5.31	18.61	4.06	74.37	4.85	5.43	29.22	8.18	40.16	61.52	1.53	1.85
	ICAYCC	810.30	4.74	25.44	9.05	81.31	3.97	9.72	36.39	12.47	50.36	66.94	1.33	1.61
MPA	507.60	4.66	24.83	5.10	76.26	1.92	3.92	25.60	15.15	36.74	69.99	1.91	2.08	
COR	437.50	4.68	27.06	4.72	93.26	2.85	4.36	30.79	15.48	41.02	78.12	1.90	2.27	
Nueva York	NY99	956.82	5.05	6.98	6.04	11.21	1.40	2.30	3.73	7.06	12.20	8.79	0.72	0.92
	NY06	1080.01	5.20	9.14	21.70	16.62	0.79	4.73	6.03	24.76	12.51	12.96	1.04	1.33
	NY43	938.53	5.30	10.39	19.50	25.41	0.73	3.64	11.13	20.47	17.26	16.58	0.96	1.47
	NY92	985.52	5.30	9.83	10.63	25.37	1.14	4.81	14.10	11.32	18.44	19.38	1.05	1.38
Los Ángeles	CA42	283.72	5.42	9.60	23.15	23.39	0.81	5.56	5.55	26.49	18.63	10.31	0.55	1.26



Tabla 31. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2016, REDDA, NADP

2016	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	425.10	5.82	19.77	4.25	93.83	2.46	2.93	29.08	6.19	41.76	61.96	1.48	2.25
	NEZ	617.20	5.69	26.73	7.87	126.07	3.96	4.92	46.01	8.74	48.95	89.58	1.83	2.58
	TEC	564.20	5.55	23.43	6.82	100.06	2.32	4.79	45.17	7.98	50.90	76.94	1.51	1.97
	XAL	699.80	5.79	21.33	6.58	95.47	2.65	3.25	42.45	6.77	40.40	71.97	1.78	2.36
	TLA	757.30	5.39	23.40	6.12	96.74	1.86	3.41	44.09	8.76	44.07	81.42	1.85	2.20
	IBM	851.50	5.54	30.31	8.60	123.74	2.67	5.25	73.43	10.67	65.68	103.16	1.57	1.88
	LAA	710.70	5.73	24.09	4.53	105.70	2.91	3.68	52.54	6.31	50.09	83.08	1.66	2.11
	MCM	758.20	5.71	23.78	7.99	99.98	3.08	4.48	51.22	9.46	46.36	78.41	1.69	2.16
	DIC	655.80	4.99	22.39	5.24	75.72	1.54	2.29	28.73	9.51	34.41	55.89	1.62	2.20
	EAJ	1044.93	5.01	20.59	4.55	80.46	2.16	3.23	34.27	9.56	43.98	68.13	1.55	1.83
	EDL	1297.60	5.16	18.26	4.99	63.66	2.73	2.22	39.71	6.41	36.95	55.76	1.51	1.72
	LOM	956.60	5.25	22.75	6.95	88.65	2.28	3.60	49.91	9.04	48.48	69.74	1.44	1.83
	AJU	1217.90	5.10	16.96	4.98	63.05	2.22	2.81	23.90	7.94	30.90	55.11	1.78	2.04
	SNT	1300.00	5.22	17.19	3.73	60.39	5.40	4.17	29.41	7.55	33.94	52.00	1.53	1.78
	ICAYCC	577.70	5.20	22.38	12.31	78.66	5.96	11.21	68.05	10.89	51.57	74.87	1.45	1.53
MPA	304.30	4.88	21.42	4.94	75.00	2.92	3.27	25.28	12.08	35.59	63.93	1.80	2.11	
COR	543.70	5.23	22.67	6.03	93.50	2.69	3.89	33.78	9.44	44.73	73.86	1.65	2.09	
Nueva York	NY99	1082.04	5.08	6.47	5.04	12.85	1.01	2.30	4.24	5.83	13.03	8.75	0.67	0.99
	NY06	1106.17	5.34	9.03	17.21	20.61	0.90	4.64	6.81	20.15	14.59	12.02	0.82	1.41
	NY43	893.32	5.51	9.86	21.05	25.96	0.75	3.81	13.05	22.37	15.40	13.39	0.87	1.69
	NY92	885.95	5.22	8.80	8.63	23.01	0.49	3.38	11.21	9.33	16.76	13.83	0.83	1.37
Los Ángeles	CA42	574.04	5.33	4.88	8.72	10.27	0.33	2.03	1.81	10.11	6.97	4.00	0.57	1.47

Tabla 32. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2017, REDDA, NADP

2017	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq/L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$		
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$				
ZMCM	MON	945.21	5.93	21.42		70.23						26.22	47.60	1.82	2.68
	NEZ	660.31	5.98	16.09	1.73	71.65	1.88	3.69	24.06	7.48	23.63	37.94	1.61	3.03	
	TEC	715.86	5.41	15.51	1.96	64.11	2.12	4.23	24.90	5.32	27.15	47.12	1.74	2.36	
	XAL	589.09	5.89	19.77	3.66	81.71	3.16	4.91	44.93	7.02	32.64	52.85	1.62	2.50	
	TLA	668.36	5.78	18.68	1.79	75.42	2.41	4.25	34.60	6.32	27.65	54.53	1.97	2.73	
	IBM	788.94	5.61	18.38	2.75	69.46	2.29	5.06	28.97	6.15	19.85	46.73	2.35	3.50	
	LAA	660.01	5.63	16.13	1.96	62.93	2.05	5.64	24.13	5.11	25.44	39.70	1.56	2.47	
	MCM	684.09	6.22	19.93	3.40	71.30	2.25	4.08	27.75	6.41	25.98	43.41	1.67	2.74	
	DIC	940.78	5.51	19.21	2.36	66.65	1.89	3.40	26.65	5.00	20.71	34.64	1.67	3.22	
	EAJ	1216.05	5.38	16.00	1.83	64.50	1.82	4.01	26.22	4.94	24.26	40.46	1.67	2.66	
	EDL	1306.69	5.34	13.39	1.37	42.93	1.69	3.01	20.79	4.27	21.08	33.24	1.58	2.04	
	LOM	945.21	5.46	17.93	1.96	66.48	2.13	5.57	31.31	6.33	29.03	34.67	1.19	2.29	
	AJU	1167.13	5.14	15.38	2.80	57.02	2.11	3.82	18.94	6.72	23.50	37.99	1.62	2.43	
	SNT	1231.45	5.57	15.37	1.94	58.54	3.48	3.81	25.17	6.03	22.53	35.73	1.59	2.60	
	ICAYCC	958.20	5.18	21.44	8.73	80.28	2.83	4.53	46.23	8.29	36.20	58.95	1.63	2.22	
	MPA	542.82	4.83	22.49	3.89	61.45	3.33	5.77	30.88	13.24	27.28	40.62	1.49	2.25	
COR	454.57	6.04	28.24	2.45	79.99	2.14	4.58	24.62	8.51	30.12	49.31	1.64	2.66		
Nueva York	NY99	944.88	5.11	6.57	5.52	13.34	0.99	2.06	3.83	6.67	11.77	6.90	0.59	1.13	
	NY06	1117.60	5.28	8.63	21.03	17.27	2.04	4.96	6.60	24.47	12.01	10.49	0.87	1.44	
	NY43	1205.99	5.33	7.49	9.77	20.53	1.02	3.41	9.83	10.96	12.35	11.04	0.89	1.66	
	NY92	1454.40	5.22	8.17	12.60	25.09	0.70	2.95	10.27	13.33	17.86	13.15	0.74	1.41	
Los Ángeles	CA42	538.99	5.44	7.03	21.79	9.28	1.12	5.53	4.78	25.57	6.83	5.29	0.77	1.36	
Área Metro. de Denver	CO06	ND	6.53	ND	7.04	78.39	1.74	5.10	29.30	9.69	24.44	5.23	0.21	3.21	
	CO11	ND	6.44	ND	4.96	70.39	1.71	5.27	26.40	7.40	28.16	4.20	0.15	2.23	
	CO84	ND	6.04	ND	1.48	42.83	1.15	2.55	12.85	1.98	19.18	2.11	0.11	2.23	
	CO85	ND	6.38	ND	2.91	105.67	1.53	3.46	17.35	5.45	25.94	3.26	0.13	2.34	
	CO86	ND	6.28	ND	3.87	56.56	1.13	2.63	16.00	6.33	24.23	3.15	0.13	2.33	
	CO87	ND	6.47	ND	4.17	63.39	1.82	3.95	24.30	6.41	25.19	3.76	0.15	2.52	

Tabla 33. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2018, REDDA, NADP

2018	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	656.00	5.45	19.79	2.08	70.23	2.34	4.58	25.46	6.82	38.22	50.43	1.32	2.28
	NEZ	757.17	5.58	21.54	5.74	103.35	2.33	1.56	37.12	7.96	41.69	59.60	1.43	2.48
	TEC	843.93	5.63	20.93	5.04	97.51	1.88	2.53	43.67	5.66	43.05	55.21	1.28	2.26
	XAL	629.80	6.37	25.53	8.80	112.56	2.84	3.97	65.29	7.58	51.61	65.96	1.28	2.18
	TLA	954.90	5.82	23.64	3.60	97.20	1.92	1.91	52.60	5.24	44.00	69.52	1.58	2.21
	IBM	1187.18	5.72	21.25	4.87	89.41	1.92	1.59	43.22	5.32	40.12	55.31	1.38	2.23
	LAA	844.60	5.85	22.37	4.59	105.41	1.80	1.04	47.39	5.37	47.47	56.60	1.19	2.22
	MCM	980.61	6.00	23.22	5.16	99.79	3.49	2.33	48.65	5.79	45.70	57.80	1.26	2.18
	DIC	1212.32	6.11	19.26	4.40	70.45	2.05	1.38	31.85	4.92	31.99	43.10	1.35	2.20
	EAJ	1085.00	5.25	22.28	4.23	78.04	1.70	1.92	39.68	7.96	40.54	56.49	1.39	1.92
	EDL	1368.40	5.23	16.46	3.44	63.45	1.71	1.48	34.58	6.40	36.17	42.15	1.17	1.75
	LOM	1233.17	5.91	20.01	3.88	77.10	1.39	1.70	40.14	4.76	36.71	49.16	1.34	2.10
	AJU	1062.83	5.09	15.76	3.12	64.09	1.18	1.19	23.51	7.78	32.36	44.68	1.38	1.98
	SNT	1165.09	5.49	17.82	3.62	72.28	2.76	2.07	32.23	5.55	37.16	45.93	1.24	1.95
	ICAYCC	1669.30	5.40	22.07	6.71	93.55	1.80	4.37	53.94	6.48	40.82	73.79	1.81	2.29
MPA	814.12	5.01	19.04	3.53	69.12	1.15	2.15	23.03	9.61	32.24	51.51	1.60	2.14	
COR	578.60	5.86	22.26	6.07	111.42	2.41	3.04	41.72	10.36	49.78	62.84	1.26	2.24	
Nueva York	NY99	1602.99	5.10	5.86	6.01	9.14	0.66	1.76	3.11	7.03	9.32	5.86	0.63	0.98
	NY06	1578.86	5.31	9.11	23.81	17.21	1.57	6.06	5.95	28.00	12.44	11.06	0.89	1.38
	NY43	606.81	5.50	7.05	13.04	19.25	0.37	2.66	8.71	13.87	13.13	8.56	0.65	1.47
	NY92	1284.48	5.40	10.47	20.70	25.78	0.76	5.06	17.32	21.20	21.24	14.88	0.70	1.21
Los Ángeles	CA42	338.07	5.41	4.46	10.02	6.30	0.43	2.48	2.21	11.77	5.52	3.49	0.63	1.14

Tabla 34. Promedio ponderado anual del pH, conductividad y concentración de iones del 2019, REDDA, NADP

2019	Volumen de precipitación (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentración de iones ( $\mu\text{Eq}/\text{L}$ )								$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	
				$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$			
ZMCM	MON	376.70	5.33	20.72	2.65	103.56	1.68	4.99	36.01	6.91	39.15	61.93	1.58	2.65
	NEZ	619.30	6.03	19.96	3.06	107.96	1.80	4.72	35.68	6.29	41.18	60.13	1.46	2.62
	TEC	597.10	5.85	24.21	4.62	100.56	1.92	5.64	74.41	6.42	44.62	63.85	1.43	2.25
	XAL	693.20	6.23	19.84	3.78	100.24	1.67	4.64	44.95	5.99	38.43	64.72	1.68	2.61
	TLA	630.00	5.96	22.32	3.97	105.19	1.80	5.80	54.91	6.01	43.69	78.13	1.79	2.41
	IBM	802.10	5.77	21.54	3.69	101.49	1.48	5.81	47.94	6.14	44.89	64.52	1.44	2.26
	LAA	639.90	5.33	21.63	3.72	99.02	1.39	4.23	35.62	5.87	41.87	66.08	1.58	2.36
	MCM	896.30	5.87	21.26	3.33	100.70	2.07	4.61	50.79	6.02	41.46	65.23	1.57	2.43
	DIC	950.60	5.66	21.05	3.06	101.46	1.96	6.22	42.18	5.55	46.70	58.51	1.25	2.17
	EAJ	907.50	5.61	17.27	3.03	81.60	1.36	4.35	33.72	5.12	37.52	49.70	1.32	2.17
	EDL	1164.90	5.20	17.16	2.15	70.63	1.39	3.61	29.88	4.90	35.35	44.11	1.25	2.00
	LOM	1016.60	5.43	20.96	3.02	100.56	1.62	4.52	37.40	5.49	47.07	60.88	1.29	2.14
	AJU	1064.40	4.95	17.45	2.60	64.08	1.49	4.53	23.66	6.61	30.63	49.77	1.62	2.09
	SNT	1056.80	5.45	16.10	2.39	73.09	2.46	4.35	27.00	5.32	31.25	44.67	1.43	2.34
	ICAYCC	674.25	5.32	23.57	6.28	114.57	3.08	2.78	38.76	6.02	48.05	62.48	1.30	2.38
	MPA	569.20	5.10	19.07	3.39	82.73	2.11	4.43	26.48	8.62	35.21	56.71	1.61	2.35
COR	455.50	5.75	20.83	3.93	100.63	2.54	5.83	39.42	7.25	40.11	56.82	1.42	2.51	
Nueva York	NY99	1123.95	5.16	5.86	4.53	9.35	1.25	2.53	3.51	4.98	10.05	5.53	0.55	0.93
	NY06	1500.38	5.30	7.81	16.53	15.81	1.16	4.08	5.45	19.38	12.23	8.88	0.73	1.29
	NY43	861.57	5.60	8.23	14.78	25.74	0.87	3.25	10.20	15.48	15.11	10.07	0.67	1.70
	NY92	1237.23	5.35	8.38	10.61	22.23	0.79	3.85	11.69	11.20	18.96	12.03	0.63	1.17
Los Ángeles	CA42	1061.47	5.29	5.24	11.98	7.28	0.46	2.75	2.45	14.19	6.49	4.29	0.66	1.12